

Actividades geológicas de apoyo en el desarrollo de la etapa de exploración superficial del Plan de Trabajos y Obras (PTO) del título minero HGR-14171, ubicado en las cercanías del municipio El Peñón, Santander, acorde a las normas establecidas en la CCRR

Inti Amaury Claro Vargas y Alejandro Pradilla Fuentes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Master of Science

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Geología

Geología

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

A nuestras familias, nuestras madres Marlene y Leidy, a nuestros padres John y Orlando, y a nuestros hermanos Dalton y Trilce que fueron incondicionales y los cuales nos han apoyado toda nuestra vida en todo ámbito, todo se lo debemos a ustedes.

A nuestros amigos, especialmente a Ronald, Mauricio, Daniel y Fabián que estuvieron acompañándonos durante este largo proceso, al profesor Luis Carlos Mantilla quien nos regaló la convicción para seguir adelante con nuestras aspiraciones, al profesor Carlos Alberto García quien nos guio y nos instruyó en la realización de este proyecto.

A nuestro director Andrés Cáceres por esta gran oportunidad, su gran colaboración, paciencia, conocimiento, enseñanzas de vida y al ser nuestro mentor y amigo en la adversidad y en la prosperidad, impulsándonos a ser profesionales y mejores personas.

A nuestros guías en el municipio de El Peñón, don Jesús, Milton y Carlos “el flaco” por su colaboración, paciencia y compañía. A Nena nuestra fiel acompañante durante toda esta travesía de campo.

Agradecerle a la nuestra alma mater, la Universidad Industrial de Santander y a las subdivisiones de la escuela de geología y la escuela de química. Quienes nos colaboraron en los tramites académicos y de laboratorio.

Al profesor José Antonio Henao, el laboratorio de rayos X y a Yulieth, por su asesoría y colaboración durante la fase de laboratorio. A Lucho por su amabilidad y agilidad en la realización de las secciones.

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Objetivos	12
2. Justificación	13
3. Antecedentes	15
3.1. Panorama Social	19
4. Localización	21
5. Metodología de Trabajo	22
5.1. Análisis de Laboratorio.....	24
6. Marco Teórico.....	25
6.1. Depósitos de SSC o Cobre Estratiforme en rocas Sedimentarias (Sediment-hosted Stratified Copper)	25
6.2. Depósitos Tipo Valle del Mississippi o Mississippi Valley-Type (MVT)	27
6.3. Fluidos en pliegues – Saddle Reefs	28
7. Marco Regional.....	30
7.1. Marco Geológico	30
7.2. Geología Estructural	34
7.2.1. Estructuras regionales	35
7.2.2. Estructuras locales	36

8. Resultados	38
8.1. Trabajo de Campo y muestras de mano.....	38
8.2. Petrografía.....	45
8.2.1. Muestra IACP-001-01	45
8.2.2. Muestra IACP-001-02	47
8.2.3. Muestra IACP-005-01	49
8.2.4. Muestra IACP-005-02	49
8.2.5. Muestra IACP-027-02	53
8.3. Difracción de Rayos-X	55
8.3.1. Muestra IACP-001-01	57
8.3.2. Muestra IACP-001-02	59
8.3.3. Muestra IACP-005-01	61
8.3.4. Muestra IACP-027-02	63
8.4. Mapas y entregables.....	65
9. Discusión.....	68
10. Conclusiones	70
Referencias Bibliográficas	71
Apéndices.....	75

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Tabla de coordenadas del polígono del título minero HGR-14171</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2. Muestras extraídas en campo y análisis aplicados.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Conteo de puntos de la muestra IACP-001-01</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 4. Conteo de puntos de la muestra IACP-005-01</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 5. Conteo de puntos de la muestra IACP-005-02</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6. Muestras empleadas para el análisis de DRX</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 7. Condiciones empleadas para el análisis DRX de las muestras</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 8. Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-001-01</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 9. Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-001-02.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 10. Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-005-01</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 11. Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-027-02.....</i>	<i>64</i>

Lista de figuras

<i>Figura 1. Plantón de peñoneros frente a la Corte Suprema en apoyo a las Consultas Populares.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Localización geográfica del área de estudio y zonas aledañas.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. Metodología, pasos 1-2-3-4 a realizar en la práctica empresarial.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4. Metodología, pasos 5-6-7, realización y muestreo de los ensayos de laboratorio</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Modelo de formación de depósitos de cobre estratiforme (SSC).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6. Modelo de configuración tectónica para génesis de yacimientos tipo MVT.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Fotos de campo estación IACP-001</i>	<i>39</i>
<i>Figura 8. Fotos de campo estación IACP-005</i>	<i>41</i>
<i>Figura 9. Fotos de campo estación IACP-027</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10. Fotografías de la sección delgada IACP-001-01 a 5x y 10x en XPL y PPL.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 11. Fotografías de la sección delgada IACP-001-02 a 5x y 10x en XPL y PPL.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 12. Fotografías de la sección delgada IACP-005-01 a 5x y 10x en XPL y PPL.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 13. Fotografías de la sección delgada IACP-005-02 a 5x y 10x en XPL y PPL.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14. Fotografías de la sección delgada IACP-027-02 a 5x y 10x en XPL y PPL.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 15. Difractograma de la muestra IACP-001-01 (23-0942).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 16. Procesamiento y análisis del difractograma IACP-001-01, mostrando los distintos minerales reconocidos</i>	<i>58</i>

<i>Figura 17. Difractograma de la muestra IACP-001-02 (23-0943).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 18. Procesamiento y análisis del difractograma IACP-001-02, mostrando los distintos minerales reconocidos</i>	<i>60</i>
<i>Figura 19. Difractograma de la muestra IACP-005-01 (23-0944).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 20. Procesamiento y análisis del difractograma IACP-005-01, mostrando los distintos minerales reconocidos</i>	<i>62</i>
<i>Figura 21. Difractograma de la muestra IACP-027-02 (23-0945).....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 22. Procesamiento y análisis del difractograma IACP-027-02, mostrando los distintos minerales reconocidos</i>	<i>64</i>
<i>Figura 23. Mapa geológico escala 1:15.000 del área del título minero HGR-14171</i>	<i>66</i>
<i>Figura 24. Mapa geológico escala 1:5.000 del área del título minero HGR-14171</i>	<i>67</i>

Lista de apéndices

<i>Apéndice 1. Fotografía de la muestra de mano IACP-001-01</i>	<i>75</i>
<i>Apéndice 2. Fotografía de la muestra de mano IACP-001-02</i>	<i>75</i>
<i>Apéndice 3. Fotografía de la muestra de mano IACP-005-01</i>	<i>76</i>
<i>Apéndice 4. Fotografía de la muestra de mano IACP-005-02</i>	<i>76</i>
<i>Apéndice 5. Fotografía de la muestra de mano IACP-027-01</i>	<i>77</i>
<i>Apéndice 6. Fotografía de la muestra de mano IACP-027-02</i>	<i>77</i>
<i>Apéndice 7. Registro fotográfico de las secciones delgadas realizadas</i>	<i>78</i>

Resumen

Título: Actividades geológicas de apoyo en el desarrollo de la etapa de exploración superficial del Plan de Trabajos y Obras (PTO) del título minero HGR-14171, ubicado en las cercanías del municipio El Peñón, Santander, acorde a las normas establecidas en la CCRR

Autores: Inti Amaury Claro Vargas, Alejandro Pradilla Fuentes

Palabras Clave: SSC, MVT, Cobre, DRX, Microscopía.

Descripción: El título minero HGR-14171 se encuentra ubicado en el municipio de El Peñón, Santander, hacia el flanco oriental de la Cordillera Oriental. La zona de estudio alberga en su mayoría rocas de características calcáreas pertenecientes a la formación Rosablanca. Se observa una dinámica estructural activa que generó pliegues y fallas tanto locales como regionales, que permitieron el transporte de fluidos y el desarrollo de trampas estructurales para algunos metales. En los últimos años, se han generado reportes que indican la presencia de mineralizaciones de cobre en las rocas presentes en la provincia de Vélez y sus cercanías. Con base en esto, se realizó una fase de exploración superficial inicial que permitiera reconocer y compilar información geológica dentro del título minero. Se ejecutó la etapa de cartografía detallada para ubicar y registrar los puntos con ocurrencias de metales (cobre, plomo y zinc), además de los rasgos litológicos y estructurales en el sector para la producción de mapas a escala 1:15.000 y 1:5.000. Obtenida toda la información de campo, se procedió con la fase de oficina donde se realizaron los análisis petrográficos con microscopía de sección delgada, en los cuales se reconocieron los minerales pertenecientes a las zonas de interés con presencia de ocurrencias de malaquita, galena y calcopirita. Además, se realizó el análisis de difracción de rayos-x (DRX) de carácter cualitativo a las muestras, lo cual permitió corroborar y complementar la información con respecto a las rocas y minerales aflorantes. Finalmente, se logró establecer un documento de apoyo para el desarrollo del Plan de Trabajos y Obras (PTO) correspondiente al título minero HGR-14171, donde se compiló la información obtenida de los puntos de interés, estableciendo descripciones de las rocas analizadas, caracterización mineralógica y cartografía geológica local a escala 1:15.000 y 1:5.000.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa académico. Director: Andrés Mauricio Cáceres Bottia. Master of Science.

Abstract

Title: Geological support activities for the surface exploration stage of the Work and Operations Plan (PTO) for mining title HGR-14171, located in the vicinity of the town El Peñón, Santander, in accordance with the established CCRR standards.

Authors: Inti Amaury Claro Vargas, Alejandro Pradilla Fuentes.

Key Words: SSC, MVT, Copper, DRX, Microscopy.

Description: The mining title HGR-14171 is located in the municipality of El Peñón, Santander, on the eastern flank of the Eastern Cordillera. The study area predominantly contains limestone rocks belonging to the Rosablanca formation. An active structural dynamic is observed, which generated both local and regional folds and faults, allowing for the transport of fluids and the development of structural traps for some metals. In recent years, reports have indicated the presence of copper mineralization in the rocks within the province of Vélez and its vicinity. Based on this, an initial surface exploration phase was conducted to recognize and compile geological information within the mining title. A detailed mapping stage was executed to locate and record points with occurrences of metals (copper, lead, and zinc), as well as lithological and structural features in the sector, for the production of maps at scales of 1:15.000 and 1:5.000. Once all field information was obtained, the office phase followed, during which petrographic analyses were performed using thin-section microscopy. These analyses identified minerals belonging to the areas of interest, including occurrences of malachite, galena, and chalcopirite. Additionally, qualitative X-ray diffraction (XRD) analysis was conducted on the samples, which allowed for the verification and supplementation of information regarding the outcropping rocks and minerals. Finally, a supporting document for the development of the Work and Construction Plan (PTO) corresponding to mining title HGR-14171 was established. This document compiled information obtained from the points of interest, providing descriptions of the analyzed rocks, mineralogical characterization, and local geological mapping at scales of 1:15.000 and 1:5.000.

*Bachelor Thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Academic Program. Director: Andrés Mauricio Cáceres Bottia. Master of Science.

Introducción

El título minero HGR-14171 fue otorgado por la Agencia Nacional de Minería en el año 2006 con base en la Ley 685 de 2001 y tiene una vigencia operativa hasta el año 2039. Este título minero abarca un área de 1,033 hectáreas en el municipio de El Peñón, departamento de Santander, destinada principalmente a la explotación de minerales de cobre y otros elementos. El título se encuentra dentro del rango de mediana minería, de acuerdo con el Decreto 2655 de 1988.

En la presente práctica empresarial se realizará un trabajo de apoyo para la fase inicial de exploración superficial, en donde se desarrollarán estudios que permitan evaluar las condiciones y características geológicas, geomorfológicas y estructurales del área. Las técnicas de laboratorio, como DRX (Difracción de Rayos X) y análisis petrográficos de muestras de mano y sección delgada, se utilizarán para generar una interpretación mineralógica que respalden la información recolectada en campo.

1. Objetivos

Objetivo General

Realizar actividades geológicas de apoyo en el desarrollo de la etapa de exploración superficial del Plan de Trabajos y Obras (PTO) del título minero HGR-14171, ubicado en el municipio de El Peñón, departamento de Santander acorde a las normas establecidas en la CCRR.

Objetivos Específicos

Ubicar zonas con ocurrencias minerales y recolectar muestras de afloramientos, apiques y trincheras.

Caracterizar mineralógicamente las litologías presentes mediante el uso de técnicas como Difracción de Rayos-X (DRX) y petrografía de sección delgada.

Elaborar un mapa geológico de superficie escala 1:15.000 y 1:5.000.

2. Justificación

El cobre es uno de los minerales más importantes en la actualidad dentro del marco de la transición energética, debido a su excelente conductividad eléctrica y térmica. Este posee más de 400 aleaciones las cuales son usadas principalmente en el sector de la energía y la tecnología, además de sus usos en la construcción, el transporte, la medicina, entre otros (Leañez, 2022).

La transición energética es una prioridad clave en la actualidad, ya que representa una respuesta esencial a los peligros y amenazas provocados por el cambio climático. Esta propuesta busca reemplazar las energías fósiles con el uso energías renovables y así disminuir la tasa de emisión de gases de efecto invernadero. El cobre es clave para conectar fuentes de generación de energía limpia con ciudades y fábricas, lo cual lo hace fundamental en el proceso de transición.

Por otra parte, el contrato de concesión HGR-14171 está ubicado al suroeste del casco urbano del municipio de El Peñón. El título minero cuenta con un área de 1035 hectáreas asociadas geológicamente a rocas del Cretácico pertenecientes a la Formación Rosablanca, que cuentan con un enriquecimiento significativo en minerales de óxidos cupríferos como malaquita y azurita y manifestaciones primarias como venas de calcopirita distribuidas sobre las rocas aflorantes.

La presencia de venas con minerales de cobre en las calizas de la Formación Rosablanca, conlleva a la necesidad de estudiar mejor este proceso hidrotermal, en aras de diseñar una estrategia de búsqueda que pueda conducir a localizar filones de mayor interés económico (Mantilla et al, 2003). Esto implica la necesidad de establecer un modelo de

génesis capaz de relacionar los procesos mineralizantes con la geología de la región, para así dar viabilidad al desarrollo futuro del título minero.

3. Antecedentes

En el área del municipio de El Peñón, en el departamento de Santander, Colombia, dentro del contexto geológico, se encuentra la Formación Rosablanca. Esta formación data del período Cretácico y se compone principalmente de shales, calizas, dolomitas, areniscas, con intercalaciones de tobas calcáreas y tobas calcáreas soldadas.

Las formaciones del Cretácico son de gran importancia sobre la geología regional y local, dado que en ellas se han encontrado yacimientos de evaporitas, cobre y otros metales, lo que otorga a la zona un gran potencial minero.

En el municipio de El Peñón se han otorgado varios títulos mineros para la exploración y explotación de minerales, incluyendo el cobre. De acuerdo con la información disponible en el Catastro Minero Nacional de la ANM, en el municipio de El Peñón existe solo un título minero otorgado para la exploración de cobre y otros materiales, y múltiples solicitudes vigentes para aprobación, entre los que se encuentran:

- HGR-14171: Este título minero fue otorgado en noviembre de 2006 para la explotación de minerales de cobre y sus concentrados. Cuenta con un área de 1.033 hectáreas y tiene una vigencia de 30 años, hasta el 2 de noviembre de 2039.
- 503697: Solicitud en estado de evaluación iniciada el 6 de diciembre de 2021, la iniciativa de proyecto cuenta con una extensión de 608 hectáreas, clasificándolo como mediana minería a cargo de la empresa ITOCO GREEN EMERALDS MINING COMPANY C.I. S.A.S.

- ARE-504068: Solicitud reciente en estado de revisión procesada el 12 de enero de 2022, el área del proyecto abarca 2904 hectáreas, clasificándose como gran minería a cargo de la EMPRESA COLOMBIANA DE MINAS "ECOMINAS C.I. S.A.S." en cesión de derechos con ITOCO GREEN EMERALDS MINING COMPANY C.I. S.A.S

En las cercanías del municipio de El Peñón se han evidenciado múltiples mineralizaciones de carácter hidrotermal, ubicadas hacia el sector Vélez, Bolívar y Guavatá las cuales comparten similitudes litológicas y de génesis con las rocas del área de estudio. Entre estas se han reportado manifestaciones de acumulaciones de malaquita y azurita de diversas formas soterradas por material residual y suelo vegetal en depresiones kársticas cercanas a las vías del pueblo. Estas manifestaciones están expuestas como venillas con un espesor promedio de 1 cm, y a su vez están acompañadas con sulfuros de cobre como calcopirita (Pulido, 1976).

El origen de los sulfuros no es muy claro, pero se sugiere un origen hidrotermal donde los fluidos mineralizantes ascendieron de una fuente profunda. Conjunto a esto, se determinaron elementos tales como fluorita y molibdeno en las calizas de la Formación Rosablanca, lo cual es un vestigio de la presencia de una posible actividad de carácter hidrotermal (Pulido, 1976).

Además, la influencia estructural de las fallas en un régimen frágil ha tenido un papel importante en el enriquecimiento supérgeno del área, lo que ha permitido la precipitación de minerales de cobre tipo óxido, carbonatos e hidróxidos en zonas subsuperficiales con temperaturas más bajas. A su vez, es relevante destacar que en la zona no se han observado

diques ni cuerpos intrusivos, los cuales podrían haber generado soluciones hidrotermales. (Pulido, 1976).

Por otra parte, los sulfuros se restringen principalmente a la presencia de pirita y calcopirita. Estos sulfuros se observan en nódulos y en venillas, como también se pueden observar hacia la base de la formación en las lodolitas calcáreas, las cuales se encuentran en forma de venas de calcita rellenas de espacios junto con trazas de sulfuros de hierro y cobre. En las rocas de esta formación se han encontrado venas de 20 cm de espesor de cuarzo fibroso mineralizadas, con presencia de calcopirita asociada a barita (Gómez, 1977).

Además, dentro de las mineralizaciones destacan la presencia de venas de relleno con calcita, asfaltitas, agregados de mica potásica (K-mica), alofana, malaquita, barita, fluorita y cuarzo. Asimismo, se presentan pequeñas bolsas de esfalerita y bandas finas de albititas, nódulos albitizados y bandas de sulfuros (Mantilla et al, 2003).

En múltiples zonas del municipio de El Peñón, como en el norte del municipio de Bolívar, se han encontrado socavones y excavaciones abandonadas. Estos son túneles rudimentarios, de 20 a 40 metros, con diseminaciones y venas rellenas mayoritariamente de óxidos cupríferos (malaquita y azurita), adicionalmente galena, barita y calcita, alcanzando espesores de hasta 15 centímetros (Mantilla et al, 2003).

Además de la mineralización anteriormente mencionada, también se pueden encontrar minerales de zinc como la esfalerita. Este mineral se presenta en forma de masas compactas y restringidas, con un color acaramelado, y suele encontrarse en bolsas y bandas en las calizas de la Formación Rosablanca. A menudo, la esfalerita se encuentra junto a otros minerales como galena y sulfuros de cobre. (Mantilla et al, 2003).

De acuerdo a Mantilla, Cruz y Colegial (2003), la presencia de venas con minerales de cobre en las calizas de la Formación Rosablanca, es un indicador de un proceso hidrotermal en la zona y sugiere la necesidad de estudiar este proceso en mayor detalle para diseñar una estrategia de búsqueda que pueda conducir a la localización de filones de mayor interés económico. Además, se destaca la importancia de entender los procesos de interacción entre los fluidos y la roca caja, junto con la dinámica de flujos mineralizantes y su depositación precedente a los procesos supérgenos que dieron lugar a la formación de óxidos cupríferos.

