

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Estudio y análisis petrográfico y geoquímico de las mineralizaciones cupríferas aflorantes en el
municipio de Curumaní, Cesar

Valentina Durán Mantilla y Ricardo Andrés Durán Rodríguez

Trabajo de Grado para optar por el título de geólogo

Director:

Andrés Mauricio Cáceres Bottia

Geólogo M. Sc Geología aplicada

Codirector:

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Geólogo PhD. Geología Económica

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

2022

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Dedicatoria

Le dedico esta tesis a mis papás que con su gran amor y compañía me ayudaron a sobrellevar cada etapa que viví en la universidad y fueron mi apoyo incondicional en los días buenos y malos que se me presentaron, deseando siempre lo mejor para mí. A mis perritos Doki y Luki que fueron mi fiel soporte emocional, alegrando cada uno de mis días. A mis abuelitas, Cecilia que desde el cielo ha sido un ángel para guiar mi camino y Gladys que desde la tierra es mi gran motor y apoyo. Y a toda mi familia que se alegra por todos mis logros alcanzados y me motiva a ser una mejor persona.

A mis amigos, especialmente Sebastián y Valentina que siempre han confiado en mis capacidades y me impulsan a lograr mis sueños. Finalmente, los quiero con todo mi corazón y les agradezco su aporte y paso en mi vida.

-Valentina

Le dedico esta tesis a mi madre, a esa fuente de amor inmarcesible, que ha puesto mis necesidades como prioridad en cada circunstancia. A mi padre, quien con sus consejos se ha encargado de formar en mí, una persona resiliente. Por y para ellos son cada uno de los logros que alcance durante mi paso por el mundo.

A mi hermano, quien a pesar de ser menor que yo, ha logrado enseñarme la virtud de ser un buen hijo, y por quien hoy, soy mejor persona. A mis abuelos Lino y Quintina, a mis tías Mercedes, Lucila y Nelly, y a cada uno de mis familiares por brindarme su apoyo incondicional.

A mis amigos, especialmente a Brayan, Pipe, Bredman y Miguel, por confiar en mis capacidades e impulsarme a alcanzar cada uno de mis objetivos, a cada uno de los profesores de la escuela de Geología, porque gracias a ellos amo mi carrera, en especial a Andrés Cáceres, quien ha contribuido en gran manera a mi formación profesional. A todos ustedes, muchas gracias.

-Ricardo

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Agradecimientos

Ofrecemos un especial agradecimiento a la Escuela de Geología y todos sus miembros que hicieron parte directa e indirectamente en el desarrollo de este proyecto. A los funcionarios y empleados por su constante ayuda y disponibilidad en todo momento: Cesar Llerena, Rosadilia Carrillo y Martha Blanco. Al profesor Carlos Villareal por su paciencia y colaboración en el laboratorio de Guatiguará. A los directores de escuela Juan Diego Colegial y Carlos Ríos por sus contribuciones significativas en nuestra formación profesional. A todos los docentes que a lo largo de nuestra vida académica aportaron de distintas formas para nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestro director de tesis, Andrés Mauricio Cáceres por brindarnos herramientas y oportunidades para fortalecer nuestros conocimientos y confiar en nuestras habilidades. Por convertirse en un maestro y consejero tanto en el ámbito académico como profesional y personal. A nuestro codirector Luis Carlos Mantilla, por su guía y colaboración que representan un gran ejemplo a seguir para nuestra vida profesional.

Al ingeniero geólogo Benjamín Torres de AMERICAN GEOPHYSICAL GROUP SAS por permitirnos la recolección y análisis de las muestras del proyecto.

Finalmente, a nuestros compañeros, amigos y futuros colegas, por hacer de estos años en la universidad una etapa inolvidable y llena de muchos recuerdos que persistirán por toda nuestra vida.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Tabla de contenido	Pág.
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Localización del área de estudio.....	15
3. Metodología.....	16
Fase 1: Recopilación bibliográfica.....	16
Fase 2: Recolección de muestras.....	16
Fase 3: Análisis de laboratorio.....	16
Fase 4: Análisis de resultados.....	18
Fase 5: Elaboración del documento final.....	18
4. Antecedentes.....	19
4.1 Marco tectónico regional:.....	19
4.2 Evolución geológica de la cuenca:.....	21
4.3 Marco teórico.....	24
5. Marco teórico.....	26
5.1 Estratigrafía:.....	26
5.2 Geología estructural.....	32
6. Resultados.....	35
6.1 Petrografía.....	35
6.1.1 VR 750.....	35
.....	38
6.1.2 VR 751.....	38
6.1.3 VR 752.....	41
6.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	45
6.2.1 VR-750.....	45
6.2.2 VR-751.....	50
6.2.3 VR-752.....	54
6.3 Difracción de rayos X (DRX).....	58
6.3.1 VR-750.....	58

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

6.3.2 VR-751.....	60
6.3.3 VR-752.....	61
6.4 Geoquímica	63
6.4.1 Geoquímica de elementos mayores, menores y traza	63
7. Discusión.....	65
8. Importancia económica del cobre en el mercado internacional.....	77
9. Conclusiones.....	78
10. Recomendaciones.....	79
Referencias bibliográficas	80

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Lista de Tablas	Pág.
Tabla 1: Síntesis de la evolución geológica de la cuenca Cesar-Ranchería (ANH,2007).....	24
Tabla 2: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Hornblenda para la sección VR-750	45
Tabla 3: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Augita para la sección VR-750.46	46
Tabla 4: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Albita para la sección VR-750. 47	47
Tabla 5: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Apatito para la sección VR-750.	47
Tabla 6: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Titanita para la sección VR-750.	48
Tabla 7: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de A) Ilmenita y B) Magnetita para la sección VR-750.....	49
Tabla 8: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Antlerita para la sección VR-751.	51
Tabla 9: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Antlerita para la sección VR-751.	52
Tabla 10: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Sericita para la sección VR-751.	53
Tabla 11: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Microclina para la sección VR-751.	54
Tabla 12: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Clorita para la sección VR-752.	55
Tabla 13: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Antlerita para la sección VR-752.	55
Tabla 14: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Sericita para la sección VR-752.	56
Tabla 15: Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Microclina para la sección VR-752.	57
Tabla 16: Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra VR-750	59

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Tabla 17: Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra VR-751	60
Tabla 18: Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra VR-752	61
Tabla 19: Resultados de elementos mayores en las muestras VR 750, VR 751 y VR 752 de Curumaní.....	63
Tabla 20: Resultados de sobrelímites en la muestra VR 752 de Curumaní	63
Tabla 21: Resultados de elementos menores en las muestras VR 750, VR 751 y VR 752.....	64
Tabla 22: Abundancia promedio de elementos formadores de minerales seleccionados (en ppm) en la corteza continental de la tierra, los principales tipos de rocas y el agua de mar (simplificado de la compilación de Krauskopf y Bird 1995)	70
Tabla 23: Secuencia paragénetica de las rocas mineralizadas VR-751 y VR-752 a partir de las secciones analizadas. Fuente: autores	75

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Ubicación del área de estudio. Modificado de la ANH, 2007	15
Figura 2: Mapa geológico de la zona de estudio y ubicación de las muestras analizadas.	26
Figura 3: Macrofotografías de la muestra VR 750	35
Figura 4: Petrografía óptica de roca ígnea VR 750.....	37
Figura 5: Triángulo de clasificación rocas volcánicas, Streckeinsen (1972)	38
Figura 6: Macrofotografías de la muestra VR 751	39
Figura 7: Petrografía óptica de roca sedimentaria VR 751.	40
Figura 8: Macrofotografías de la muestra VR 752	41
Figura 9: Petrografía óptica de roca sedimentaria VR 752	43
Figura 10: Triángulo de clasificación rocas sedimentarias, Pettijohn, (1975).	44
Figura 11: Triangulo de clasificación textural de rocas sedimentarias, Dickinson (1983).	44
Figura 12: Cristales de Hornblenda y diagramas de elementos.....	45
Figura 13: Cristales de Augita y diagramas de elementos	46
Figura 14: Cristales de Albita y diagramas de elementos	47
Figura 15: Cristales de Apatito y diagramas de elementos	48
Figura 16: Cristales de Titanita y diagramas de elementos.....	49
Figura 17: Cristales de A) Ilmenita y B) Magnetita y diagramas de elementos.....	50
Figura 18: Cristales de Antlerita y diagramas de elementos	51
Figura 19: Cristales de Calcosiderita y diagramas de elementos.....	52
Figura 20: Cristales de Sericita y diagramas de elementos	53
Figura 21: Cristales de Microclina y diagramas de elementos	54
Figura 22: Cristales de Clorita y diagramas de elementos	55
Figura 23: Cristales de Antlerita y diagramas de elementos	56
Figura 24: Cristales de Sericita y diagramas de elementos	56
Figura 25: Cristales de Microclina y diagramas de elementos	57
Figura 26: Difractograma de la muestra VR-750	59
Figura 27: Análisis cuantitativo de la muestra VR-750	59
Figura 28: Difractograma de la muestra VR-751	60
Figura 29: Análisis cuantitativo de la muestra VR-751	61
Figura 30: Difractograma de la muestra VR-752	62

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 31: Análisis cuantitativo de la muestra VR-752	62
Figura 32: Contacto entre areniscas y basalto de la Fm Noreán.....	66
Figura 33: Capas rojizas de fm Noreán en contacto con fm Rio Negro.....	67
Figura 34: Frente REDOX con mineralización de cobre en la fm Rio Negro.....	68
Figura 35: Formación de basaltos de la Fm Noreán durante el Jurásico. Fuente: autores	69
Figura 36: Depositación de la secuencia marina de la cuenca Cesar-Ranchería (Cretácico)....	71
Figura 37: Aporte de salinidad al sistema durante el Neógeno.	72
Figura 38: Funcionamiento del sistema REDOX para la precipitación de metales.....	73
Figura 39: Diagramas de estabilidad de óxidos de cobre. a) Diagrama pH-Eh del sistema Cu-O-H-S-Fe a 25°C y 1 atm. b) Diagrama pH-Eh del sistema Cu-O-H-S-Cl a 25°C con $\Sigma S=10^{-4}$ m y Cl=0,5 M (Rose, 1976).....	74

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Resumen

Título: Estudio y análisis petrográfico y geoquímico de las mineralizaciones cupríferas aflorantes en el municipio de Curumaní, Cesar*

Autores: Valentina Durán Mantilla; Ricardo Andrés Durán Rodríguez**¹

Palabras clave: Cobre, minería, yacimientos, mineralización, geoquímica.

Descripción: En el municipio de Curumaní, ubicado al sur de la cuenca cesar ranchería, se encontraron enriquecimientos notables de cobre sobre el contacto entre una unidad ígnea (Fm Noreán) y la secuencia sedimentaria del Cretácico (Fm Rio Negro), alcanzando concentraciones de 2.38% de Cu. Los resultados demuestran que el cobre proviene de los minerales opacos embebidos en los basaltos de la formación Noreán. Bajo condiciones oxidantes y gracias a la presencia del Cl obtenido a partir del lavado de rocas neógenas se hizo posible la liberación del cobre y su eventual transporte en forma de complejos clorurados. La discordancia angular entre las formaciones Noreán y Rio negro, configuró la trampa para la precipitación primaria, al poner en contacto, capas de materia orgánica que reducen la valencia del elemento. La mineralización reportada se compone de cristales de antlerita, brochantita y calcosiderita y se distribuye a través de los poros de las arcillas de la formación Rionegro, pues es una concentración de minerales secundarios que fueron removilizados por aguas meteóricas, en épocas más recientes, bajo condiciones de Eh elevado.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Programa académico. Director: Andrés Mauricio Cáceres Bottia. Geólogo M. Sc Geología aplicada. Codirector: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Geólogo PhD. Geología Económica

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Abstract

Title: Petrographic and geochemical study and analysis of the outflowering copper mineralization in the municipality of Curumaní, Cesar*

Authors: Valentina Durán Mantilla; Ricardo Andrés Durán Rodríguez**2

Keywords: Copper, mining, deposit, mineralization, geochemistry.