Estas manifestaciones también se pueden encontrar en venas de remplazo y venas de relleno, asociadas a la actividad hidrotermal, junto con calcita y dolomita (Gelvez-Chaparro et al., 2020).

A través de esta compilación bibliográfica, se ha visto un avance en el conocimiento de la geología local del municipio de El Peñón y se tienen indicios sobre las apariciones de minerales de cobre. Sin embargo, este se encuentra limitado por diversos factores, tales como la falta de profundización a cerca de ocurrencias de cobre y procesos metalogénicos, eventos geodinámicos o eventos hidrotermales asociados a este enriquecimiento de metales, el planteamiento de diversas hipótesis con relación a una provincia metalogénica sin llegar a desarrollar conceptos concretos de la mineralización presente en el área.

3.1. Panorama Social

Por otra parte, el municipio de El Peñón posee diversos atractivos ecológicos y turísticos, entre los cuales cabe destacar numerosos sistemas kársticos, flora y fauna característicos. Estos sistemas poseen gran riqueza geológica, paisajística, arqueológica y biótica, y se han presentado avances para declararlos patrimonio geológico kárstico, principalmente en los geotopos de: Cañón de Panamá, Caverna los Carracos, Cueva del Oro, Cueva de la Virgen, Karst Town y Caverna la Tronera (Gelvez-Chaparro et al., 2020). El Instituto Humboldt, junto con la Universidad Nacional y el espeleólogo Jesús Fernández, enumeran cada una de las especies que se encuentran solo en esta área del país: 19 tipos de arácnidos, 6 clases de miriápodos, 18 tipos de insectos, 24 especies de murciélagos, 6 clases de crustáceos, entre otros. (Lizcano, Revista Semana, 2016).

Por consiguiente, la situación minera del municipio afronta una gran problemática social, en donde la población la rechaza con contundencia. Se han organizado manifestaciones de peñoneros en rechazo a las actividades de exploración y explotación minera. El alcalde de la época (2017), Francisco Cruz Güiza, fue notificado de unos títulos mineros adjudicados aproximadamente en el 2006 a la empresa GEO-Cooper SAS, en la que María Eugenia Coronado es la titular minera y responsable del contrato de concesión No HGR-14171 (Vanguardia Liberal, 2018). Esto conllevó a la propuesta de la realización de una consulta popular para definir la situación minera del municipio (la cual fue suspendida posteriormente por el Consejo de Estado) y la creación del Acuerdo Municipal 004 de 2018, el cual pacta:

ARTICULO PRIMERO. - Prohibir en la jurisdicción del Municipio de El Peñón el desarrollo de: Actividades mineras de metálicos y la gran y mediana minería de los demás minerales, actividades relacionadas con la exploración y explotación de hidrocarburos y las actividades relacionadas a la ejecución de proyectos de producción energética tales como centrales hidroeléctricas. Lo anterior de conformidad con lo expuesto en la parte de exposición de motivos y los considerandos del presente Acuerdo y a fin de garantizar la defensa del patrimonio ecológico y cultural del Municipio.

Hasta el día de hoy, la situación minera de El Peñón sigue siendo un tema de trato delicado, y las personas mantienen actitud de rechazo hacia dichas actividades.

Figura 1

Plantón de peñoneros frente a la Corte Suprema en apoyo a las Consultas Populares.



Nota: Recuperado el 7 de mayo de 2023 en: Colombia INFORMA (abril 26 de 2018).

4. Localización

El área de estudio se encuentra en el municipio de El Peñón, ubicado en el departamento de Santander, con latitud 06° 03' 59" N y longitud 73° 51' 03" W. Geográficamente se encuentra en la provincia de Vélez, hacia el flanco oriental de la cordillera oriental. El municipio de El Peñón cuenta con una superficie total de 130 km^2 , y limita con los municipios de Bolívar, Vélez, Sucre, Landázuri, La Belleza y Cimitarra. El área cuenta con altitudes medias de 1469 m.s.n.m., aunque puede alcanzar altitudes hasta de 2600 m.s.n.m. El área de estudio se localiza en la plancha 150 de Cimitarra sobre la cuenca del Valle Medio del Magdalena, el área delimitada del título minero cuenta con las coordenadas:

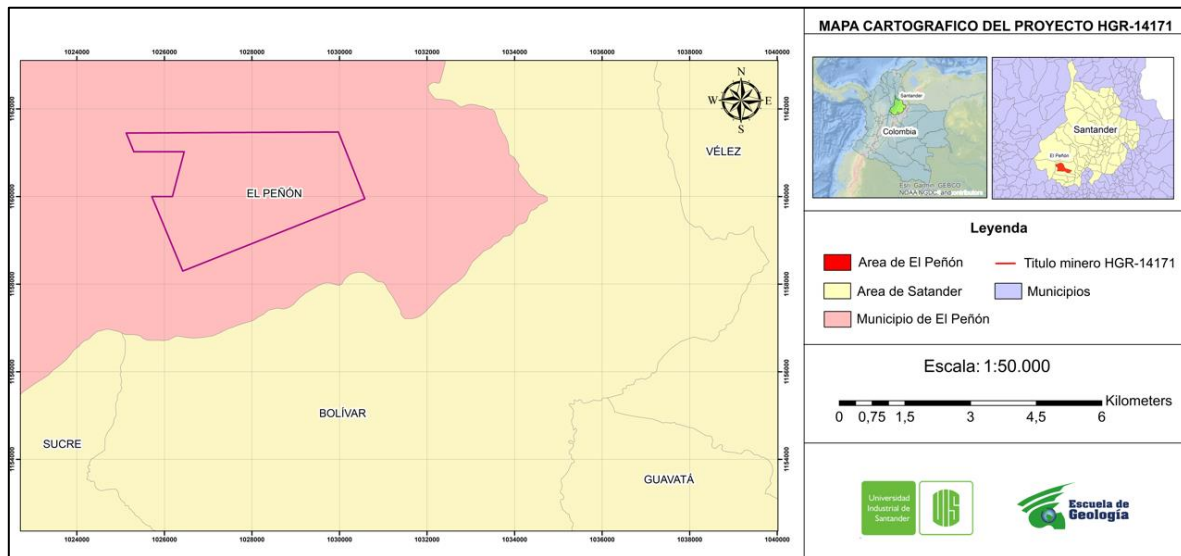
Tabla 1

Tabla de coordenadas del polígono del título minero HGR-14171

Punto	Coordenada Norte	Coordenada Este
1	1161450	1029950
2	1161450	1025128
3	1161022	1025300
4	1161022	1026452
5	1160000	1026183
6	1160000	1025712
7	1158296	1026399
8	1159967	1030547

Figura 2

Localización geográfica del área de estudio y zonas aledañas.



Nota: Sistema de coordenadas - MAGNA Colombia Bogota (3116)

5. Metodología de Trabajo

La metodología consta de 7 fases detalladas, que se pueden generalizar en trabajo Pre-Campo, Salida de Campo, Pos-Campo y análisis de laboratorio. Cada etapa viene acompañada de un análisis correspondiente del material obtenido, junto con una interpretación de los datos, que permitirá compilar y organizar la información de manera efectiva.

Figura 3

Metodología, pasos 1-2-3-4 a realizar en la práctica empresarial.

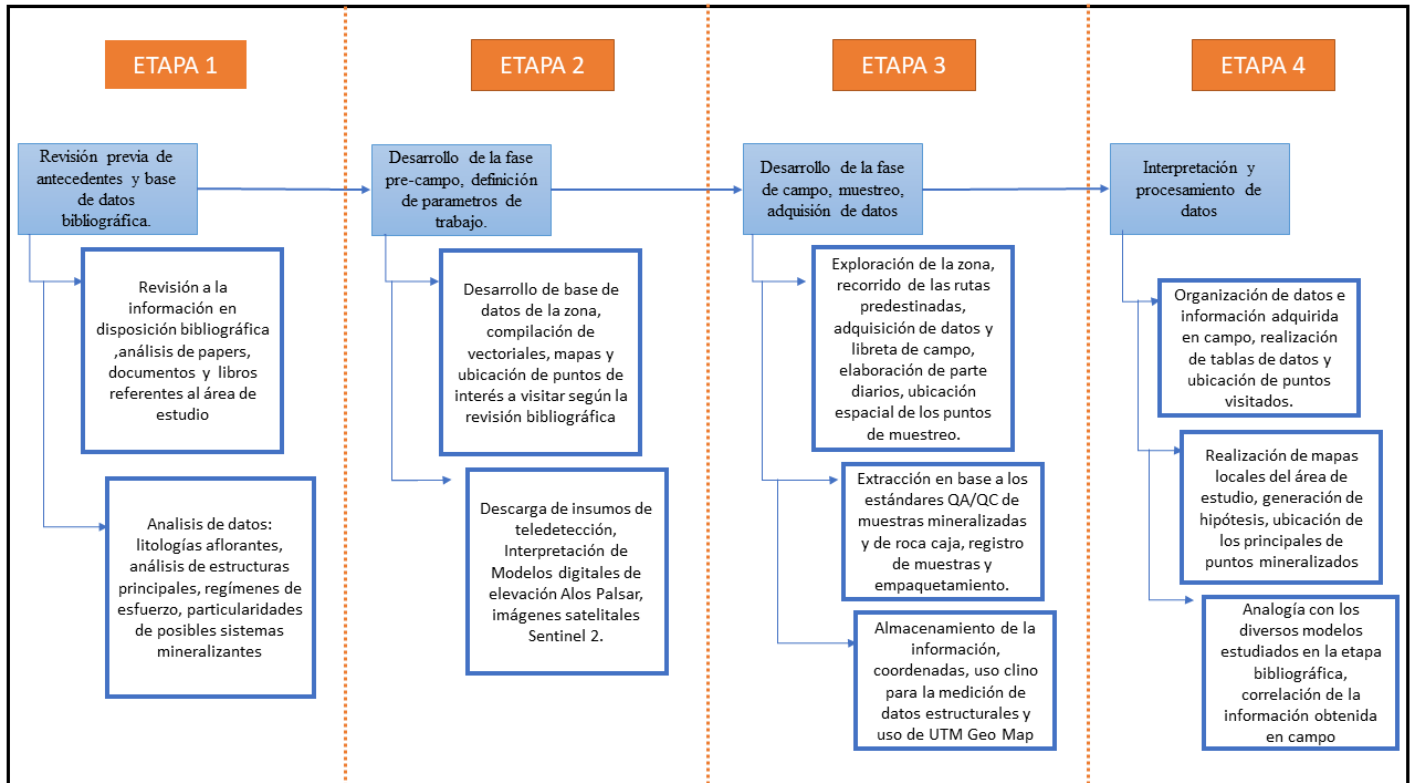
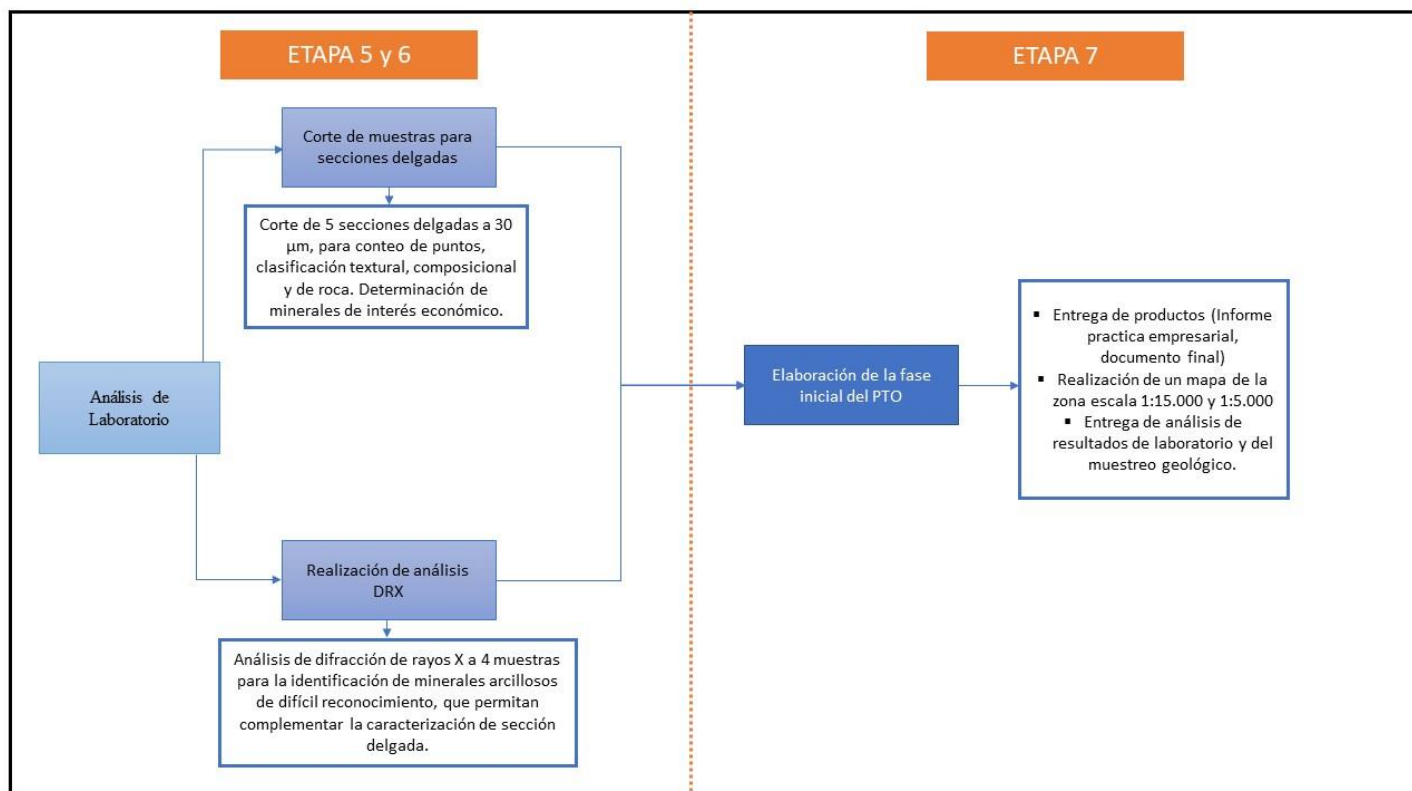


Figura 4

Metodología, pasos 5-6-7, realización y muestreo de los ensayos de laboratorio.



5.1. Análisis de Laboratorio

Para realizar un análisis adecuado de las muestras extraídas, es necesario llevar a cabo pruebas de laboratorio y cortes de muestra para la extracción de secciones delgadas que permitan diferenciar las características propias de las rocas en la geología local del título minero.

El estudio requiere la realización de los siguientes análisis:

- *Secciones delgadas:* 5 muestras de sección delgada para evaluar en microscopía, en los cuales se realizará un conteo de puntos, análisis textural, análisis composicional,

clasificación del tipo de roca, diferenciación mineralógica y análisis de posibles microestructuras.

- *Difracción de Rayos X*: Pulverización de 4 muestras a tamaño arcilla para análisis de DRX, que permitirán distinguir mineralógicamente arcillas, carbonatos y minerales de difícil reconocimiento, con base en la cristalografía de estos, a través de difractogramas, y como apoyo para el reconocimiento en sección delgada.

6. Marco Teórico

El tipo de mineralización observada es claramente de características epigenéticas. A continuación, se describen estilos de mineralización asociados a los minerales y alteraciones observadas durante la fase de campo.

6.1. Depósitos de SSC o Cobre Estratiforme en rocas Sedimentarias (Sediment-hosted Stratified Copper)

Los depósitos SSC son depósitos estratoligados de cobre, donde los minerales principales suelen ser calcosina y otros minerales tipo Cu_2S , calcopirita, bornita, pirita, y galena-esfalerita en menor proporción. La calcosina se forma cerca de las zonas oxidadas de la fuente de cobre, mientras que la pirita se forma cerca de las rocas reducidas. Se puede formar cobre nativo en caso de ser un sistema empobrecido en azufre. Estos depósitos son epigenéticos y diagenéticos.

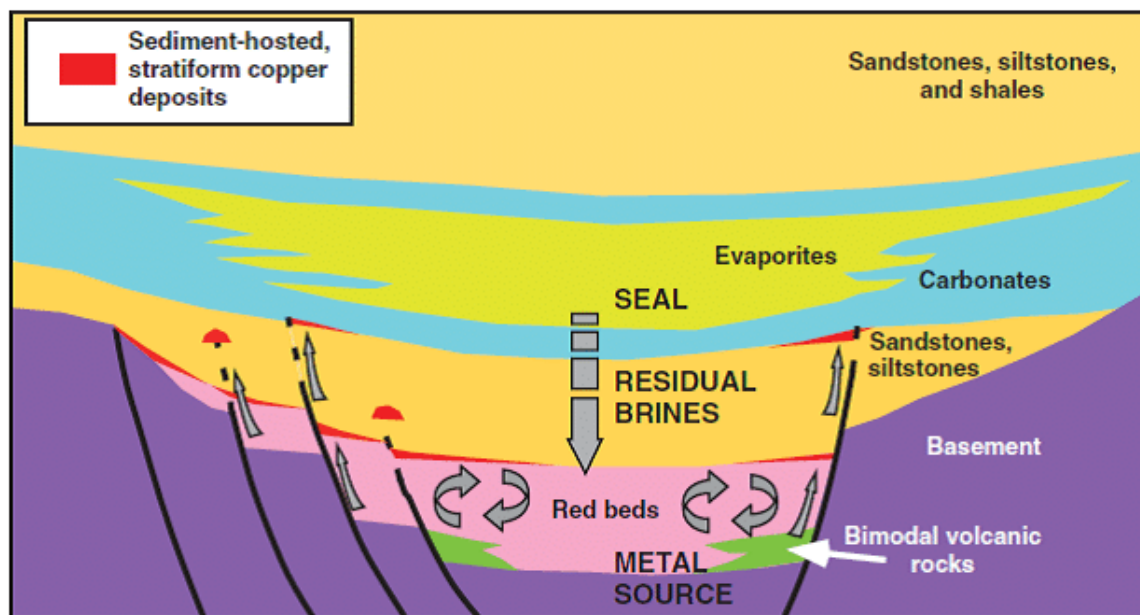
El ambiente de depositación ideal son sedimentos altamente permeables en cuencas marinas epicontinentales someras con alta rata de evaporación. Los ambientes tectónicos

favorables son rifts, aulacógenos y márgenes pasivas, donde grabens y fallas normales son contemporáneas con la mineralización.

Los depósitos tipo SSC son formados por la mezcla de fluidos en rocas sedimentarias permeables, en donde se involucran dos tipos de fluidos: un fluido salino y oxidado, encargado de transportar cobre en su forma oxidada (Cu^{+2}) en complejos clorurados; y un fluido reducido, generalmente formado en la presencia de reducción bacteriana de sulfatos en ambientes anóxicos.

Figura 5

Modelo de formación de depósitos de cobre estratiforme (SSC).



Nota: Tomado de Hitzman et al. (2010)

6.2. Depósitos Tipo Valle del Mississippi o Mississippi Valley-Type (MVT)

Los depósitos MVT son yacimientos de plomo-zinc que deben su nombre debido a los numerosos distritos ubicados en la cuenca del Río Mississippi, en Estados Unidos. La USGS (U.S. Geological Survey), en el reporte realizado por Leach et al. (2010), describe a los depósitos MVT de la siguiente manera:

Estos tipos de depósitos son yacimientos epigenéticos sin relación a actividad ígnea, y son generalmente estratoligados hospedados en calizas y dolomías. Las alteraciones que presenta son principalmente dolomitización, disolución de roca caja y brechamiento.