Description: In the municipality of Curumaní, located to the south of the Cesar Ranchería basin, notable copper enrichments were found on the contact between an igneous unit (Noreán Fm) and the Cretaceous sedimentary sequence (Rio Negro Fm), reaching concentrations of 2.38% of Cu. The results show that the copper comes from the opaque minerals embedded in the basalts of the Noreán formation. Under oxidizing conditions and thanks to the presence of Cl obtained from the washing of neogene rocks, the release of copper and its eventual transport in the form of chloride complexes became possible. The angular unconformity between the Noreán and Rio Negro formations configured the trap for primary precipitation, by putting layers of organic matter in contact that reduce the valence of the element. The reported mineralization is composed of crystals of antlerite, brochantite and chalcocite and is distributed through the pores of the arkoses of the Rionegro formation, since it is a concentration of secondary minerals that were remobilized by meteoric waters, in more recent times, under conditions of Eh elevated.

*Degree work

**Faculty of Physical Chemistry. School of Geology. Academic program. Director: Andrés Mauricio Cáceres Bottia. Geologist M. Sc Applied Geology. Co-director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Geologist Ph.D. Economic Geology

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Introducción

Hoy en día, la sociedad se encuentra transformando sus ideales en busca de crear una relación mucho más sostenible con el medio ambiente. Para lograr este objetivo se ha hecho necesario implementar materiales como el cobre, ya que posee propiedades químicas, físicas y estéticas que le dan una amplia gama de aplicaciones domésticas, industriales y de alta tecnología, además de representar un pilar esencial en la industria energética al ser 100% reciclable. Debido a esto, el metal ha venido presentando un crecimiento en los últimos años que podría generar unas condiciones de mercado óptimas para impulsar la producción y la exploración de nuevos yacimientos cupríferos en Colombia (UPME, 2019).

De acuerdo a este panorama, el Servicio Geológico Colombiano ha establecido que el país posee ambientes geológicos favorables para la existencia de depósitos de cobre, principalmente en los departamentos de Córdoba, Chocó, Nariño, Antioquia y la región nororiental del país, al igual que en los departamentos de La Guajira y Cesar. Sumado a esto, el balance nacional minero presentado por la Unidad de Planeación Minero Energética para el mineral de cobre muestra una tendencia creciente en la producción desde 2014 hasta 2016. Por estas razones, para marzo del 2021, la Agencia Nacional de Minería (ANM) de Colombia lanzó la primera Ronda de Cobre, una subasta de cuatro áreas totalmente nuevas con potencial de este elemento en ambientes sedimentarios en Cesar y la Guajira, que busca atraer a los principales productores de cobre del mundo (Harris, P, 2021).

La cuenca Cesar-Ranchería ubicada en el NE del territorio colombiano a lo largo del cinturón andino, que es catalogado como el cinturón productor de cobre más grande del mundo, ha presentado muy pocos estudios a pesar de su gran potencial. Dentro de estos, el Servicio Geológico de Colombia solo ha proporcionado información sobre un polígono y un muestreo geoquímico básico que fue presentado en los datos de la Ronda de Cobre propuesta por la ANM. No obstante, los estudios más detallados que se han desarrollado en la zona han sido realizados desde el 2020 por parte de compañías extranjeras que hallaron similitudes entre el área de estudio y la cuenca de Kupferschiefer en Polonia, concluyendo que se trata de una mineralización de cobre y plata alojada en zonas de falla y brecha que se encuentran justo debajo de la cuenca sedimentaria dentro de una unidad metavolcánica, la cual presentó hacia el norte valores de

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

34,4% de cobre + 305 g / t de plata en un horizonte continuo de 0,5 metros y hacia el sur valores destacados de 5.8% de cobre + 80 g / t de plata en intervalos de horizonte de 0.1 a 25 metros (Max resource, (s.f)).

En el presente estudio, se realizarán análisis petrográficos y geoquímicos para lograr analizar las muestras correspondientes al cuerpo mineralizado y hallar las condiciones bajo las cuales se formó el depósito, todo esto con el fin de determinar el tipo de yacimiento mineral que se desarrolla sobre los sedimentos de Curumaní, su génesis, mineralogía, y geoquímica.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

- Determinar mediante estudios petrográficos y análisis geoquímicos el estilo de mineralización correspondiente al enriquecimiento de cobre en el sistema sedimentario del municipio de Curumaní

1.2 Objetivos específicos

- Analizar las características petrográficas de las muestras recolectadas en el municipio de Curumaní, para definir así su mineralogía y poder establecer sus relaciones paragenéticas.
- Realizar estudios petrográficos avanzados, incluyendo difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido (SEM) con el fin de identificar correctamente todas las fases minerales presentes en las muestras.
- Examinar el contexto geológico del municipio de Curumaní para ser comparado con los resultados litogeoquímicos y petrográficos obtenidos.
- Determinar si el enriquecimiento de cobre de Curumaní corresponde a algún modelo de mineralización reconocido a nivel mundial.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