Los minerales dominantes son esfalerita (ZnS), galena (PbS), pirita (FeS_2), marcasita (FeS_2), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y calcita (CaCO_3), con ocurrencias de barita y fluorita. Estos sulfuros se pueden encontrar de forma masiva o diseminada, en cristales de gruesos a finos, reemplazando carbonatos o rellenando espacios vacíos.

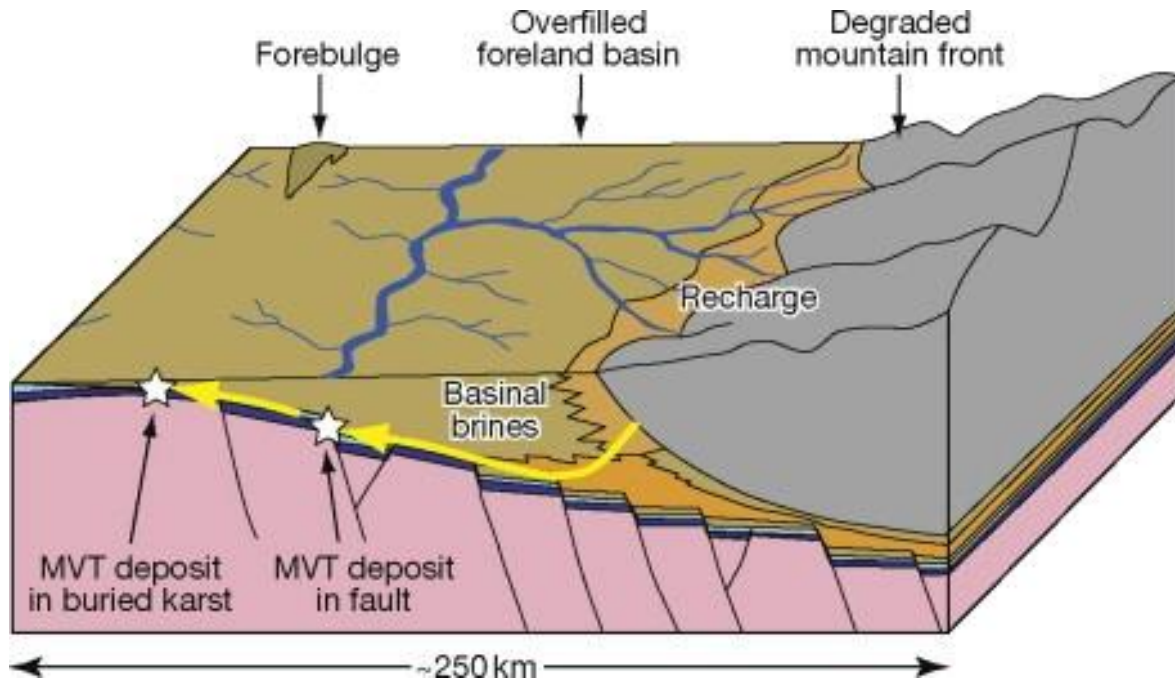
Los ambientes de formación están relacionados a los bordes de cuencas o a los “*foreland thrust belts*” (cinturón de corrimientos de antepaís).

Los fluidos relacionados tratan de salmueras con salinidades entre 10-30% que interaccionan con las rocas corticales del basamento, transportando metales gracias a mecanismos de flujo, tales como topografía (gravedad), compactación de sedimentos, compresión orogénica, entre otros.

Los procesos de depositación de metales se da principalmente por la mezcla con fluidos reducidos. Esto se da generalmente con niveles de pH entre 4.5 – 5 y temperaturas entre los 75 y 200°C. Los controles de mineralización más importantes son las fallas, fracturas, brechas de colapso y cambios litológicos.

Figura 6

Modelo de configuración tectónica para génesis de yacimientos tipo MVT



Nota: Tomado de Wilkinson, J. (2014)

6.3. Fluidos en pliegues – Saddle Reefs

Los filones tipo saddle reef son cuerpos mineralizados ubicados generalmente en la charnela de pliegues donde dominó un régimen compresional. Estos siguen un plano de estratificación preferencial y, por lo general, están asociados con estructuras relacionadas con cizallamiento por flexión en los flancos de los pliegues y la dilatación en la parte de la charnela. Sin embargo, este modelo se presenta de manera más simple, con el desarrollo de un espacio triangular vacío en el cual los fluidos se podrán depositar, donde se ha presentado un esfuerzo de compresión principal que permita la compactación de las litologías sometidas al esfuerzo.

Los yacimientos tipo saddle reefs en charnelas se encuentran principalmente en secuencias turbidíticas compuestas por pizarras y metagrauvacas, aunque no son el único tipo morfológico, ya que pueden estar acompañados por otros tipos de estructuras filonianas, brechas y stockworks en rocas competentes y zonas de foliación en áreas con mayor deformación dúctil (Lillo y Oyarzun, 2013). La acción de los esfuerzos sobre la litología local puede generar diversas formas de deposición de los fluidos mineralizantes, incluyendo la formación de colapsos que dependen de los estadios de relajación de la zona afectada y las litologías que afloran, como pueden ser calizas o dolomitas. Por lo tanto, se pueden establecer algunos parámetros para este tipo de mineralizaciones:

- Los filones tipo saddle reef se encuentran confinados en las charnelas y en algunos flancos en estructuras leg reef con gran buzamiento, lo que sugiere que el transporte de los fluidos se produjo a lo largo de estructuras previamente generadas.
- Los filones se emplazaron en fases tardías del desarrollo de los esfuerzos locales, durante lapsos de relajación que permitieron el avance de los fluidos a través de deslizamiento flexural.
- Las mineralizaciones muestran una alta interacción entre el fluido y la roca caja, lo que permitió normalizar las condiciones en el momento de su emplazamiento, incluyendo procesos de oxidación y reducción.
- El régimen de presiones varió entre litostático y supralitostático durante la formación de los filones (Lillo y Oyarzun, 2013).

La acumulación de minerales de cobre y asociados en la zona del título minero pueden obedecer las condiciones planteadas por los yacimientos tipo Saddle Reefs y los yacimientos tipo SSC.

7. Marco Regional

7.1. Marco Geológico

Formación Girón (Grupo Girón): La Formación Girón ha tenido distintas interpretaciones a lo largo del tiempo. En primera instancia, fue Hettner (1892) quien introdujo el término “Piso Girón”, llamando así a un conjunto de areniscas rojizas, lutitas pardo moradas y calizas rojas observadas en los alrededores de Zapatoca – Girón. Posteriormente, Langenheim (1959) determina la localidad tipo en la angostura del Río Lebrija, donde determina que posee 3.500m de espesor y se divide en 3 miembros:

- Miembro inferior: 750m, areniscas
- Miembro medio: 1.250m, limolitas y lutitas oscuras
- Miembro superior: 1500m, areniscas grises arcósicas

Sin embargo, el estudio más detallado del Grupo Girón fue realizado por Cediel (1968). En la publicación, Cediel toma la sección tipo del Río Lebrija, donde determina 8 conjuntos litológicos (A-H), los cuales, resumidamente, son:

- Conjunto A (610m): Areniscas de grano grueso, conglomerática, con estratificación entrecruzada en unidades grandes y colores entre gris medio y gris claro
- Conjunto B (590m): Interestratificación de redbeds (40% del total de la formación) con areniscas grises azulosas claras de grano medio a grueso.
- Conjunto C (430m): Areniscas bien calibradas de grano medio a grueso con estratificación entrecruzada. Color entre gris verdoso y gris-oliva claro.
- Conjunto D (650m): Interestratificación de areniscas gris verdosas con redbeds en bancos (60% de la formación). Se pueden encontrar lentes pequeños de carbón.

- Conjunto E (1.040m): Areniscas de grano medio que varían a lutitas y ocasionalmente arcillolitas, con colores gris azulado y gris amarillento. Se caracteriza por su estratificación irregular y frecuentes estratos de arenisca fina, lutitas o arcillolitas con lentes pequeños de carbón.
- Conjunto F (250m): Similar al conjunto D, se tratan de areniscas en bancos con presencia de conglomerados de cuarzo, interestratificadas con redbeds de color rojo grisoso a marrón-rojo, y que alcanzan a penas un 30% del conjunto total.
- Conjunto G (1.050m): Areniscas de grano grueso con estratificación entrecruzada. Localmente rica en moscovita, más frecuente en la parte media. Rico en conglomerados hacia el tope. En la base predomina el color gris verdoso, pasando a gris amarillento y finalmente a amarillo grisoso.
- Conjunto H (190m): Areniscas de grano fino bien calibradas de color naranja claro, intercaladas con bancos de color rojizo. Puede variar lateralmente a lutitas o arcillolitas rojizas o verduscas. Posee estratificación cruzada y tabular. Se presentan redbeds, con una ocupación total del 30% del conjunto.

El Grupo Girón suprayace las formaciones Bocas o Jordán en discordancia angular. Sobre este, se encuentra la Formación Rosablanca sin discontinuidad reconocible.

Cabe tener en cuenta que el Grupo Girón abarca la Formación Girón y la Formación Los Santos. Este posee una edad del Jurásico Tardío – Berrisiano, y su ambiente de depósito es continental, fluvial a lacustre-fluviátil.

Formación Arcabuco: La Formación Arcabuco trata de arenitas gruesas a finas de cuarzo, de color gris claro y ocasionalmente gris rojizo, con intercalaciones de lodolitas rojizas. El área tipo es la Serranía de Arcabuco (Hubach, 1953, 1957). El espesor de esta unidad varía considerablemente, siendo tal que: se estiman 825m entre Villa de Leyva y Charalá (Galvis y Rubiano, 1985), 600m en Arcabuco y 300m en Paipa – Los Medios (Renzoni, 1981).

En la Quebrada Juncal, ubicada sobre la vía El Peñón – Palo Blanco, aflora la Formación Arcabuco en el núcleo del Anticlinal de Los Medios, donde Gómez et al. (2008), describen 32m de la parte superior de la formación. Se observa el contacto con la Formación Cumbre, que consta de secuencias cortas de arenitas finas, glauconíticas, cubiertas por arcillolitas blancas caoliníticas, y de arenitas de cuarzo finas, negras, con delgados intervalos de conchas. La edad para esta unidad se ha inferido entre el Jurásico Superior y el Cretácico Inferior. Se estima que su ambiente de depósito es de plataforma dominado por depósitos continentales con un régimen de flujo de baja energía.

Formación Cumbre: En el estudio realizado por Gómez et al. (2008), esta formación trata de arenitas de cuarzo, arcillolitas y lodolitas grises oscuras a negras con espesor variable, superpone las cuarzo-arenitas y lodolitas rojizas de la Formación Arcabuco y subyace las calizas de la Formación Rosablanca. Tiende a ser incluida como unidad superior de las formaciones Arcabuco, Tambor y Los Santos. La edad estimada es del Valanginiano y su ambiente de depósito trata de un ambiente marino sobre llanura costera aluvial.

De igual manera, en dicho estudio levantan 20 m de columna estratigráfica de la formación, en el núcleo del Anticlinal de Portones o Los Medios, en el sector de la Bodega, donde se identifican 3 segmentos:

- Segmento 1: Arenitas gris pálidas, presencia de glauconita, cemento calcáreo y estratificación interna a pequeña escala, superponiendo la Formación Arabuco.
- Segmento 2: Se da un corto intervalo cubierto, seguido de capas de arcillolitas amarillas intercaladas con capas delgadas de caolín y horizontes de algas, y de arcillolitas grises con alto contenido de algas intercaladas con arcillolitas amarillas ricas en materia orgánica.
- Segmento 3: Trata de capas de arcillolita gris clara con bioturbación, capas delgadas de caolín y presencia de algas, intercaladas con arenitas líticas negras y finas, y gran contenido de algas. Hacia el tope se dan arcillolitas grises claras con laminación plana paralela, de geometría cuneiforme por una superficie erosiva en la base de una arenita superpuesta.

Formación Rosablanca: La Formación Rosablanca es la formación donde se estima que se encuentran los cuerpos mineralizados en la zona.

En el flanco occidental del Anticlinal de Los Medios (El Peñón) aflora un escarpe de 150m de altura, en el cual Gómez et al. (2008) definen como “paquete inferior”, y consta de bancos de mudstone y arenitas calcáreas de color gris oscuro, con presencia de cuarzo, pirita, venas de calcita y fragmentos de bivalvos y foraminíferos. En este paquete, Gómez et al. diferencian 3 segmentos, los cuales son:

- Segmento 1 (56m): Secuencia de 10m de mudstone gris oscuros grano soportadas, seguido de 46m de capas gruesas de lodolitas calcáreas gris oscuro intercaladas con capas medias arcillolitas gris oscuras. Se observa bajo contenido en bivalvos.

- Segmento 2 (25m): Capas gruesas de lodolitas y limolitas calcáreas gris oscuras intercaladas con láminas de arcillolita gris oscuro. Geometría plano-paralela y ondular, seguido de 25m de capas muy gruesas de lodolitas gris oscuras intercaladas con arenitas de cuarzo con cemento calcáreo y arcillolitas grises.
- Segmento 3 (88m): Secuencia monótona (88m) de capas muy gruesas de mudstone gris oscura intercaladas con packestone (biomicroesparita), arenitas de cuarzo y arcillolitas grises. Se observan acunamientos de capas en la parte media.

7.2. Geología Estructural

La región de El Peñón se encuentra afectada por un comportamiento dúctil y frágil, evidenciando zonas con tendencias estructurales compresionales y extensionales que generan la formación de pliegues y fallas regionales y locales que se desarrollan dentro del título minero HGR-14171.

La secuencia kárstica regional del municipio de El Peñón se encuentra asociada a pliegues y fallas con un rumbo muy similar entre 30°NE a 35°NE, las cuales se encuentran asociadas a un tensor de esfuerzos regional de 127° NW-SE (Sánchez & Pulido, 2023), dicho tensor explica las principales direcciones de las estructuras y el movimiento que desarrolla cada una de ellas. Dentro de las estructuras regionales se puede destacar la falla de San Cayetano, el anticlinal de los Carracos, el anticlinal de los portones, el sinclinal de Agua Blanca, el anticlinal de Escuillas, el anticlinal de El Peñón, el sinclinal de Panamá, entre otros. (Sánchez & Pulido, 2023).

Dentro del municipio de El Peñón y dentro de la geología local que abarca el título minero HGR-14171, se pueden destacar estructuras menores que dan paso los procesos de colapso y acumulación de fluidos mineralizantes enriquecidos en cobre, dentro de estas

estructuras se destaca la falla de Robles, la falla de tendidos, el anticlinal de Panamá, el sinclinal de Robles y el sinclinal de Tendedos.

7.2.1. Estructuras regionales

Anticlinal de los Portones: se encuentra ubicado al flanco nor-occidental del municipio de El Peñón, esta estructura presenta un rumbo 30 NE, siendo un pliegue suave con un plano axial vertical. (Sánchez & Pulido, 2023). Este pliegue está afectado por fallas circundantes con el mismo rumbo y se encuentra acotando estructuras locales como lo es el cañón de panamá.

Falla de San Cayetano: es una estructura con componente en rumbo preponderante de 30NE. Geomorfológicamente se asume como una falla oblicua, inversa de acuerdo al trazo del tensor regional de esfuerzos y con un comportamiento dextral en rumbo. (Sánchez & Pulido, 2023).

Sinclinal de Panamá: es una estructura ubicada al flanco oriental de la zona de estudio, con un rumbo 30 NE, ubicada aproximadamente a 500 metros del casco urbano del municipio. Presenta una morfología suave, un plano axial casi vertical y un ángulo de buzamiento alto en cada uno de sus flancos.

Anticlinal Los Carracos: es una estructura ubicada al occidente del área de estudio, acotada entre el sinclinal Sardinias y el anticlinal Escuillas, presenta un rumbo 30NE, presenta un buzamiento suave hacia sus flancos y un plano axial de bajo ángulo. En las cercanías al pliegue se da la presencia de múltiples dolinas y estructuras de carstificación.

Sinclinal de agua blanca: La estructura expresa una tendencia de rumbo 30NE, posee un plano axial casi vertical junto con flancos con buzamiento alto siendo una estructura

bastante abrupta respecto a su apertura. Se encuentra acotada por el anticlinal Los Carracos y el anticlinal Escuillas.

Anticlinal Escuillas: La estructura se ubica al occidente del municipio del área de estudio, la cual posee un rumbo de 32NE, siendo la estructura regional más cercana al área de interés, presentando un plano axial vertical, con un buzamiento alto en sus flancos. Cercano al anticlinal se desarrollan estructuras con un componente preponderante en rumbo como lo son “push ups” asociados a fallas locales y adyacentes al plegamiento.

7.2.2. Estructuras locales

Principalmente las estructuras locales se encuentran asociados a diversos esfuerzos compresivos que han afectado el área de estudio y el municipio de El Peñón. Por una parte, las fracturas corresponden principalmente a fallas con componente mixto, tanto horizontal (dextrales y sinestrales) como vertical (Normales e inversas). De igual forma, los pliegues tanto anticlinales como sinclinales, se encuentran relaciones a la tendencia regional en rumbo de estructuras mayores entre 30°NE a 35° NE, con buzamientos variables en los flancos y con planos axiales casi verticales. Entre estas estructuras locales se encuentra:

Falla de Robles: La falla está ubicada al noreste de la zona de estudio, adyacente a la vereda de Robles, siendo una falla con un rumbo de 93° SE. La falla permite evidenciar un desplazamiento de bloques de la formación Rosablanca.

Falla de Tendidos: La falla se encuentra ubicada al sur del área del título minero, en las cercanías a la vereda Tendidos, esta falla presenta un rumbo de 115° NE, esta falla afecta y desplaza al anticlinal de Panamá y al sinclinal de robles con una dinámica dextral.

Anticlinal de Panamá: El anticlinal presenta un rumbo 45°NE, corresponde a un pliegue local de la Formación Rosablanca, la cual presenta un plano axial vertical, con un

buzamiento en los flancos suave. Esta estructura está influenciada drásticamente por procesos de disolución, presentando en la zona de la charnela reiterados colapsos que dieron una apertura en la parte superior del pliegue.

Sinclinal de Robles: La estructura se encuentra al oriente del área de estudio, adyacente al anticlinal de Panamá. Presenta un rumbo de 30°NE , con un buzamiento suave en cada uno de sus flancos y representa el pliegue con menor extensión dentro de la geología local.

Sinclinal de Tendidos: se encuentra ubicado entre las veredas Hoya de Peperos y Tendidos, adyacente al pliegue regional del anticlinal de Escuillas y al anticlinal de Panamá, la cual está siendo desplazada por la falla Tendidos hacia NW. El pliegue presenta un rumbo de 30°NE y presenta un buzamiento abrupto hacia los flancos del pliegue.

8. Resultados

8.1. Trabajo de Campo y muestras de mano

La fase de reconocimiento de campo se llevó a cabo entre los días viernes 16 de diciembre y el jueves 22 de diciembre de 2022, donde estos días marcados fueron dedicados estrictamente para el viaje de trayecto de ida y vuelta. Durante esta salida de campo se realizaron informes diarios “partediaros” de los días sábado 17 a miércoles 21, en donde se describe la hora de salida, estaciones, litologías encontradas, preguntas formuladas, fotografías, percances y hora de regreso. Las estaciones descritas constan de 27 paradas, donde se pudieron localizar 2 puntos con mineralización (de los cuales 1 se encuentra fuera del título minero) y 1 con posible mineralización.