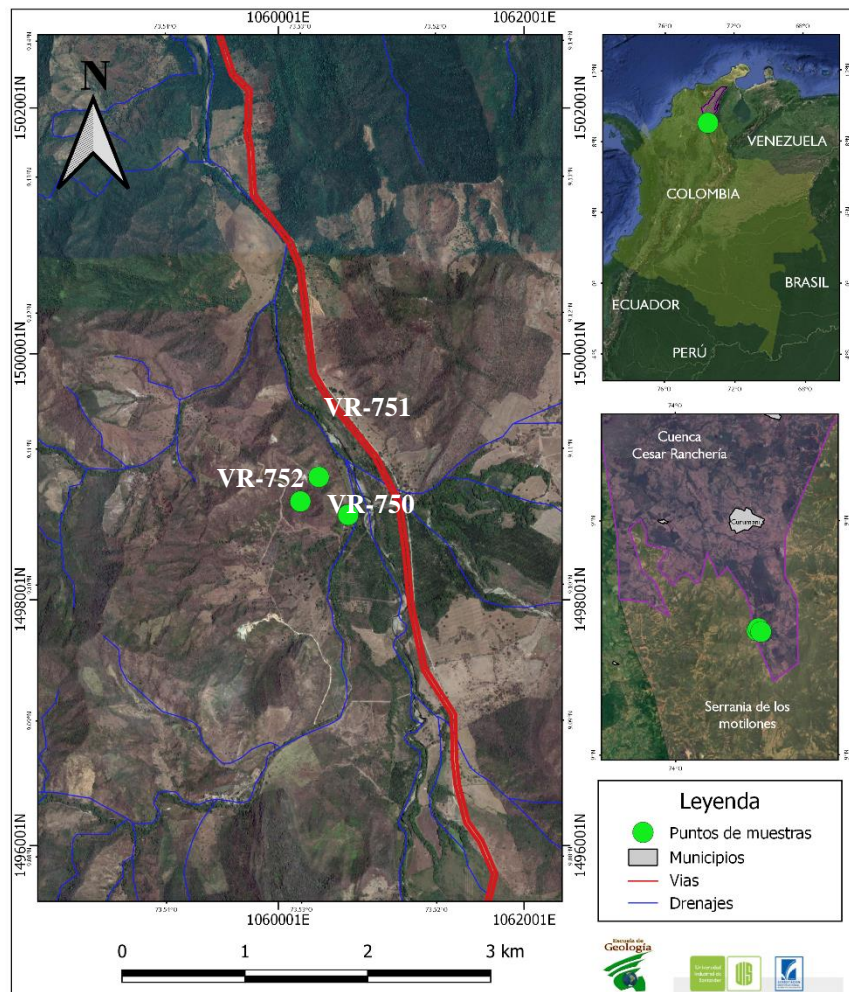
2. Localización del área de estudio

La cuenca Cesar-Ranchería es una depresión topográfica asimétrica y alargada que se orienta en dirección N30°E y se localiza al NE de Colombia entre la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá. Cubre un área aproximada de 11.630km², incluyendo parcialmente los Departamentos de Cesar y de La Guajira. Está limitada al Norte por la Falla de Oca, al Este por la Falla Cerrejón, al Suroeste por el Sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta y al Noroeste por la Sierra Nevada de Santa Marta.

Aunque el área de estudio se encuentra dentro de esta cuenca, se ubica en las inmediaciones de la serranía de los motilones; nombre que recibe la serranía del Perijá en su extremo sur. Las muestras fueron tomadas en la vereda Andes, específicamente a 10.8 km con azimuth 170 del centro urbano de Curumaní, y recibieron el nombre de VR-750, VR-751 y VR-752.

Figura 1:

Ubicación del área de estudio. Modificado de la ANH, 2007



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

3. Metodología

La elaboración del trabajo de grado se llevará a cabo en cinco fases que permitirán el desarrollo de los objetivos propuestos y su correcto cumplimiento. Para ello, es necesario comenzar con la recopilación bibliográfica sobre la zona y los depósitos de cobre, seguida de la recolección de muestras en los puntos establecidos con su posterior tratamiento y análisis de laboratorio. Luego, se estudiarán los resultados obtenidos y se concluirá con la elaboración del documento final en donde se presentarán todos los datos y sus respectivos resultados. Cada una de estas fases serán descritas detalladamente a continuación:

Fase 1: Recopilación bibliográfica

Durante esta fase se recopilará toda la información correspondiente con los principales depósitos de cobre, con el fin de entender su funcionamiento, ambiente de formación y demás condiciones que permiten su ocurrencia en diversas partes del mundo. Además, se investigará acerca de estudios previamente desarrollados en la zona y que estén relacionados con los depósitos de cobre, al igual que trabajos realizados en la cuenca Cesar-Ranchería y el municipio de Curumaní que permitan establecer un marco geológico del área de estudio en donde se expongan las características estratigráficas y estructurales más relevantes que aportaran al entendimiento de las mineralizaciones encontradas.

Fase 2: Recolección de muestras

A raíz de la situación vivida mundialmente por causa de la pandemia del COVID-19, la recolección de muestras de este trabajo fue realizada por el director de la tesis en abril de 2021 con base en los puntos de interés identificados. En este trabajo de campo fueron recolectadas aproximadamente 10 muestras pertenecientes al SW de la cuenca Cesar-Ranchería, sin embargo, solo 3 muestras del municipio de Curumaní fueron seleccionadas para el desarrollo del proyecto.

Fase 3: Análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio realizados en el presente trabajo están relacionados con petrografía y geoquímica, y se llevaron a cabo en laboratorios especializados. Cada uno de los análisis a realizar se desarrollaron en diferentes etapas, las cuales serán descritas a detalle a continuación:

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

- 1) La primera de estas etapas comprende la descripción de las muestras recolectadas a nivel de muestra de mano, en la cual se implementarán lupas con diferentes aumentos que permitan obtener un primer acercamiento con la mineralogía de las muestras recolectadas. Posteriormente, para la etapa de microscopía óptica se hará uso del laboratorio especializado de petrografía de la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander, implementando el microscopio de luz transmitida marca Nikon Eclipse E200 50/POL y el microscopio de luz reflejada; esta etapa tiene como fin estudiar las especies minerales encontradas en las secciones delgadas, incluyendo aquellas transparentes, translúcidas y opacas.

- 2) La segunda etapa estará relacionada con los estudios de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X, que serán desarrollados en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander para lograr caracterizar a mayor detalle la mineralogía que no se observó satisfactoriamente en microscopía óptica.
Para el SEM se escogieron puntos de interés sobre cada una de las 3 secciones delgadas (VR-750, VR-751 y VR-752) para analizarlos puntualmente con el Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650, colocándolas sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de cobre y recubiertas con oro. Las imágenes fueron obtenidas gracias a detectores de electrones secundarios y retrodispersados, Everhart Thornley detector ETD y Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD, respectivamente. Por su parte, el análisis químico EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy) y la información semi-cuantitativa de los elementos químicos se obtuvo gracias al Detector EDAX APOLO X resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) y el Software EDX Genesis.
En cuanto al DRX, se analizaron las muestras como roca entera, a partir de las cuales el laboratorio realizó el registro de datos para su identificación cualitativa de fases minerales por medio del software Diffrac Eva y la base de datos PDF-2 2021 del *International Center for Diffraction Data* (ICDD) y la identificación cuantitativa de fases minerales por medio del software TOPAZ.

- 3) Por medio del laboratorio ALS se realizó la tercera etapa que consistió en estudios de: a) análisis de roca total, b) digestión de agua regia con análisis de supertrazas ICP-MS y c) elementos traza por fusión, en tres muestras recolectadas a lo largo del área de estudio. Estas

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

muestras son seleccionadas por contener los porcentajes más altos de minerales asociados a cobre.

Fase 4: Análisis de resultados

En esta etapa se realizará con base en los datos e información obtenida de los análisis de laboratorio, la identificación de las relaciones paragenéticas de los minerales encontrados en cada una de las muestras enriquecidas en cobre y su posible relación con los diferentes depósitos de cobre. Además, se interpretarán las condiciones de formación que dieron lugar a las mineralizaciones cupríferas, con el fin de identificar el sistema que se desarrolla sobre los sedimentos de Curumaní, su génesis, mineralogía y geoquímica.

Fase 5: Elaboración del documento final

Para finalizar, se estructurará el documento final del trabajo de investigación en donde se evidencian los datos adquiridos, y se sintetizan las conclusiones a las cuales se llegaron, permitiendo así, dar cumplimiento a los objetivos planteados. Los resultados obtenidos tienen como fin aportar al conocimiento sobre los depósitos de cobre ubicados en el municipio de Curumaní y analizar la posible relación entre estos y los depósitos de cobre encontrados a nivel mundial.

4. Antecedentes

4.1 Marco tectónico regional:

La evolución tectónica del Norte de Colombia tiene su explicación en la convergencia de dos placas oceánicas: Nazca y Caribe contra la placa continental de Suramérica, los eventos de colisión entre estas placas son los responsables de la deformación de la corteza y de la configuración actual de la esquina Noroccidental de Suramérica (Cediel et al., 2011). Reconocer los principales episodios tectónicos regionales en el contexto de la evolución de los Andes septentrionales es clave para comprender el origen y desarrollo de la Cuenca Cesar-Ranchería. Se reconocen tres eventos tectónicos preandinos: (1) Orogenia Grenviliana o Colisión Orinoquense, (2) Orogenia Paleozoica tipo Cordillera y, (3) El Aulacógeno Bolívar (Cediel et al., 2003). Estos autores también consideran que en la subplaca de Maracaibo (MSP) se encuentran la Cuenca Cesar-Ranchería, la Sierra Nevada de Santa Marta (SM), la Sierra de Mérida (SM), la Serranía de Perijá (SP) y el macizo de Santander (MS).

Dentro los eventos tectónicos preandinos el (3) es el más significativo para comprender el marco tectónico de la zona en estudio, por lo cual será explicado a continuación:

Aulacógeno Bolívar (Paleozoico tardío-Cretácico temprano)

Cediel & Cáceres (2000) afirman que el NW de Suramérica (sub-placas de la Cordillera Central y Maracaibo) fue afectado desde el Paleozoico hasta el Cretácico por tafrogénesis continental (distensión con formación de fallas de gran ángulo y fosas tectónicas) produciendo un conjunto extensional de mega-estructuras que inició con la apertura de un rift intercontinental que fue relleno durante el Pensilvaniano-Permiano por sucesiones marinas. Durante el Permiano, el régimen tectónico cambio a transpresivo, brevemente, y continuó extensivo durante todo el Triásico (depositación de las formaciones Luisa, Payandé) y el Jurásico con predominancia de depósitos continentales y vulcanoclásticos (formaciones Girón, La Quinta y Jordán). El régimen extensional regional terminó durante el Cretácico temprano con la apertura del rift del Valle Alto y el cambio a un régimen compresivo como se registra en el hiatus estratigráfico del Aptiano inferior.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Orogenia Norandina (Cretácico tardío-Neógeno)

La orogenia de norte de los Andes inicia en el Aptiano-Albiano con el cambio en dirección de deriva y velocidad de las placas Farallones y Suramérica, lo que resultó en la colisión oblicua, subducción, obducción y formación de nuevas placas oceánicas (Sistema del Caribe y Nazca) y el desprendimiento de la sub-placa continental de Maracaibo que constituye el NW del Escudo de Guyana (Mesozoico-Cenozoico) (Cediel et al., 2003).