Las muestras recolectadas pertenecen a tres estaciones: IACP-001, IACP-005 e IACP-027. De ellas, se escogieron 2 muestras por estación, dando lugar a un total de 6 muestras, con el fin de ser sometidas a análisis de laboratorio (petrografía y DRX), y fueron re-etiquetadas de la siguiente manera:

Tabla 2

Muestras extraídas en campo y análisis aplicados.

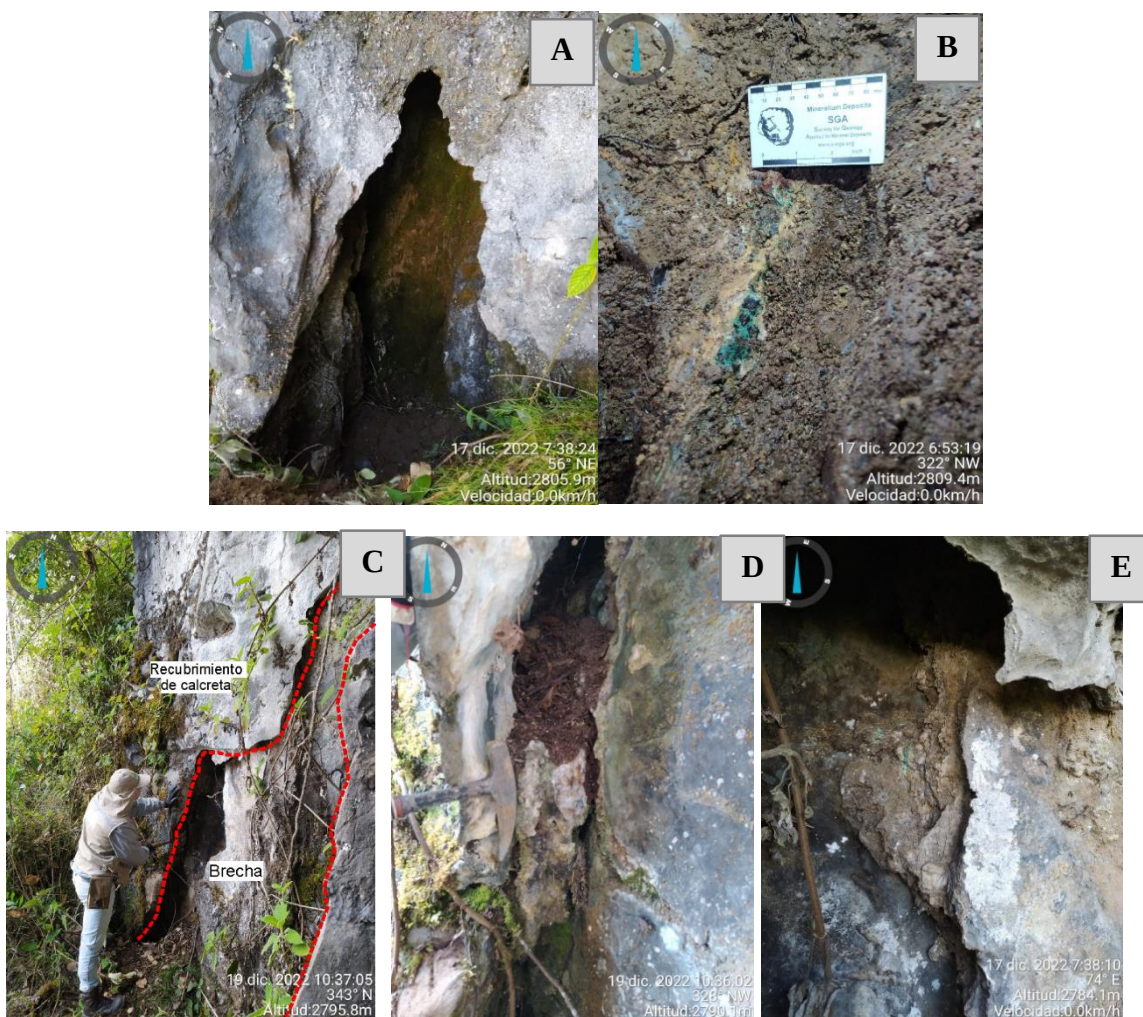
Muestra	Litología	Sección delgada	Etiqueta SD	DRX	Etiqueta DRX
IACP-001-01	Brecha calcárea	Si	1	Si	23-0942
IACP-001-02	Caliza	Si	2	Si	23-0943
IACP-005-01	Caliza con galena	Si	3	Si	23-0944
IACP-005-02	Caliza con galena	Si	4	No	x
IACP-027-01	Arenisca y cuarzos	Si	5	No	x
IACP-027-02	Arcillas	No	x	Si	23-0945

Estación IACP-001

X: 1026181.536

Y: 1160733.329

Z: 2810

Figura 7*Fotos de campo estación IACP-001.*

Nota. A) Apique, donde se encuentra mineralización en brecha. B) Brecha con malaquita. C) Estructura de colapso con capa exterior de calcreta D y E) relleno de la brecha, con calcita, malaquita y sílice.

Se da el primer apique de la zona. En esta estación se presenta un posible colapso, con presencia de “lentes” pertenecientes a una brecha con dato 147/80 de malaquita, calcopirita (o pirita), posible presencia de óxidos de hierro en forma de fragmentos sub-angulosos y de calcita, sin orden aparente. Venillas y cuerpos masivos de caliza recristalizada (calcita, posiblemente dolomita). Esta brecha se ubica dentro de calizas grisáceas aparentemente mudstone con presencia de fragmentos de conchillas (Fm. Rosablanca).

Se recolectaron 2 muestras: IACP-001-01 (brecha) e IACP-001-02 (roca caja).

- IACP-001-01: (Anexo 1) Trata de una brecha con fragmentos sub-angulosos de óxidos de hierro, rodeados de malaquita (. Se puede observar la presencia de grandes cristales calcita (o dolomita) recristalizada. No se puede conocer la posible temporalidad de los eventos (en caso de ser formados en sucesos distintos), sin embargo, se estima que trata de 2 eventos relativamente sincrónicos. Es ligeramente apreciable un direccionamiento de forma semi-paralela al contacto con la roca caja.
- IACP-001-02: (Anexo 2) Perteneciente a la roca caja (Fm. Rosablanca), trata de calizas masivas gris oscuro con bajo contenido fósil, posiblemente trate de una mudstone. Se pueden observar venillas de caliza recristalizada y pátnas de calcopirita (o pirita) con malaquita en zonas cercanas al contacto con la brecha.

Estación IACP-005

X: 1017954.39

Y: 1161169.48

Z: 2720

Ubicado en una subsidencia en la charnela del anticlinal de Panamá, posiblemente generado por un colapso. En la parte alta se observa un bloque de calizas grisáceas de la formación Rosablanca, la cual es atravesada por una vena con dato 163/(23±3) de caliza/dolomía blanca lechosa recristalizada con buen hábito, presencia un mineral negro con hábito masivo (posible óxido), venillas (semiparalelas a la calcita) y nódulos de galena

acompañadas ocasionalmente de cuarzo vítreo. Posibles eventos de dolomitización o silicificación.

Figura 8

Fotos de campo estación IACP-005.



Nota. A) Vena de dolomita+calcita+cuarzo+galena. B) Posible estructura con presencia de malaquita+azurita+limonita+caliche C) Apique

En la parte baja se da el segundo apique, donde observa presencia de malaquita, azurita, con ocurrencias de limonita y caliza, en una posible brecha con dato 048/40. En el hueco de abajo se encuentran fragmentos de azurita y malaquita con presencia de arcillas blancas (¿caliche?) posible caliza y limonita (arcilla amarillenta) y barro sin forma aparente, microcristalino. Se encontró una muestra en donde se observa un carácter como en capas de la azurita/malaquita en contacto con caliza. El apique presenta un problema, y es que las muestras recolectadas se encuentran como regolito o posiblemente saprolito.

En esta estación se tomaron 3 muestras, de las cuales, para los análisis de laboratorio, se descartó la muestra IACP-005-03 por presentar inconsistencias.

- IACP-005-01: (Anexo 3) La muestra posee grandes cristales de calcita/dolomita lechosa, blanquecina, con alto contenido de óxidos diseminados y presencia de nódulos globulares de galena, aparentemente direccionados concordante al dato estructural de la vena. La muestra posee también un trozo de roca caja, la cual se pudo determinar que trata de wackestone-mudstone grisáceos con presencia de conchillas de bivalvos pertenecientes a la formación Rosablanca.
- IACP-005-02: (Anexo 4) Al igual que la muestra IACP-005-01, se pueden apreciar grandes cristales de calcita/dolomita blanca, con altos contenidos de óxidos diseminados distribuidos paralelamente a una cara cristalográfica y al contacto con la roca caja, simulando así la apariencia de una “capa” o “banda” de calcita de más oscura o turbia, de color grisáceo o café claro. La galena parece estar acompañada de cristales vítreos de cuarzo.

Estación IACP-027

X: 1026681

Y: 1160153

Z: 2619

Figura 9*Fotos de campo estación IACP-027**Nota. A) Areniscas rojizas B) Venas de cuarzo*

Se observa una disconformidad, al norte se observa la formación Rosablanca, un valle separa a este de afloramientos de areniscas amarillentas de grano medio, pertenecientes a la formación Arcabuco, con estratificación 090/30. Se encuentra en un bloque levantado aislado, donde se estimó que pertenece a un lomo de falla. Se dan presencia de venas, brechas y venillas caóticas (stockworks) de cuarzo con generación de drusas de cuarzos vítreos, lechosos y ±ahumados. Estos se encuentran hospedados en areniscas, y algunas venas parecen haber interactuado con la roca caja, generando arcillas rojas intensas. Además, se pueden encontrar recubiertos de arcillas amarillentas (¿limonita?) y óxidos de hierro, posiblemente las areniscas posean material ferruginoso. Estas areniscas, in situ, poseen contacto concordante con arcillolitas rojizas micáceas, que poseen laminación paralela coincidente con el contacto.

- IACP-027-01: (Anexo 5) Trata de areniscas con una alta gama de colores, desde amarillentas, ligeramente grisáceas y verdosas. Se observan numerosas venillas de cuarzo lechoso acompañado de algunos óxidos de hierro. Estas venas también pueden asociarse con drusas de cuarzo cristalino, donde se observan cuarzos prismáticos que van desde 1mm hasta aproximadamente 5cm en algunos ejemplares. Es posible la presencia de óxidos de hierro diseminados entre los cuarzos.
- IACP-027-02: (Anexo 6) La muestra trata de arcillas rojizas altamente muscovíticas, con laminación interna concordante al contacto con las areniscas. Es posible la presencia de óxidos o hidróxidos de hierro.

8.2. Petrografía

A las muestras IACP-001-01, IACP-001-02, IACP-005-01, IACP-005-02 e IACP-027-01 se le realizó secciones delgadas con revestimiento de alúmina ([Anexo 7](#)). Esto con el fin de realizar reconocimiento mineral y petrografía de barrido en las muestras de interés.

8.2.1. Muestra IACP-001-01

La muestra trata de una brecha donde se identificó la aparición de los minerales: malaquita, hematita, limonita, sulfuros (pirita, calcopirita), cuarzo y carbonatos sin diferenciación, entre los cuales pueden ser calcita, dolomita, o posiblemente siderita. Se observan agregados de malaquita rodeando cristales de hematita con limonita en sus bordes y presencia de sulfuros dentro de algunos cristales de hematitas. Estos fragmentos se encuentran rodeados de un cemento de cuarzo y carbonatos, que se diferencian cristales de carbonatos, donde estos segundos poseen mayor tamaño de cristal, evidencias de recristalización y texturas de reacción en el contacto entre estos. La limonita se puede encontrar en forma de aglomeraciones o diseminada entre el cemento y ocasionalmente dentro de carbonatos recristalizados. Ver [Figura 10](#)

La sección delgada de la muestra fue sometida análisis petrográfico de barrido, donde se tomaron 341 puntos, dando como resultado:

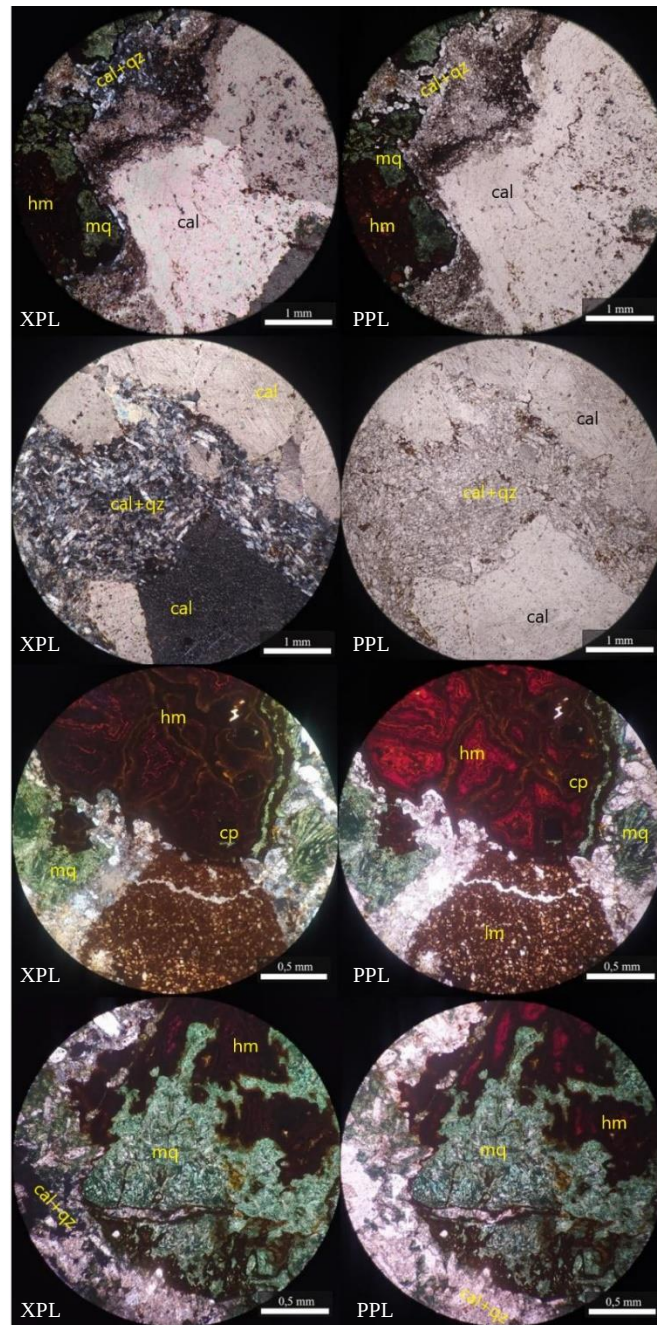
Tabla 3

Conteo de puntos de la muestra IACP-001-01

	Carbonatos	Cuarzo	Hematita	Limonita	Malquita	Opacos	Sumatoria
Puntos	139	66	61	54	20	1	341
Porcentaje(%)	40.76	19.35	17.89	15.84	5.87	0.29	100.00

Figura 10

Fotografías de la sección delgada IACP-001-01 a 5x y 10x en XPL y PPL



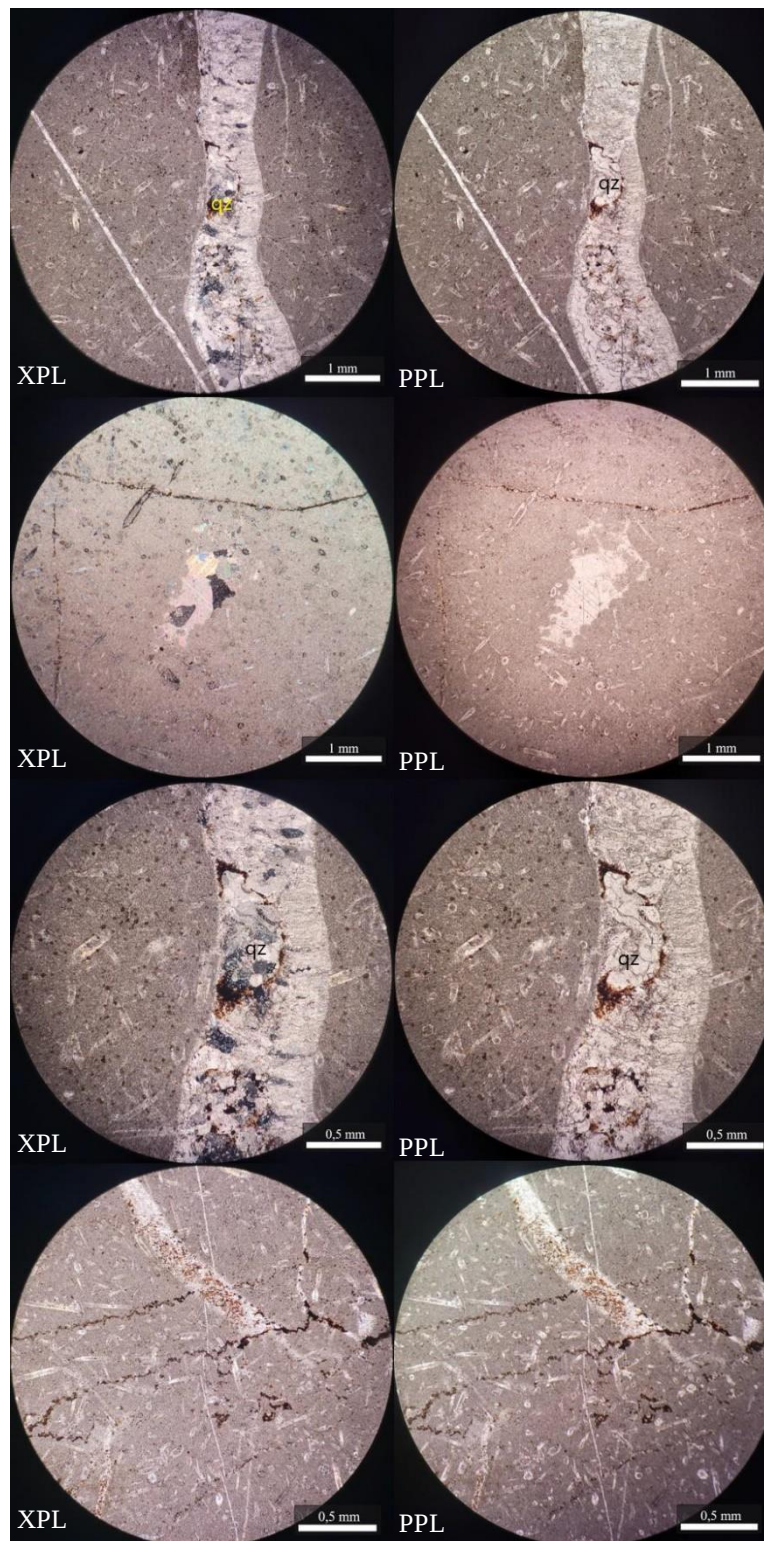
Nota. Las imágenes de la petrografía tendrán las siguientes abreviaciones minerales: bt - biotita, cal - calcita, cp - calcopirita, gn - galena, hm - hematita, lm - limonita, mq - malaquita, ms - moscovita, opq - mineral opaco, qz - cuarzo.

8.2.2. Muestra IACP-001-02

La sección presenta una matriz de lodo calcáreo, micrítico que forman una textura homogénea, acompañada por aloquímicos >25% de lo que se pueden destacar ooides y crinoideos, junto con un cemento esparítico microcristalino rellenando poros e intersticios entre granos. Se puede evidenciar la presencia de venillas de recristalización de calcita con inclusiones de opacos microcristalinos (posibles sulfuros u óxidos), anhedrales y en forma de diseminado, que se oxidan parcialmente hacia los márgenes del cristal. Se pueden observar venillas alargadas y opacas, rellenando espacios de porosidad secundaria y junto con óxidos de hierro generando halos. En diversas zonas se identifican cristales aislados de calcita euhedrales y monocristalinos que se diferencian de la matriz micrítica por su tamaño, forma de cristal y macla polisintética. Ver Figura 11.

Figura 11

Fotografías de la sección delgada IACP-001-02 a 5x y 10x en XPL y PPL



8.2.3. Muestra IACP-005-01

La sección está compuesta mayoritariamente por calcita recrystalizada por procesos diagenéticos, que generan una textura moteada, la cual varía los ángulos de extinción de los granos. Se diferencia de los carbonatos minerales opacos que presentan oxidación a limonita con formas anhedrales formando pequeños halos que conforman >2%. Se exhiben cristales pequeños de cuarzo monocristalino dispersos alrededor de las calcitas que conforman <1% de la muestra. Se puede observar varios espacios vacíos. Ver [Figura 12](#).

Tabla 4

Conteo de puntos de la muestra IACP-005-01

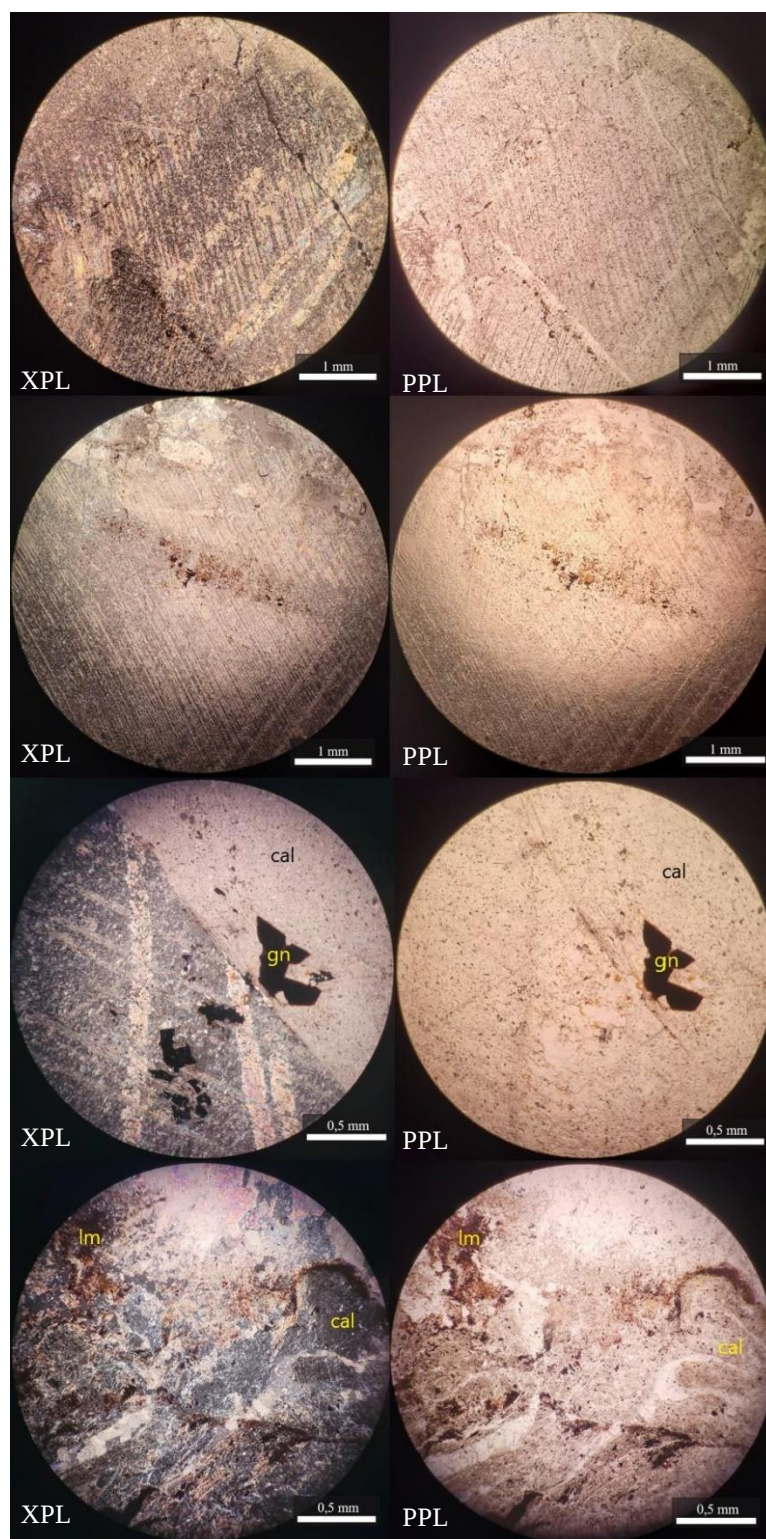
	Carbonatos	Cuarzo	Limonita	Opacos	Sumatoria
Puntos	252	2	30	18	302
Porcentaje(%)	83.44	0.66	9.93	5.96	100.00

8.2.4. Muestra IACP-005-02

La muestra trata de una vena de carbonatos indiferenciados (calcita, dolomita), con presencia de galena, minerales opacos (óxidos) y limonita. La galena a simple vista posee su característico brillo metálico, color gris, y en la sección se representa como un mineral opaco con su característica aparición de triángulos de rasgado dado por su baja dureza. Es posible la presencia de cuarzo acompañando a cristales de galena. Los minerales opacos se encuentran en pequeños cristales de forma diseminada con carbonatos, generando un porcentaje visual 20-35% entre estos, predominando los carbonatos. Algunos de estos cristales de minerales opacos poseen hábito acicular o se encuentran junto con limonita, por lo cual se estima que trate de algún óxido de hierro (hematita). Ver [Figura 13](#).

Figura 12

Fotografías de la sección delgada IACP-005-01 a 5x y 10x en XPL y PPL



En la sección delgada se pueden diferenciar áreas de carbonatos relativamente limpios (Zona 1) y carbonatos con presuntos óxidos de hierro diseminados (Zona 2). Se realizó un análisis petrográfico de barrido, con un total de 325 puntos. Por cuestiones prácticas, los puntos pertenecientes a la Zona 2 fueron denominados como “opacos” o “limonita”. Esto debido a que se desconoce la relación genética entre estos carbonatos. Por consiguiente, para calcular la cantidad real de carbonatos de la muestra, se debe realizar un recálculo, teniendo en cuenta la relación óxido-carbonato de la Zona 2 y adicionarle el valor inicial de carbonatos de la Zona 1. El valor estimado de la relación cuantitativa entre óxidos y carbonatos, es de 30% y 70%, respectivamente.

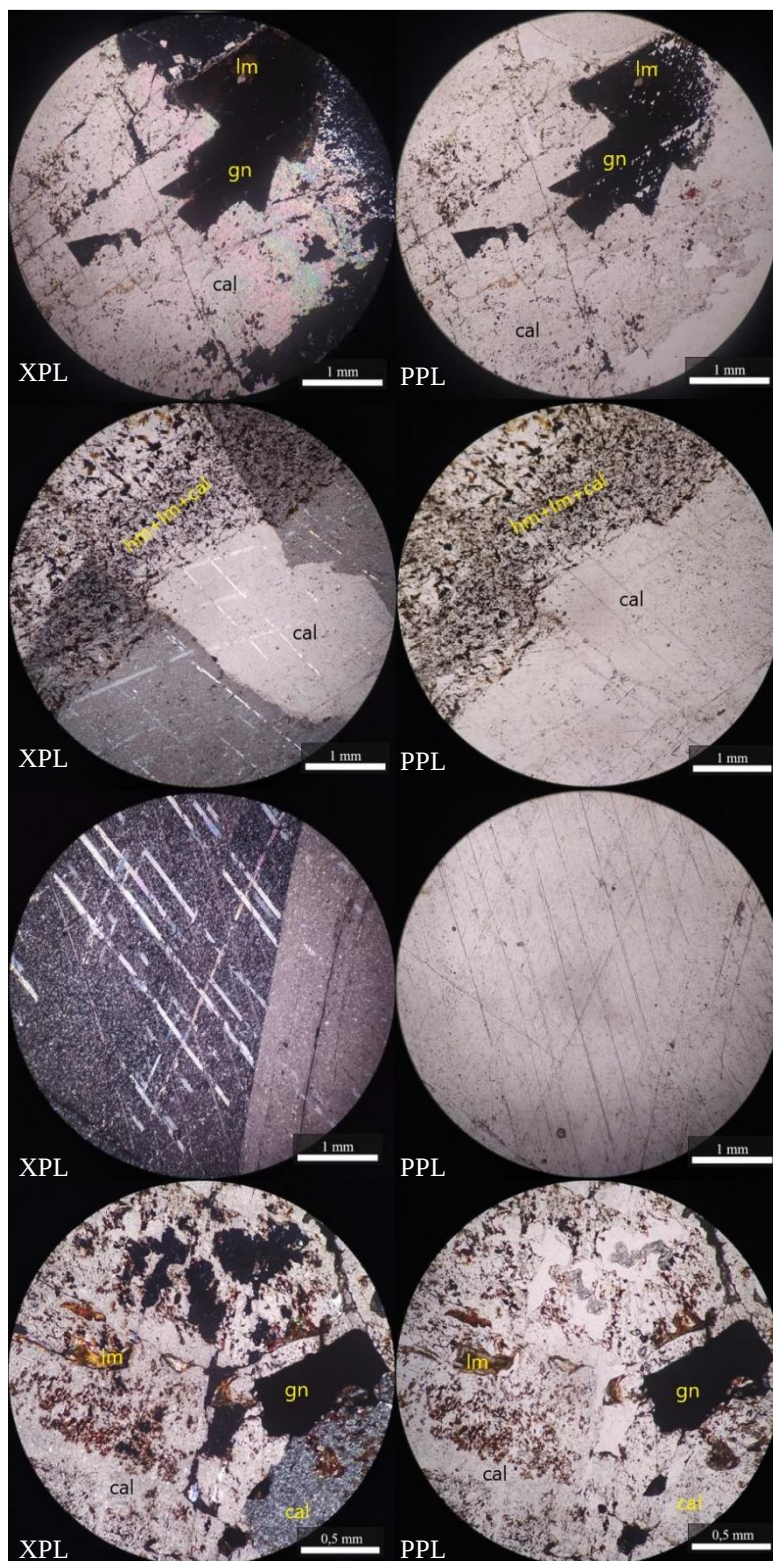
Tabla 5

Conteo de puntos de la muestra IACP-005-02

	Carbonatos	Limonita	Opacos	Galena	Cuarzo	Sumatoria
Puntos	225	20	76	3	1	325
Porcentaje(%)	69.23	6.15	23.38	0.92	0.31	100.00
Porcentaje real (30% Óxidos)	89.91	1.85	7.02	0.92	0.31	100.00

Figura 13

Fotografías de la sección delgada IACP-005-02 a 5x y 10x en XPL y PPL

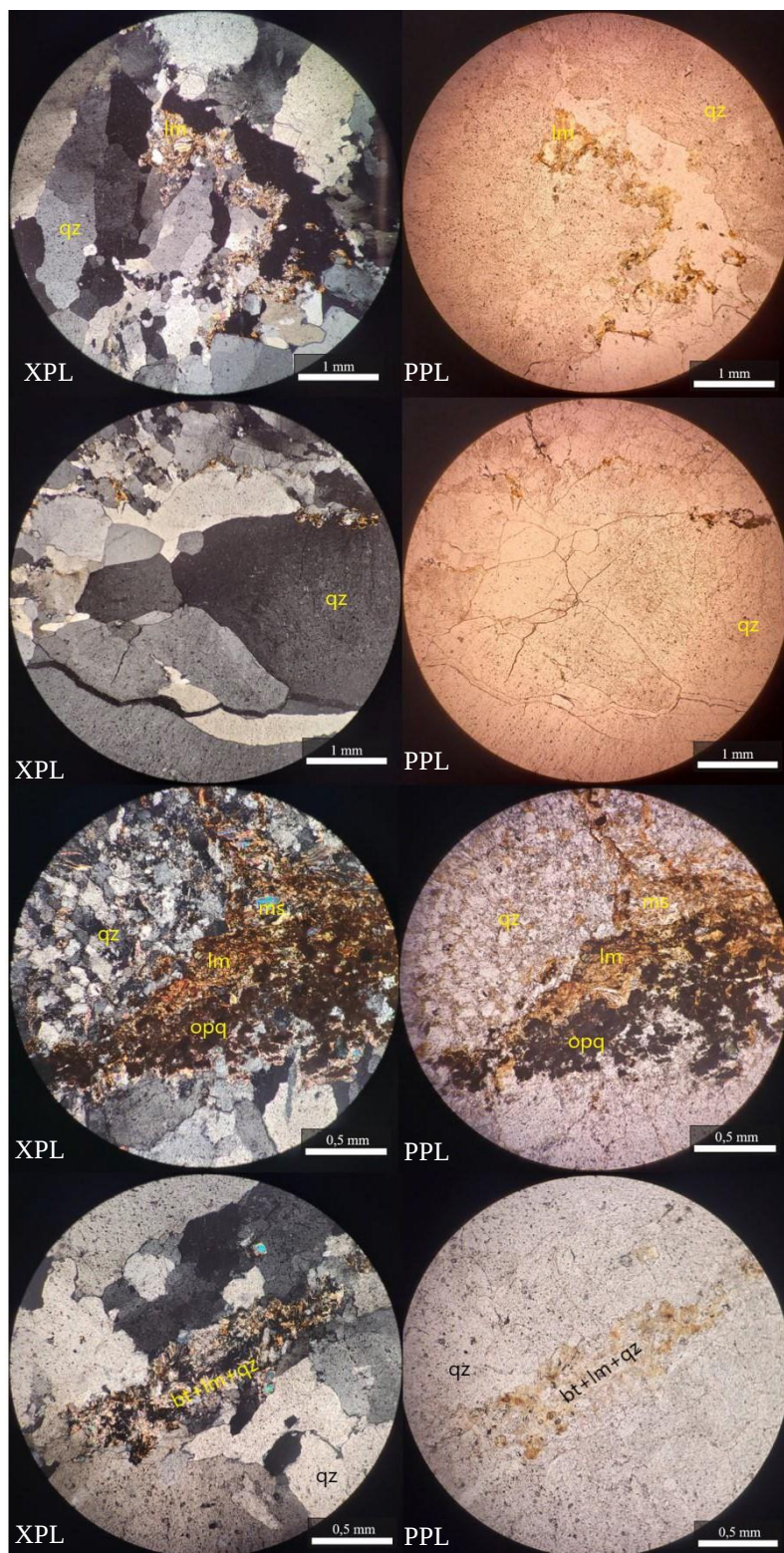


8.2.5. Muestra IACP-027-02

La sección presenta una matriz de cuarzo granular monocristalino con extinción recta, junto con escasos granos que presentan extinción ondulante. Además, se da la presencia de cuarzo policristalino, el cual presenta fracturas e inclusiones de pequeños cristales micáceos, además acompañado de micas tipo moscovita y biotita, que parcialmente se están alterando a clorita en forma diseminada. Se nota la presencia de feldespato potásico con macla Carlsbad distinguible entre los cristales de cuarzo monocristalino, junto con sericita. Se puede evidenciar la presencia de minerales opacos subhedrales, con un leve indicio de oxidación en los bordes de los cristales menores al 5% de la muestra, adyacentes a los bordes de cuarzoes policristalinos. A lo largo de la sección se puede evidenciar un fracturamiento parcial de todos los cristales de cuarzo, generando porosidad secundaria entre los límites de cada cristal. Por otra parte, es posible la identificación de zircones detríticos. Ver Figura 14

Figura 14

Fotografías de la sección delgada IACP-027-02 a 5x y 10x en XPL y PPL



8.3. Difracción de Rayos-X

Se realizaron 4 análisis de Difracción de Rayos-X (DRX) de forma cualitativa, con el propósito de identificar las fases cristalinas de los minerales presentes en las muestras, así poder reconocer todos los minerales arcillosos y de mena correspondientes a las zonas de mayor interés dentro del título minero HGR-14171. El estudio abarcó las siguientes muestras:

Tabla 6

Muestras empleadas para el análisis de DRX

Número	Nº de Muestra	Código de Laboratorio	X	Y	Z	Observaciones
1	IACP-01-01	23-0942	1026181.54	1160733.33	2810.00	Calizas (calcita, dolomita) con sulfuros de Cu-Fe y minerales supérgenos (malaquita, azurita, limonita, entre otros), posible silicificación. La muestra posee meteorización.
2	IACP-01-02	23-0943	1026181.54	1160733.33	2810.00	Caliza (calcita, dolomita?) con posible silicificación y bajo contenido de sulfuros Cu-Fe y supérgenos Posible meteorización
3	IACP-005-01	23-0944	1017954.39	1161169.48	2720.00	Posee dolomita, galena y cuarzo, posiblemente presencia de calcita, esfalerita? Materia orgánica?.
4	IACP-027-02	23-0945	1026681.00	1160153.00	2619.00	Arcillas rojizas (filosilicatos), probablemente feldespática, con posibles óxidos-hidróxidos de hierro (limonita)

A través de los análisis de DRX se obtuvieron 4 difractogramas, formados por reflexiones (picos) que corresponden a las distancias de dimensiones nanométricas entre familias de planos de átomos. (Aparicio & Carbajal, 2010). El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:

Tabla 15*Condiciones empleadas para el análisis DRX de las muestras*

Condiciones de registro	
Voltaje (kV)	40
Corriente (mA)	40
Rendija de Divergencia (mm)	0,6
Rendijas Soller Primario (°)	2,5
Rendillas Soller Secundario (°)	2,5
Tamaño de Paso (° 2Theta)	0,02035
Tiempo por paso (s)	0,6
Rango de registro (° 2 Theta)	2,0 a 70
Radiación	CuK α 1
Filtro	Niquel
Uso de Anti-dispersor de Aire	Si
Detector	Lineal LynxEye
Tipo de barrido	A pasos

Finalmente se obtuvieron los gráficos de los difractogramas, los cuales se pudieron analizar por medio del programa Difrac Eva 2021. La interpretación se realizó con base en una biblioteca cristalográfica que contenía un registro espectral mineralógico, que permitió el reconocimiento de todos los picos según el comportamiento y patrón de cada una de las reflexiones que presentaban las muestras.

El difractograma representa los valores de intensidad en función del ángulo de difracción (2θ) generando una serie de picos, basado en los ejes cristalográficos cuando un haz de rayos x ha sido difractado por un cristal, con base en esto se tuvieron en cuenta estos parámetros para el análisis:

- La posición de los picos con base en los valores de 2θ .
- La intensidad del pico, expresado en términos de altura, siendo proporcional al aumento del valor de intensidad del haz difractado.

- La forma o perfil del pico, representando la forma en la que se comporta, permite establecer relación con diferentes tipos de minerales como las arcillas.

Con base en lo descrito anteriormente, se presentarán los resultados obtenidos por el análisis de DRX aplicado a las 4 muestras de interés:

8.3.1. Muestra IACP-001-01

Figura 15

Difractograma de la muestra IACP-001-01 (23-0942).