Según Cediel et al. (2003), la migración hacia el NW de la sub-placa de Maracaibo (MSP) a lo largo de los sistemas de fallas de Santa Marta, Bucaramanga y Oca-El Pilar, ocurrió sincrónicamente con la formación de la Sierra de Mérida, el Cinturón de Santander-Perijá y la SNSM, lo que indica que la deformación de la MSP tiene tres fases: **1)** durante el Cretácico el desprendimiento de la corteza media y migración al NW de la MSP debido a la reactivación de los sistemas de falla de Bucaramanga-Santa Marta y Oca-El Pilar, generó el levantamiento del Macizo de Santander y los patrones de depositación marina que rodea el Arco de Mérida, **2)** durante el Paleoceno, el plegamiento transpresional a lo largo de las fallas Bucaramanga y Oca-El Pilar y el levantamiento de los terrenos de la Guajira-Falcón a lo largo de la margen del Caribe, dio como resultado la formación de una cuenca antepaís en el Eoceno sobre la margen norte de la MSP (Lugo & Mann, 1995); también se da la obducción al E de los terrenos montañosos del Caribe; y **3)** en el intervalo del Mioceno al presente se desprenden la Sierra de Mérida, Serranía del Perijá y SNSM a lo largo de la fosa vergente al NW. Rocas metamórficas del Cretácico que forman la SNSM (Doolan, 1970) fueron exhumadas a medida que la MSP fue empujada hacia la placa del Caribe, mientras que los plutones tonalíticos-dioríticos del Paleógeno, parte también de la SNSM, intruyeron rocas del Cretácico, lo que sugiere una fusión parcial por debajo de la misma.

Cediel et al. (2003), interpreta por medio de la gravimetría y la historia dinámica de la Falla de Oca-El Pilar, la interacción entre la Placa Caribe y la MSP como un cabalgamiento forzado, demostrado en la ausencia de un arco magmático que se relacione con una supuesta subducción por debajo de la MSP.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

4.2 Evolución geológica de la cuenca:

Paleozoico: Para el Paleozoico Temprano (Cambro-Ordovícico) Gil & Martínez, (1990) reportan una depositación clástica. Hernández (2003) indica que dicha depositación de sedimentos pelíticos se encuentra estratificada por flujos de lava, que posteriormente en el Silúrico Temprano sufrieron procesos de metamorfismo de bajo grado y alta temperatura; formando esquistos de actinolita-clorita, cuarcitas y filitas que corresponden a la Unidad Metasedimentaria de La Virgen. En el Silúrico y Devónico Temprano ocurrieron eventos simultáneos de levantamiento, plegamiento, actividad plutónica y erosión relacionados a la Orogenia Caledoniana.

Posterior a la Orogenia Caledoniana Gil & Martínez (1990) indican que ocurre la depositación de sedimentos marinos ubicados al occidente por un proto-océano Pacífico; Hernández (2003) añade que los sedimentos son especialmente gravas, arenas, shales y shales calcáreos cubriendo áreas positivas del cratón debido a una transgresión. Para el Paleozoico Tardío Hernández (2003) establece un segundo evento tectónico importante, la Orogenia Herciniana, que ocurre en el Devónico Tardío y que se caracteriza principalmente, por procesos de fallamiento y fuerte erosión que originan un hiato entre los sedimentos devónicos y carboníferos.

Triásico – Jurásico: Durante el Triásico se presentan movimientos asociados a rifting gracias a la separación de masas continentales; Laurasia se divide y origina mares entre Norteamérica, Suramérica y África, gracias a los cuales se produce la apertura del mar Caribe y a su vez se forman fosas tectónicas que permiten la depositación de la Formación La Quinta (correlacionada estratigráficamente según Maze (1984) con la formación Noreán en Colombia). Procesos de Vulcanismo de flujo y piroclástico contribuyeron con material de flujo, cenizas y detritos a la secuencia, especialmente en el Jurásico Medio, donde además ocurrió el emplazamiento de plutones (Hernández, 2003). Por otra parte, se reportan que las secuencias volcánicas están representadas por andesitas y riolitas y los cuerpos plutónicos por dioritas y cuarzodioritas (Gil & Martínez, 1990).

Barremiano – Aptiano temprano: Durante este período se deposita la Formación Río Negro. Gil & Martínez (1990) indican que ocurre sobre paleodepresiones configurando una topografía suave que favorece la depositación de carbonatos hacia el tope de la formación. Previo a la

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

depositación de carbonatos existe un sistema de fosas tectónicas a lo largo de Suramérica; durante el Cretácico Temprano, se formaron tres surcos subsidentes importantes en el área de Venezuela: el Surco Táchira, el Surco Trujillo y el Surco Machiques, este último presente en la Serranía del Perijá (Zambrano et al., 1975).

Aptiano tardío – Santoniano: Desde el Aptiano Tardío hasta el Albiano se deposita el Grupo Cogollo. Hernández (2003) indica que la subsidencia es continua y se forma un ambiente de depósito marino, donde predomina la precipitación química de carbonato. Arias & Londoño (1999) indican que dicha depositación ocurre en una plataforma abierta con cambios faciales, debido a una mayor subsidencia hacia el sur. Gil & Martínez (1990), señalan que la plataforma sobre la cual se desarrolló el Grupo Cogollo tenía un delgado sustrato clástico de pendiente muy suave, que formó una rampa sobre la cual se generaron varios juegos de barras favorecidas por la alta influencia del oleaje, sin embargo, por debajo del nivel base de las olas de tormenta, se depositaron carbonatos y shales de condiciones euxínicas.

Posteriormente, el oleaje fuerte inundó la plataforma y formó pequeñas cuencas intraplataforma. Gil & Martínez (1990) determinaron que la Formación La Luna se depositó durante el Cenomaniano, sin embargo, Hernández, (2003) extiende su período de depositación durante el Turoniano, Coniaciano y posiblemente hasta el Santoniano, período en el que la subsidencia alcanza su máxima tasa, ocasionando una profundización del mar y con ello condiciones para la acumulación de calizas pelágicas.

Campaniano – Maastrichtiano: Durante el Campaniano y Maastrichtiano se deposita la Formación Molino, en un ambiente marino profundo que continúa hasta el Campaniano Medio (Hernández, 2003). Para el Maastrichtiano, Bayona et al (2007) indican que en el área de Ranchería los sedimentos de la Formación Molino provienen de la denudación del sector occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta.