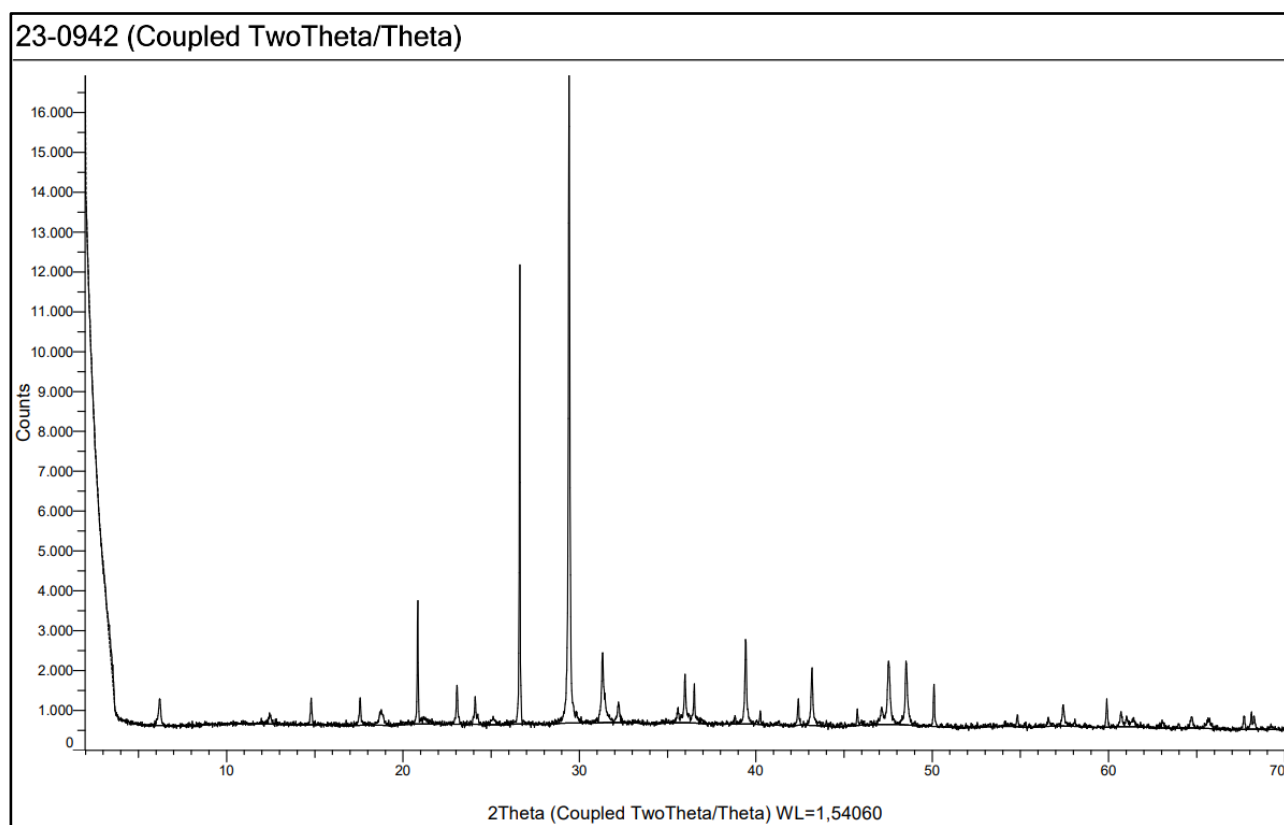


Figura 16

Procesamiento y análisis del difractograma IACP-001-01, mostrando los distintos minerales reconocidos

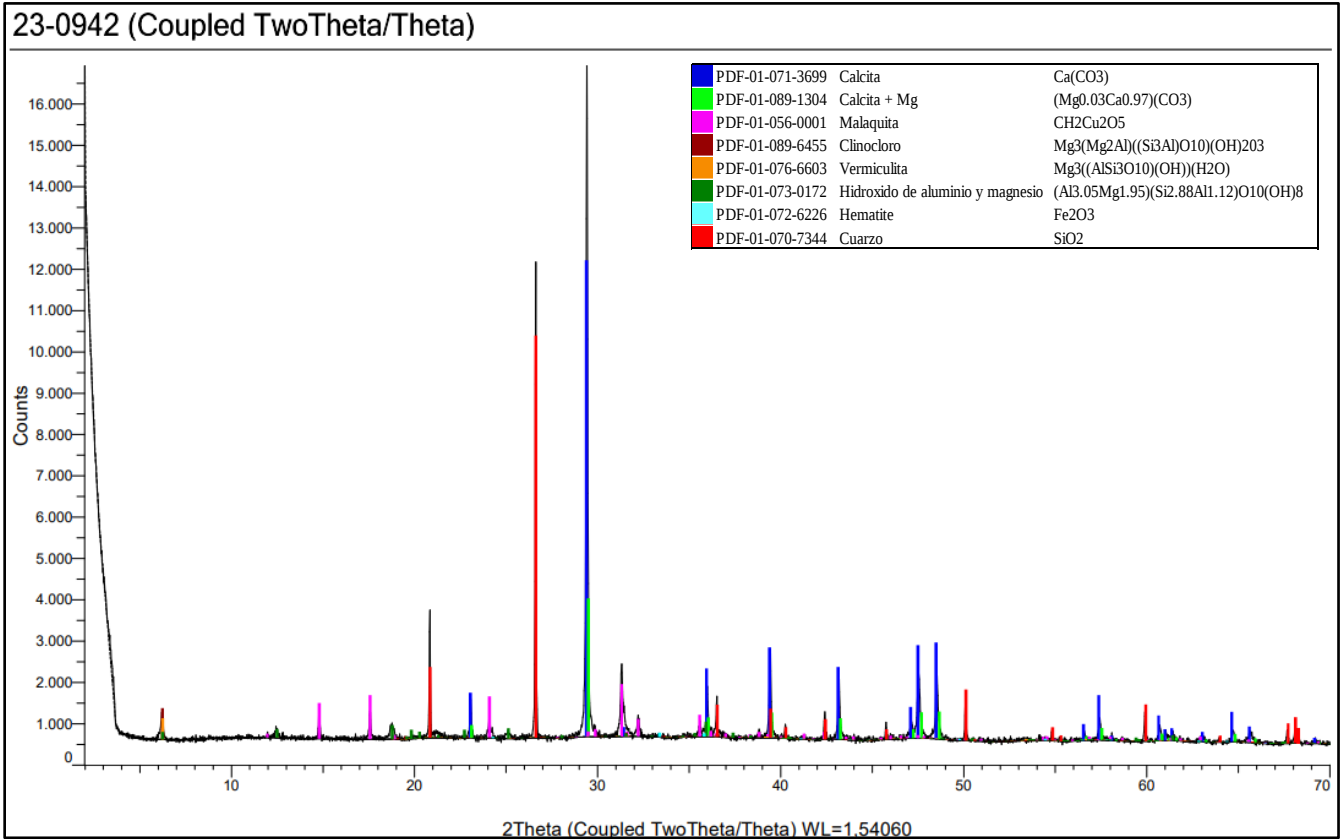


Tabla 8

Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-001-01

Color	ID	Mineral	Fórmula	Concentración	Similitud en Y	Sistema Cristalino
	PDF-01-071-3699	Calcita	Ca(CO3)	Mayor	68,59%	Romboédrico
	PDF-01-089-1304	Calcita + Mg	(Mg0.03Ca0.97)(CO3)	Mayor	19,92%	Romboédrico
	PDF-01-056-0001	Malaquita	CH2Cu2O5	Mayor	7,54%	Monoclínico
	PDF-01-089-6455	Clinocloro	Mg3(Mg2Al)((Si3Al)O10)(OH)2O3	Menor	4,53%	Monoclínico
	PDF-01-076-6603	Vermiculita	Mg3((AlSi3O10)(OH))(H2O)	Traza	3,03%	Monoclínico
	PDF-01-073-0172	Hidroxido de aluminio y magnesio	(Al3.05Mg1.95)(Si2.88Al1.12)O10(OH)8	Mayor	2,15%	Monoclínico
	PDF-01-072-6226	Hematite	Fe2O3	Traza	0,67%	Romboédrico
	PDF-01-070-7344	Cuarzo	SiO2	Mayor	57,90%	Hexagonal

8.3.2. Muestra IACP-001-02

Figura 17

Difractograma de la muestra IACP-001-02 (23-0943).

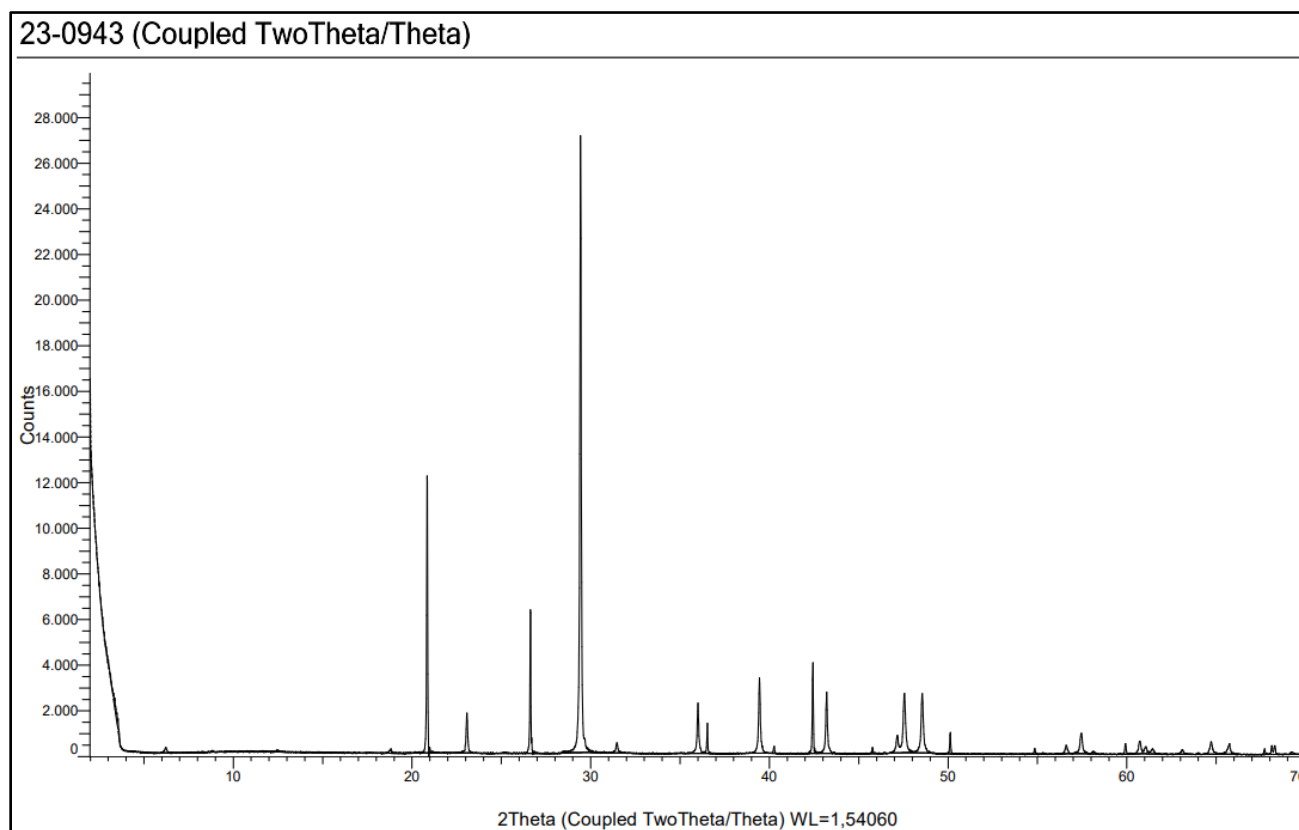
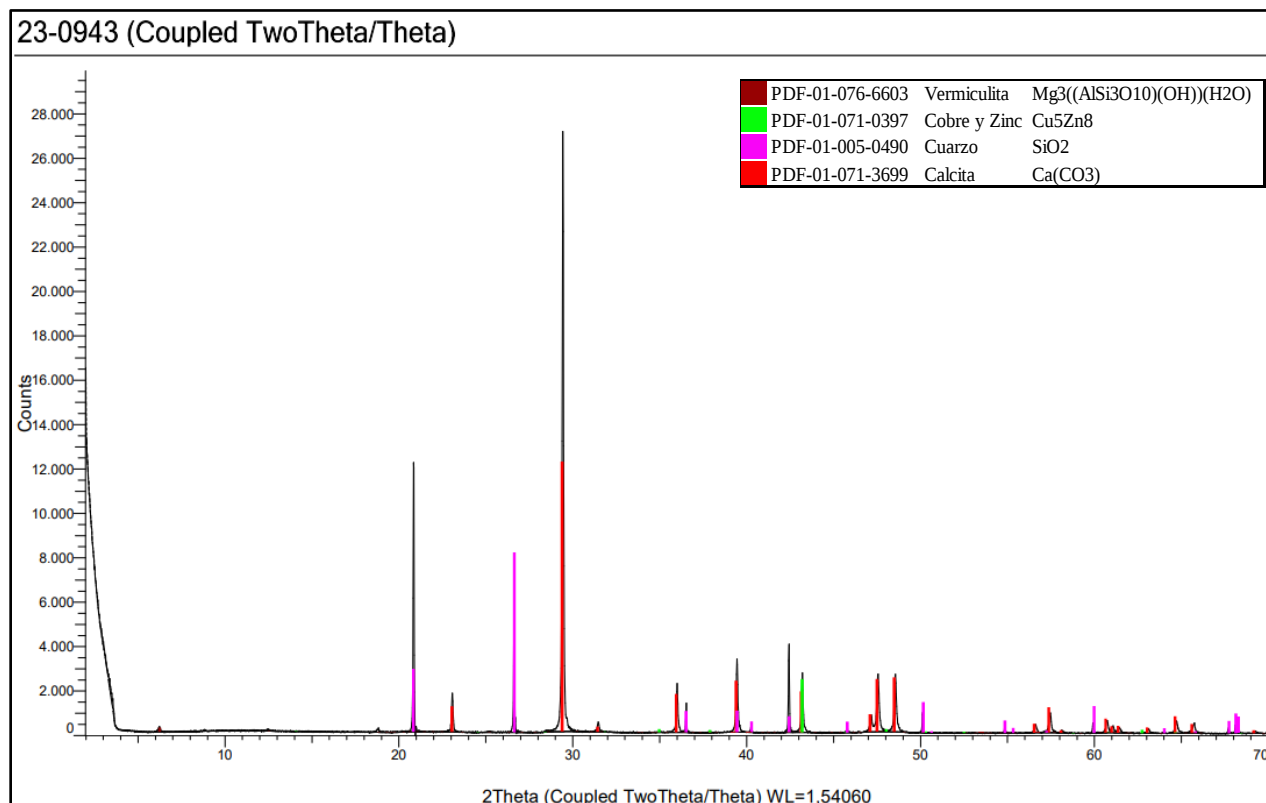


Figura 18

Procesamiento y análisis del difractograma IACP-001-02, mostrando los distintos minerales reconocidos

**Tabla 9**

Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-001-02

Color	ID	Mineral	Fórmula	Concentración	Similitud en Y	Sistema Cristalino
	PDF-01-076-6603	Vermiculita	$Mg_3((AlSi_3O_{10})(OH))(H_2O)$	Traza	0,1%	Monoclínico
	PDF-01-071-0397	Cobre y Zinc	Cu_5Zn_8	Mayor	5,4%	Cúbico
	PDF-01-005-0490	Cuarzo	SiO_2	Mayor	35,3%	Hexagonal
	PDF-01-071-3699	Calcita	$Ca(CO_3)$	Menor	59,1%	Romboédrico

8.3.3. Muestra IACP-005-01**Figura 19**

Difractograma de la muestra IACP-005-01 (23-0944)

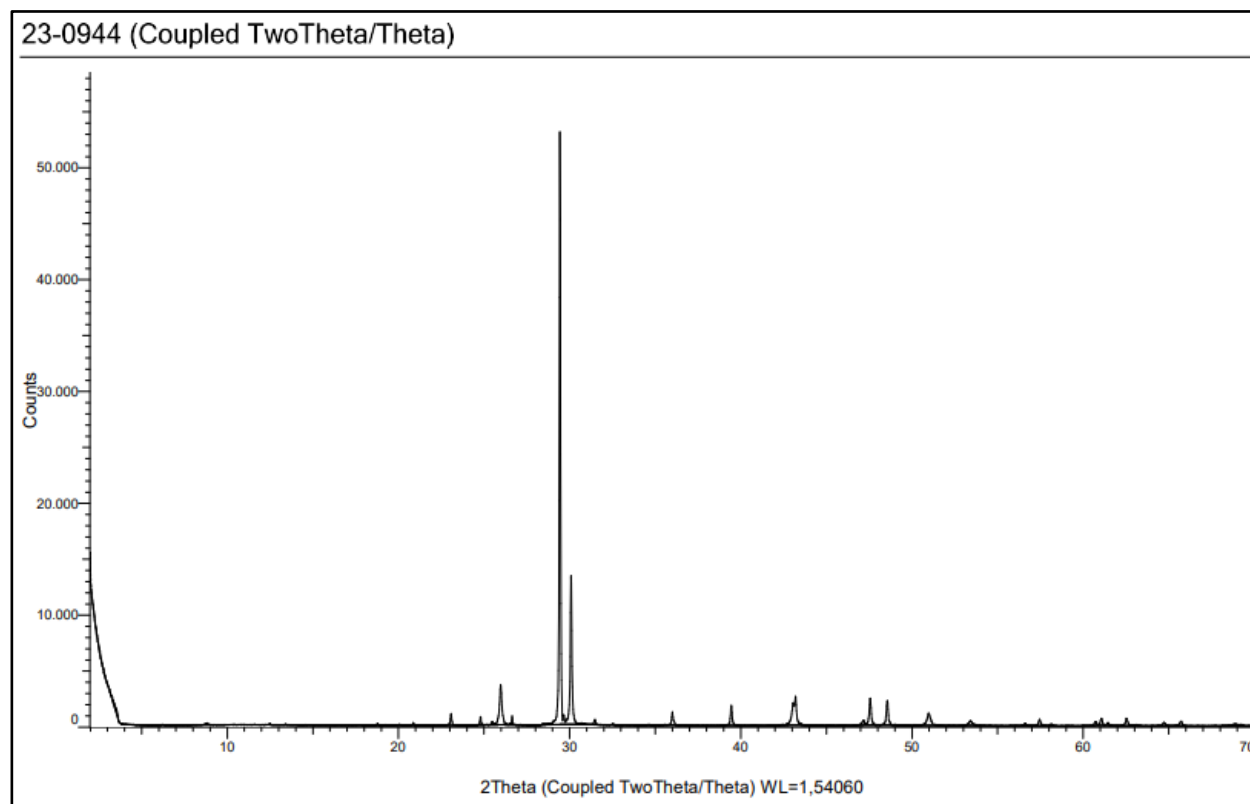


Figura 20

Procesamiento y análisis del difractograma IACP-005-01, mostrando los distintos minerales reconocidos