En el área de Venezuela se depositan las Formaciones Mito Juan y Colón, de composición clástica de grano fino, producto del comienzo de la regresión generalizada para este período y el comienzo del acelerado levantamiento de la Cordillera Central (Villamil, 1999). Este evento marca la fase Pre-Orogenia Andina, generando así un desplazamiento hacia el oriente del eje de depositación en la medida en que la Cordillera Central se levanta.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Paleoceno: Hernández (2003) indica que este período inicia con la depositación de las Formaciones Barco y Los Cuervos, en un ambiente continental producto de una lenta regresión mientras que en el área de Ranchería se depositan la Formaciones Hato Nuevo y Manantial en un ambiente marino durante el Paleoceno Temprano. Villamil (1999), reporta que la Cordillera Central continúa levantándose, y presenta una asimetría, ya que su flanco occidental tiene un mayor ángulo que el flanco oriental, lo que indica que las Cordilleras Central y Oriental fueron sometidas a esfuerzos compresivos y como consecuencia de la deformación se produjo una discordancia hacia la base de la Formación Barco, que, según el mismo autor, se encuentra entre el Maastrichtiano Tardío y el Paleoceno Temprano. En el Paleoceno Tardío se deposita la Formación Cerrejón. Bayona et al. (2007), reportan que en el Paleoceno Tardío ocurre la migración de un sistema deltaico hacia el oriente y de ciénagas para la Formación Cerrejón, período en el cual se han interpretado sistemas fluviales que parten de las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, provenientes de un terreno metamórfico de medio a alto grado, con unidades magmáticas de carácter calco-alcalino y rocas volcánicas y sedimentarias que se extienden hasta el Oriente de Maracaibo.

Eoceno – Oligoceno: A causa del desarrollo de la Orogenia Pre-Andina durante el Eoceno, el espacio de acomodamiento para el norte de Suramérica, decrece significativamente y en su clímax acelera la tasa de levantamiento de la Cordillera Central (Villamil, 1999). Mora & García (2006) utilizando líneas sísmicas, establecen que el Sistema de Fallas Santa Marta-Bucaramanga fue el responsable de la intensa deformación que afectó a las unidades Pre-Oligoceno, estableciendo un límite activo entre las cuencas Cesar-Ranchería y Valle Inferior del Magdalena, durante el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano. En el Oligoceno Tardío se inicia un estilo tectónico de bloques que involucra el basamento y culmina durante el Plioceno con el cabalgamiento al noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía del Perijá sobre las cuencas adyacentes (Hernández, 2003). Villamil (1999) reporta que para este período los drenajes del Río Magdalena y Orinoco toman la dirección que actualmente presentan.

Mioceno – Pleistoceno: El Mioceno es el período de más rápido y mayor levantamiento de cadenas montañosas en Colombia y otras regiones de Suramérica. Este levantamiento favoreció las tasas de erosión y depositación sobre los flancos de las Cordilleras Oriental y Central. Hernández (2003) reporta que el principal levantamiento de la Serranía del Perijá ocurrió durante

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

el Mioceno Tardío–Plioceno, en la Orogenia Andina. El levantamiento de la Serranía del Perijá y de la Sierra Nevada de Santa Marta, causado por la convergencia de las placas Caribe, Suramérica y Nazca, originó las fallas transcurrentes de Bucaramanga–Santa Marta y de Oca, bajo un campo de esfuerzos compresivos orientados $N40^{\circ}W \pm 10^{\circ}$ (Cáceres et al., 1980).

Finalmente, durante el Plioceno–Pleistoceno se formaron abanicos, terrazas y planicies aluviales que cubren el valle Cesar-Ranchería. La posición actual de estos depósitos sobre el nivel base de los ríos (200m-300m) es evidencia de un rápido levantamiento producto de la deformación andina (Hernández, 2003).

Tabla 1:

Síntesis de la evolución geológica de la cuenca Cesar-Ranchería (ANH,2007)

TECTONICS	SEQUENCE	TIMING	SEDIMENTARY RECORD	
Foreland	T2	Pliocene-Late Eocene	Cuesta + San Antonio	"Conjunto Conglomerático" cgl, ss "Conjunto Calcáreo" (reefal facies)
	T1	Eocene	"Eocene Sedimentites" ? ss	Aguas Nuevas ? cgl ss, ss
	K-T	Paleocene-Late Campanian	Los Cuervos Barco?	Palmito Tabaco conglom. ss, sh Cerrejón ss, sh, coal Manantial carbonates Hato Nuevo sh, carbonates, ss
	K5			Molino Shales
Passive Margin	K4	Early Campanian-Aptian		La Luna Carbonates and shales
	K3			Lagunitas - Aguas Blancas Carbonates
	K2			Río Negro qz-ss
	K1			
Rifting	T-J	Early (?) K Jurassic Triassic	La Quinta Red Beds and Equivalents (Guatapuri, Giron, etc.)	

4.3 Marco teórico

Zona de transición (frente REDOX): zona intermedia entre sedimentos oxidados y reducidos, denominada aquí "frente REDOX". La transición ascendente de rocas que contienen óxido de hierro a sedimentos que contienen sulfuro de metal se caracteriza por un cambio gradual de rocas de color marrón rojizo a grises con manchas, rayas y bandas rojas, a sedimentos de color gris oscuro y negro. Este cambio de color va acompañado de una clara disminución del contenido de

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

hierro férrico y un aumento del contenido de TOC (contenido total de materia orgánica) y S, así como un aumento de la relación MgO/CaO (Oszczepalski, 1999).

Las reacciones REDOX son las responsables de la deposición del mineral. Si se produce un desequilibrio de sulfuro REDOX, los fluidos pueden reaccionar con la materia orgánica para precipitar minerales de cobre (Cox et al., 2007).