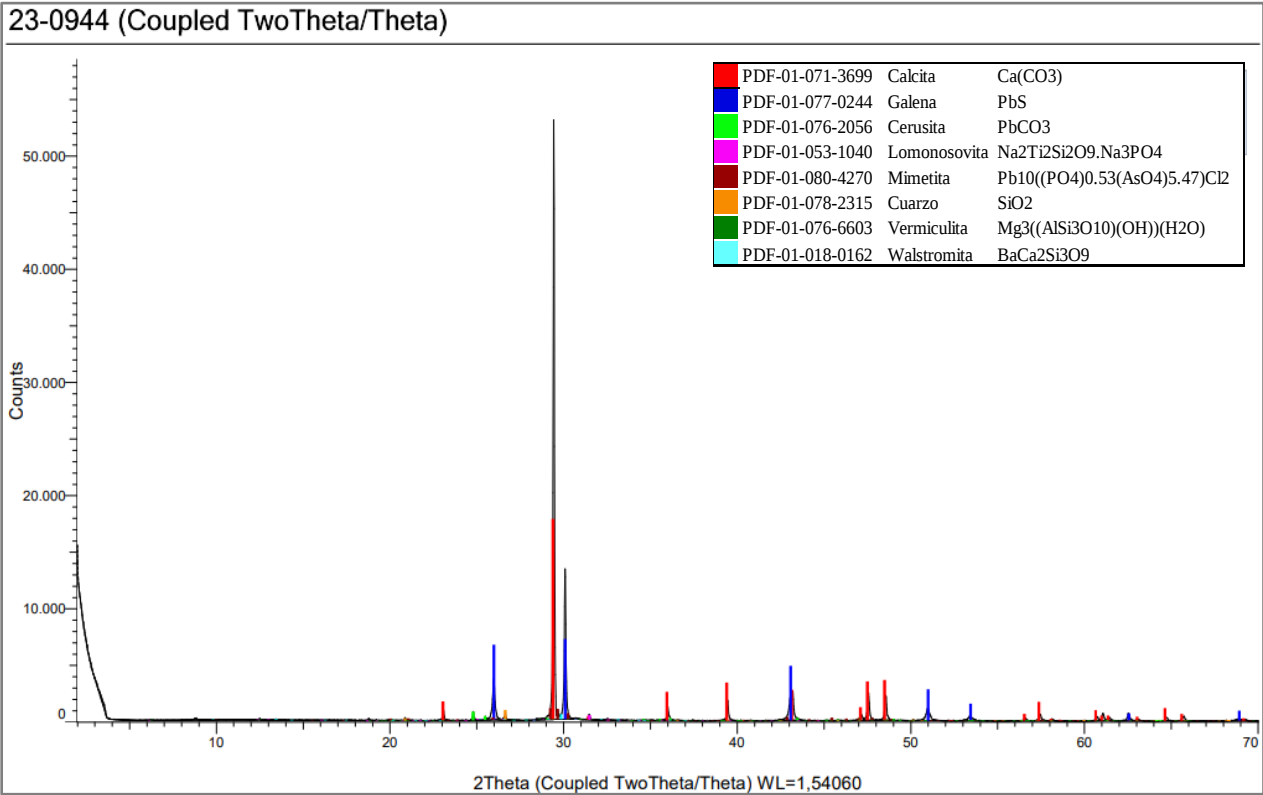


Tabla 10

Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-005-01

Color	ID	Mineral	Fórmula	Concentración	Similitud en Y	Sistema Cristalino
	PDF-01-071-3699	Calcita	Ca(CO3)	Mayor	33,45%	Romboédrico
	PDF-01-077-0244	Galena	PbS	Mayor	13,43%	Cúbico
	PDF-01-076-2056	Cerussita	PbCO3	Mayor	1,44%	Ortorómbico
	PDF-01-053-1040	Lomonosovita	Na2Ti2Si2O9.Na3PO4	Menor	0,81%	Triclinico
	PDF-01-080-4270	Mimetita	Pb10((PO4)0.53(AsO4)5.47)Cl2	Traza	1,87%	Hexagonal
	PDF-01-078-2315	Cuarzo	SiO2	Menor	1,67%	Hexagonal
	PDF-01-076-6603	Vermiculita	Mg3((AlSi3O10)(OH))(H2O)	Traza	0,14%	Monoclínico
	PDF-01-018-0162	Walstromita	BaCa2Si3O9	Menor	0,83%	Triclinico

8.3.4. Muestra IACP-027-02**Figura 21**

Difractograma de la muestra IACP-027-02 (23-0945)

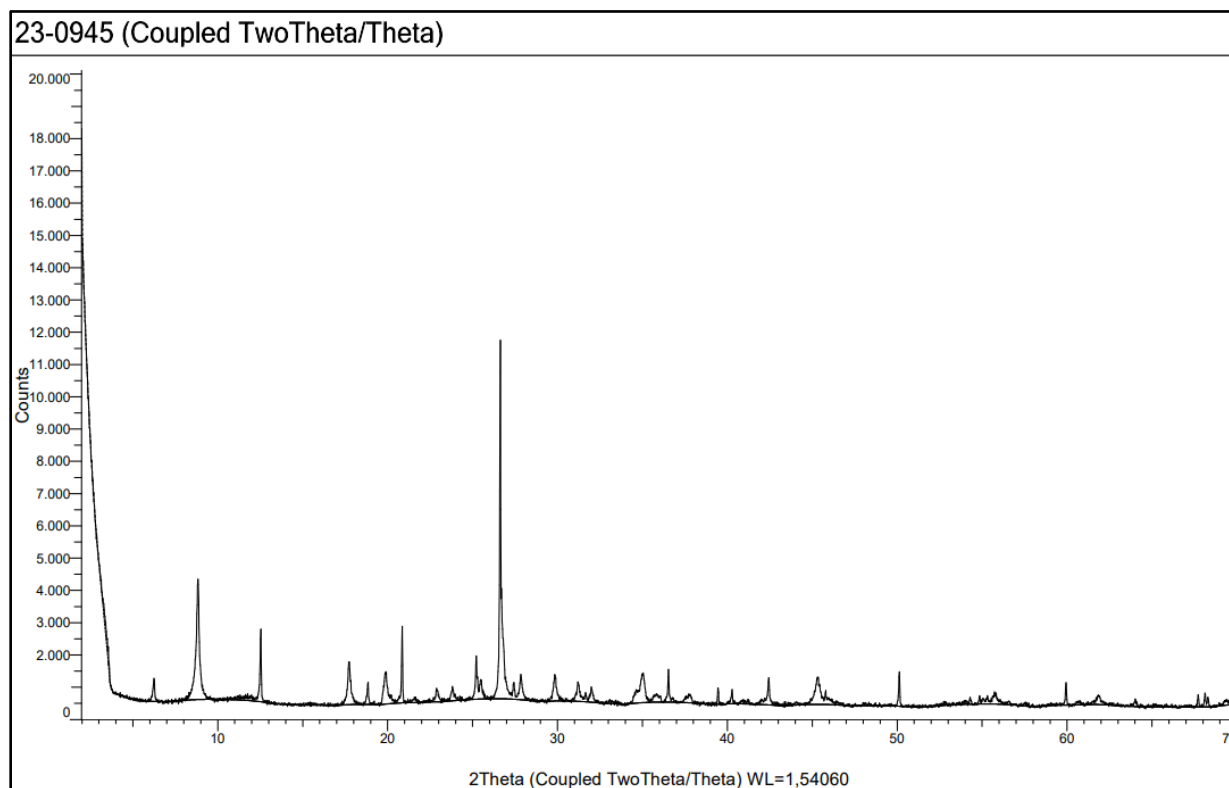


Figura 22

Procesamiento y análisis del difractograma IACP-027-02, mostrando los distintos minerales reconocidos

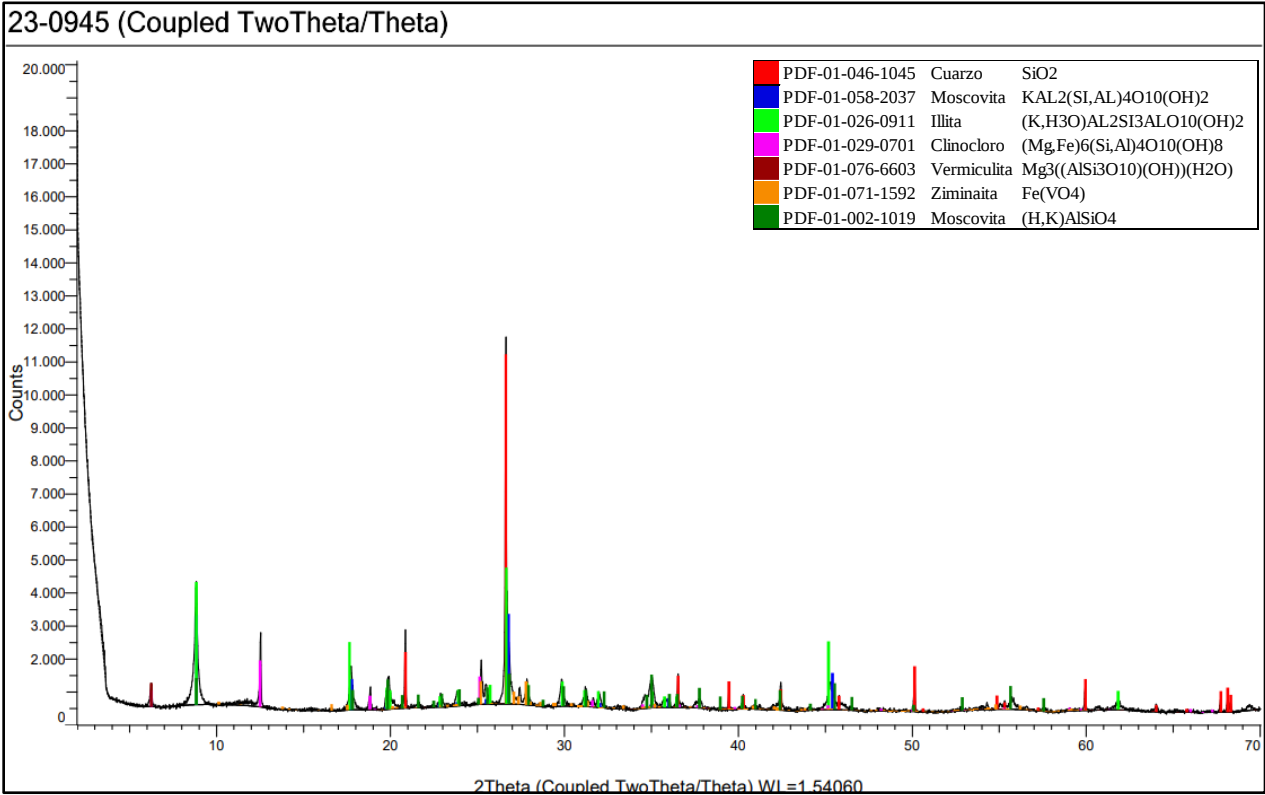


Tabla 11

Resumen del procesamiento de los picos de intensidad del difractograma de la muestra IACP-027-02

Color	ID	Mineral	Fórmula	Concentración	Similitud en Y	Sistema Cristalino
	PDF-01-046-1045	Cuarzo	SiO2	Mayor	95,28%	Hexagonal
	PDF-01-058-2037	Moscovita	KAL2(SI,AL)4O10(OH)2	Mayor	24,59%	Monoclínico
	PDF-01-026-0911	Illita	(K,H3O)AL2SI3ALO10(OH)2	Mayor	37,17%	Monoclínico
	PDF-01-029-0701	Clinocloro	(Mg,Fe)6(Si,Al)4O10(OH)8	Menor	12,68%	Monoclínico
	PDF-01-076-6603	Vermiculita	Mg3((AlSi3O10)(OH))(H2O)	Traza	6,45%	Monoclínico
	PDF-01-071-1592	Ziminaita	Fe(VO4)	Menor	6,41%	Triclinico
	PDF-01-002-1019	Moscovita	(H,K)AlSiO4	Mayor	9,07%	Monoclínico

8.4. Mapas y entregables

En el título HGR-14171 se realizó cartografía geológica de superficie. Se trabajaron dos escalas diferentes (1:15.000 y 1:5.000) y se generaron dos mapas, siguiendo lo estipulado en la legislación colombiana, donde se requiere el cubrimiento mínimo del 20% del título como área de muestreo, de acuerdo con los estándares nacionales (ECRR) e internacionales (NI-43101). En dichos mapas se resalta la geología regional y local, las principales estructuras que afectan la zona, las estaciones realizadas en la fase de campo y los principales puntos de mineralización encontrados.

A continuación, se presentarán los mapas realizados durante la fase de post-campo:

Figura 23

Mapa geológico escala 1:15.000 del área del título minero HGR-14171

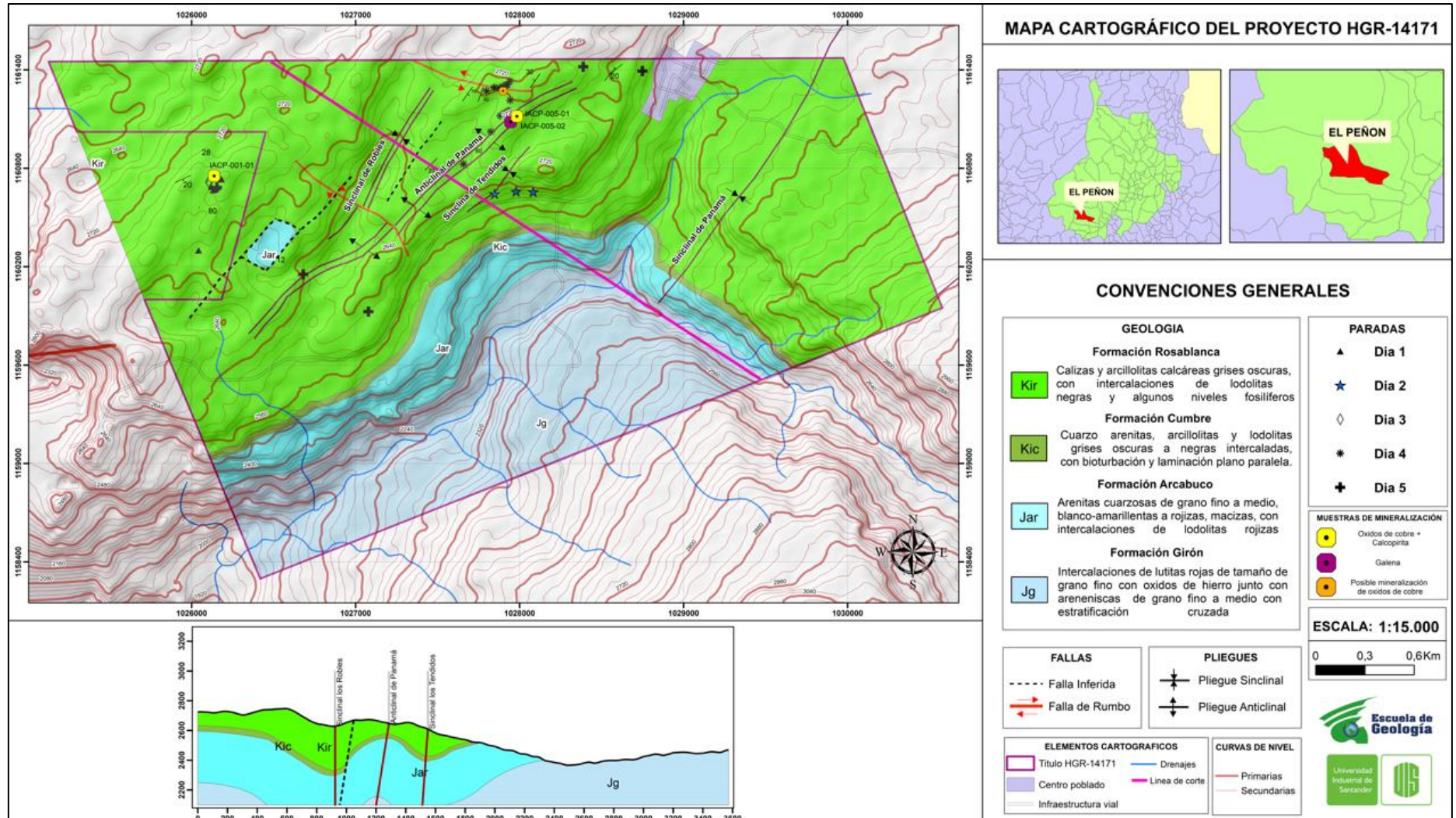
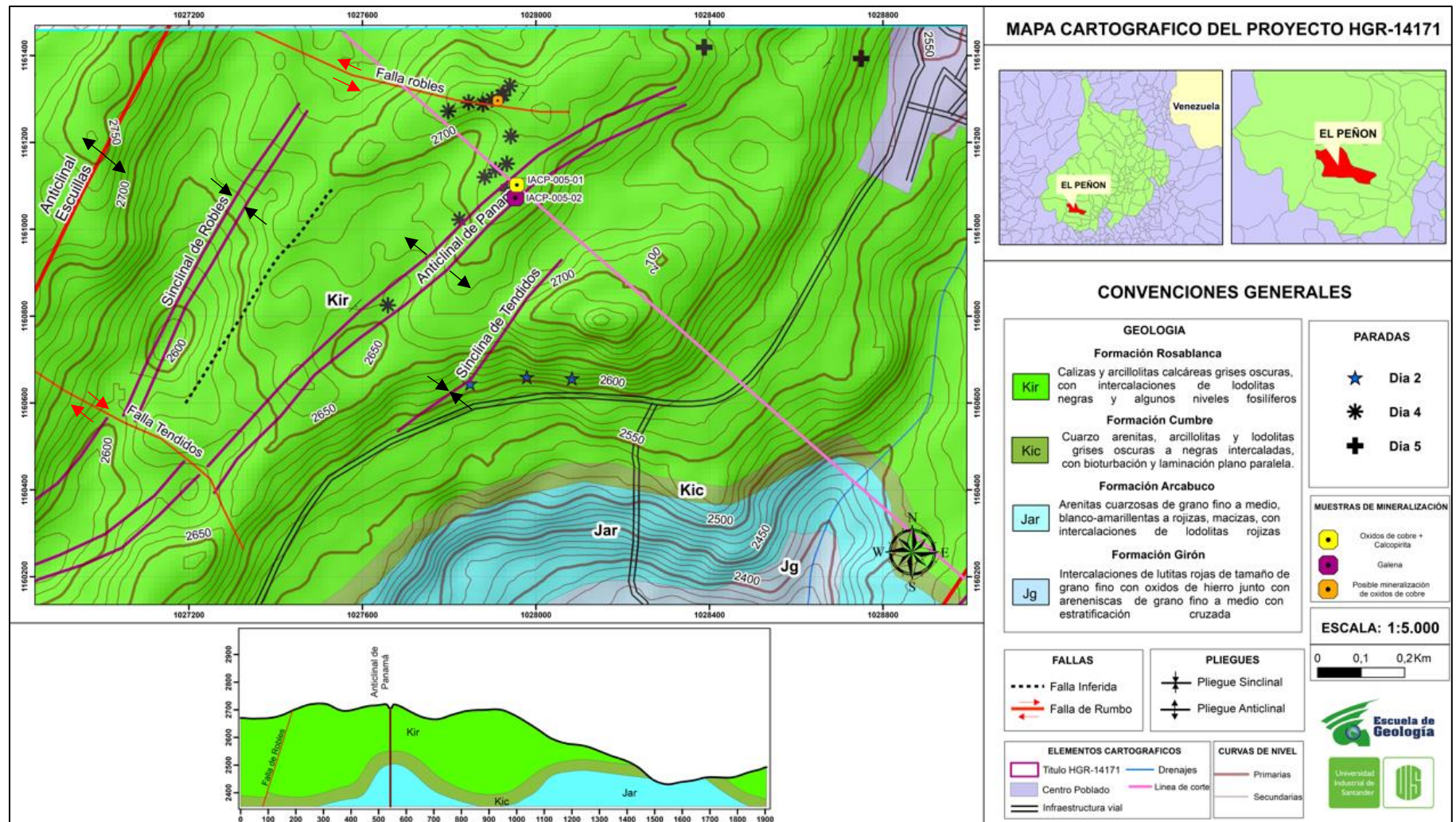


Figura 24

Mapa geológico escala 1:5.000 del área del título minero HGR-1417



Nota: Sistema de coordenadas- MAGNA Colombia Bogota (3116)

9. Discusión

En la mineralización ubicada en brechas, perteneciente a la estación IACP-001, es posible observar la existencia al menos 2 eventos mineralógicos. Se estima que este proceso comenzó por el desarrollo de una brecha de colapso por disolución, lo que permitió la formación de espacios de acumulación posteriores a un plegamiento o de forma coetánea. Este proceso permitió la generación sincrónica de calcita recristalizada y de cristales de piritita y calcopiritita en una matriz de cuarzo-calcita, a través del transporte de fluidos que se neutralizaron en contacto con los carbonatos de la Formación Rosablanca. También es posible atribuir a este evento la formación de venillas de calcita recristalizada dentro de la roca caja. Finalmente, se da un evento supérgeno donde ocurre la oxidación de estos metales, produciendo cristales de hematita, limonita y remoción del cobre de sus estructuras, el cual, reaccionando con los carbonatos adyacentes, formó los cristales de malaquita.

En la mineralización ubicada en venas recristalizadas, pertenecientes a la estación IACP-005, es posible apreciar que la galena se generó en forma de glóbulos distribuidos a lo largo de la vena, junto con óxidos de hierro diseminados en forma de capas paralelas al contacto con la roca caja. Se puede inferir la influencia de la roca encajante como un agente reductor del fluido que transportaba los metales, y que, en conjunto con la disminución de la temperatura, permitió la precipitación de estos metales en forma de glóbulos de galena y óxidos diseminados con dolomita y cuarzo.

La geología del área del título minero reporta la afectación de procesos que ocurrieron durante el Cretácico. En ese periodo, la zona se encontraba inundada por agua marina debido al evento extensional de tipo backarc, generando la apertura de una cuenca, sobre la cual se depositó la secuencia estratigráfica del Cretácico (Etayo et al, 2020). El evento extensional

genero un graven que pudo haber permitido la percolación y almacenamiento de aguas salinas en las sucesiones del jurásico. Los red beds de la Formación Girón de edad Jurasico-Tardío (Langenheim, 1959), se constituyen como una fuente idónea de metales como el hierro, el cobre, el plomo y el zinc. Adicionalmente, las areniscas de esta formación jurásica contienen la porosidad suficiente para almacenar agua y sus condiciones litogeoquímicas permitirían mantenerla en condiciones oxidadas, lo cual beneficiaria la solubilidad de los metales mencionados.

Estratigráficamente la Formación Rosablanca se encuentra alrededor de 400 m con respecto a la Formación Girón. Dinámicas compresionales generadas en diferentes periodos del cenozoico (Paleoceno y Eoceno), generaron la formación de pliegues y estructuras (tales como fracturas y brechas de colapso), permitiendo la removilización, el transporte y la posterior depositación de minerales epigenéticos a través de estructuras ubicadas en las charnelas de anticlinales. Los minerales como la pirita, la calcopirita y la galena, precipitan a partir de un frente de reducción causado por el H₂S generado por la reducción termoquímica de sulfatos provenientes de la Formación Rosablanca. Finalmente, por acción supérgena y oxidación de metales, principalmente de calcopirita, se formaron minerales oxidados como hematita rodeados de limonita y malaquita.

10. Conclusiones

Las actividades geológicas realizadas sobre título HGR-14171, permitieron cumplir con la realización de actividades de apoyo para la etapa de exploración superficial necesaria en el Plan de Trabajo y Obras (PTO).

Se logró demarcar puntos con ocurrencias minerales, donde se realizó la respectiva recolección y caracterización de muestras de afloramientos, apiques y trincheras.

Mediante el uso de técnicas de laboratorio, tales como difracción de rayos X, petrografía macroscópica y microscópica, se lograron analizar y determinar los minerales presentes en los puntos de interés permitiendo identificar mineralizaciones como malaquita, calcopirita y óxidos de hierro hospedados en brechas calcáreas, y la aparición de galena, cerusita y óxidos de hierro diseminados en venas recristalizadas de calcita y dolomita.

El desarrollo de la etapa de exploración superficial permitió la elaboración de mapas geológicos de superficie a escala 1:15.000 y 1:5.000, donde se resaltan los principales aspectos de la geología local: estructuras, litologías, puntos de interés y puntos de posible mineralización.

Referencias Bibliográficas

Acuerdo 004 de 2018 [Concejo Municipal El Peñón]. Por el cual se dictan medidas para la defensa del patrimonio ecológico y cultural del municipio de El Peñón Santander y se adoptan otras determinaciones. 28 de marzo de 2018. Recuperado de: https://elpenonsantander.micolombiadigital.gov.co/sites/elpenonsantander/content/files/000063/3134_acuerdo-004-de-2018ilovepdfcompressed.pdf

Aparicio, M. & Carbajal, G. (2010). Utilidad de la difracción de los rayos X en las nanociencias. *Mundo Nano*, 3, 2-7. Centro de Nanociencias y Nanotecnología. Universidad Nacional Autónoma de México

Cediel, F. (1968). El grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 16(1-3), 5–96. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol16.1-3.1968.108>

Cox, D. P., Lindsey, D. A., Singer, D. A., & Diggles, M. F. (2007). Sediment-hosted copper deposits of the world: Deposit models and database (pp. 03-107). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.

Editora general. (26 de abril de 2018). En El Peñón no permitirán que la minería destruya su territorio. *Colombia INFORMA*. Recuperado el 7 de mayo de 2023 en: <https://www.colombiainforma.info/en-el-penon-no-permitiran-que-la-mineria-destruya-su-territorio/#:~:text=El%20Pe%C3%B1%C3%B3n%20se%20convirti%C3%B3%20en,de%20hidrocarburos%20y%20las%20actividades>

Etayo-Serna, F., Arenas, D. M., Sánchez, G. M., Melo, R. T., & Ospitia, G. G. (2020). Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena.

Friedman, G.M. Dissolution-collapse breccias and paleokarst resulting from dissolution of evaporite rocks, especially sulfates. *Carbonates Evaporites* 12, 53–63 (1997). <https://doi.org/10.1007/BF03175802>

Galvis, N., Rubiano, J., 1985, Redefinición estratigráfica de La Formación Arcabuco con base en el análisis facial, In: Proyecto Cretácico, Etayo Serna y Laverde F., editores, Publ. Geol. Esp. 16, VII 1-16, Ingeominas, Bogotá.

Gelvez-Chaparro, J.; Barajas-Rangel, D. (2019). Geoespeleología y Geoturismo en Cavernas de El Peñón (Santander): Conocimiento y alternativas para la Geoconservación de Sistemas Kársticos.

Gelvez-Chaparro, J.; Barajas-Rangel, D.; Herrera-Ruiz, J.; Ríos-Reyes, C.A. (2020). Introducción al Geopatrimonio kárstico del municipio de El Peñón (Santander), Colombia. *Boletín de Geología*, 42(2), 147-167. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020008.

Ghazi, A. M., & Millette, J. R. (2006). Lead. *Environmental Forensics*, 55–80. doi:10.1016/b978-012507751-4/50026-4

Gómez, Lancheros, López, Patiño, Beltrán, Renzoni, Guerra & Quintero. (2008). Cartografía geológica y muestreo geoquímico escala 1:100.000 de la plancha 150, Cimitarra. Valle Medio del Magdalena. INGEOMINAS.

Gómez, P. J. A. (1977). Fotogeología de la zona Barbosa – Landazuri. *Boletín de Geología, UIS, Vol.2, No. 25*, pp. 99 – 106.

Hettner, A. (1892). Die Kordillere von Bogotá: Ergebnisse von Reisen und Studien. A. Petermann's Mitteilungen aus Justus Perthes' Geographischer Anstalt/Ergänzungsheft, 104.

Hitzman, M. W., Selley, D., & Bull, S. (2010). Formation of Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits through Earth History. *Economic Geology*, 105(3), 627–639. doi:10.2113/gsecongeo.105.3.627

Horne, R. J and Jodrey, M. (2001). Geology of the Dufferin Gold Deposit (NTS 11D/16), Halifax County. Report of Activities. Department of Geology, Acadia University, Wolfville, Nova Scotia. BOP 1X0.

Hubach, E. (1953). Condiciones geológicas de las variantes de carretera en la región de Arcabuco-Barbosa-Oiba (Santander-Boyacá). Servicio Geológico Nacional Informe 0952, Ingeominas, Bogotá.

Hubach, E. (1957). Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. *Inst. Geol. Nal., Informe*, 1212, 166.

Julivert, M. (1958). La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.). *Boletín De Geología*, (1), 7–43. Recuperado a partir de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3994>

Langenheim, R. L. (1959). Preliminary report on the stratigraphy of the Giron formation in Santander and Boyaca. *Boletín De Geología*, (3), 35–50. Recuperado a partir de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4002>

Leach, D. L., Taylor, R. D., Fey, D. L., Diehl, S. F., & Saltus, R. W. (2010). A deposit model for Mississippi Valley-type lead-zinc ores. Chapter A of mineral deposit models for resource assessment: USGS, Scientific Investigations Report. <https://doi.org/10.3133/sir20105070A>

Leañez, F. (2022). “Intensidad de materiales en la transición energética de América Latina: estimaciones sobre la base de un escenario de integración energética de América del Sur”, Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/46), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Lillo, J. Oyarzun, R. (2013). Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera. Ediciones GEMM.

Lizcano, M. F. (31 de octubre de 2016). Un tesoro natural de Santander amenazado por la minería. *Revista Semana*. <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/el-penon-un-tesoro-escondido-en-santander-en-peligro-por-la-mineria/36388/>

Loucks, R. G. (2007). A review of coalesced, collapsed-paleocave systems and associated suprastratal deformation. *Acta carsologica*, 36(1).

Mantilla-Figueroa, L. C.; Cruz G. L. E; Colegial G. J. D., (2003). Introducción a la Geología del sector Vélez-Bolívar-Guavatá (Dpto. De Santander, Colombia) y su importancia para la exploración de depósitos hidrotermales. *Boletín de Geología* Vol. 25, No. 40.

Maynard, J.B. (1983). *Geochemistry of sedimentary ore deposits*. New York: Springer. p.p. 64, 182

Morales, L.G. (1958). *General Geology and Oil Occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: South America*.

Navas G., J. (1963). Estudio Estratigráfico del Girón al W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín De Geología*, (12), 19–33. Recuperado a partir de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/5652>

Pulido, O. (1976). Reconocimiento Geológico y prospección geoquímica para cobre en el municipio de Bolívar – Santander. Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Mineras. Oficina Regional de Bucaramanga. Ministerio de Minas y Energía.

Renzoni, G., (1981), Geología del Cuadrángulo J-12 Tunja, *Bol. Geol.*, v. 24 No 2: 31-48, Ingeominas, Bogotá.

Rey, O. (1 de noviembre de 2017). Registraduría pidió suspender consulta popular en El Peñón. *Vanguardia Liberal*. <https://www.vanguardia.com/politica/registraduria-pidio-suspender-consulta-popular-en-el-penon-GGvl414442>

Rose, A. (1976). The effect of cuprous chloride complexes in the origin of red-bed copper and related deposits. *Economic Geology*, 71, 1036-1048.

Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado del Departamento de Santander 1: 400.000, Memoria Explicativa.

Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Bogotá: Ingeominas.

Shukla, M. K., & Sharma, A. (2018). A brief review on breccia: it's contrasting origin and diagnostic signatures. *Solid Earth Sciences*, 3(2), 50–59. doi: 10.1016/j.sesci.2018.03.001

Sánchez, M. & Pulido, D. (2023). Análisis estructural e hidrodinámico del sistema kárstico de El Peñón, Santander-Colombia. Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander.

Smirnov, V.I. (1982). Geología de yacimientos minerales. Editorial Mir Moscú.

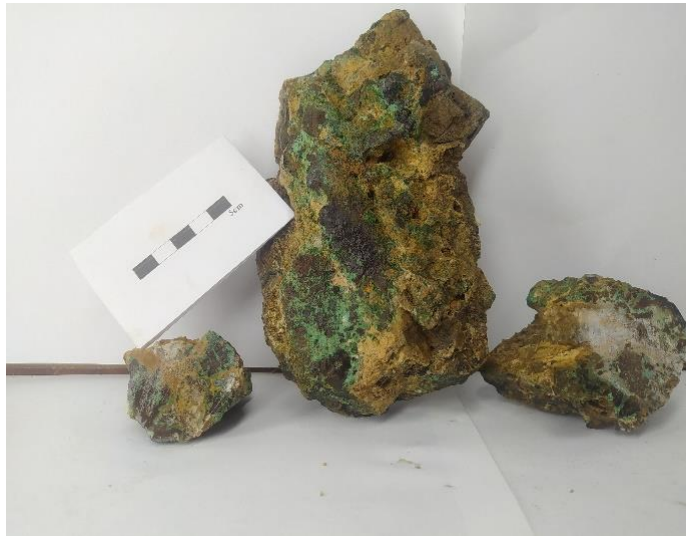
Ulloa, C. & Rodríguez, E. (1979). Geología de las planchas 170, Vélez, 190 Chiquinquirá, Colombia. Ingeominas.

Wilkinson, J. J. (2014). Sediment-Hosted Zinc–Lead Mineralization. *Treatise on Geochemistry*, 219–249. doi:10.1016/b978-0-08-095975-7.01109-8

Apéndices

Apéndice 1

Fotografía de la muestra de mano IACP-001-01.



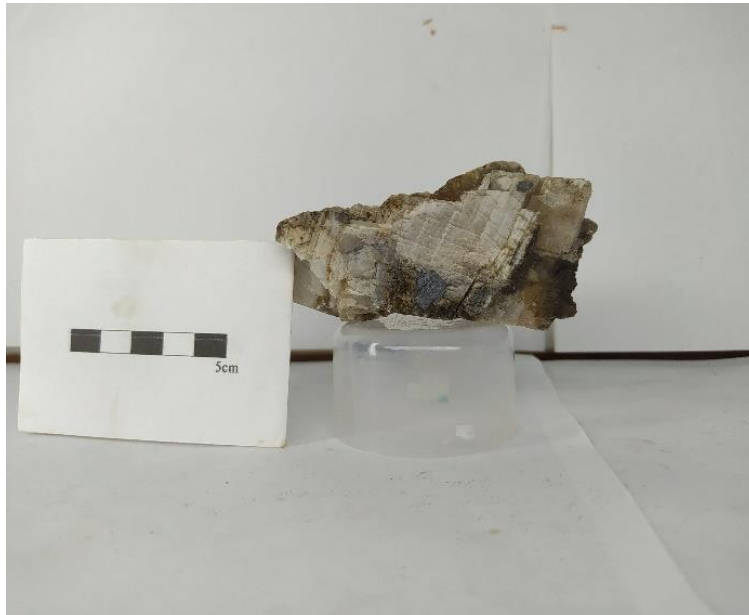
Apéndice 2

Fotografía de la muestra de mano IACP-001-02



Apéndice 3

Fotografía de la muestra de mano IACP-005-01.



Apéndice 4

Fotografía de la muestra de mano IACP-005-02.



Apéndice 5

Fotografía de la muestra de mano IACP-027-01.



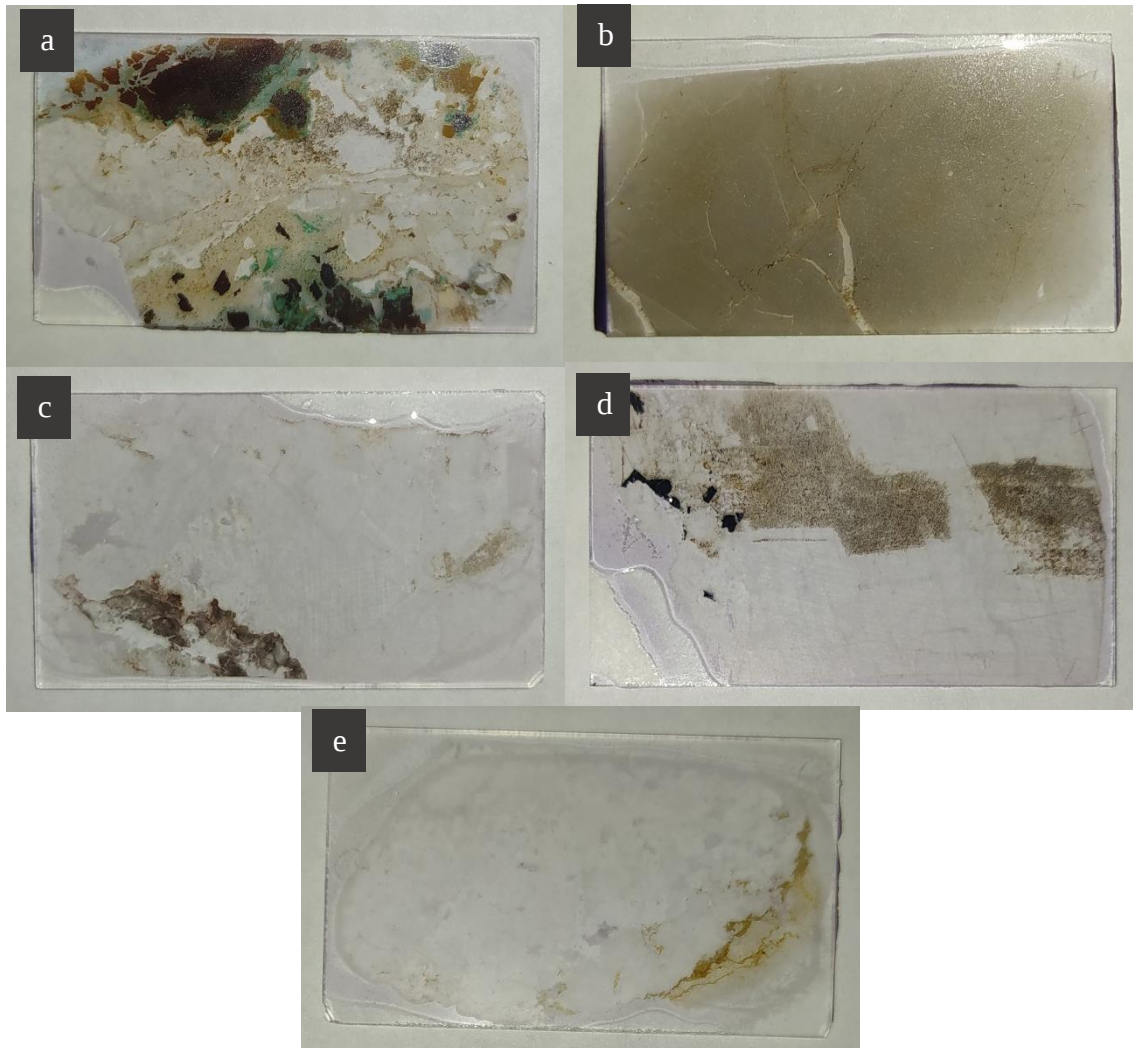
Apéndice 6

Fotografía de la muestra de mano IACP-027-02.



Apéndice 7

Registro fotográfico de las secciones delgadas realizadas.



Nota. a) Sección delgada IACP-001-01 b) Sección delgada IACP- 001-02 c) Sección delgada IACP-005-01 d) Sección delgada IACP-005-02 e) Sección delgada IACP-027-01