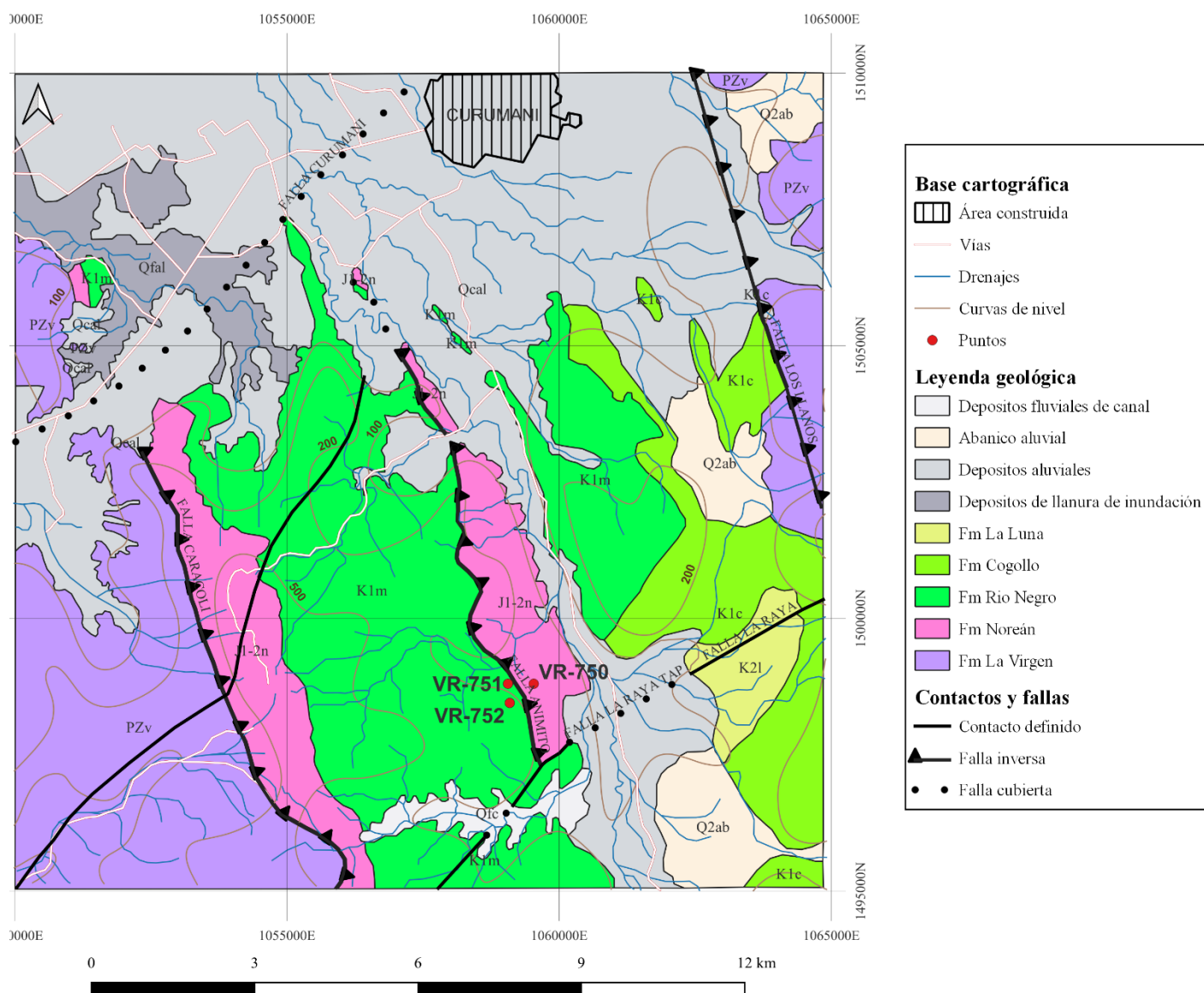
ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

5. Marco teórico

5.1 Estratigrafía:

Figura 2:

Mapa geológico de la zona de estudio y ubicación de las muestras analizadas. Creado por los autores con base en las planchas 55 y 56 del SGC y la cartografía básica por parte del IGAC



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Rocas Metamórficas:

Formación La Virgen (PZv):

Se agrupa con este nombre informal a una sucesión de rocas metasedimentarias y sedimentarias que afloran en la Serranía de Perijá. Las descripciones corresponden a las realizadas en Royero (1994) y en el Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Cesar (Arias & Morales, 1994). Está compuesta por rocas sedimentarias que han sido afectadas por metamorfismo regional de bajo a muy bajo grado, dispuestas en capas delgadas y medianas; metareniscas, metalimolitas, metalodolitas, metaconglomerados y en menor proporción filitas, esquistos y cuarcitas (?). Arias & Morales (1994) describen al oriente de La Jagua de Ibirico una secuencia espesa y monótona de metarcillolitas y metalodolitas rojas, ocasionalmente gris azulosas, finamente laminadas, con brillo sedoso; metareniscas de grano fino, gris verdosa, micácea y muy deleznable, donde el metamorfismo es menos visible; se observan concentraciones de cuarzo lechoso, de segregación, y está asociado principalmente con las metarcillolitas. Interestratificado con las metalimolitas se encuentra un conglomerado con cantos subredondeados de cuarzo lechoso, cuarcita blanca, areniscas de grano fino, chert, rocas volcánicas y esporádicamente limolitas rojas y verdes. Hacia la parte superior de La Serranía, Arias & Morales (1994) describen una secuencia de 30 metros de calizas grises claras, arenosa; la caliza en bancos medianos y delgados está cruzada por venillas de calcita. La secuencia metasedimentaria continua hacia el oriente hasta cerca de la frontera con Venezuela.

Los metasedimentos se correlacionan tentativamente con Series Perijá de edad cambro-ordovícica (Forero, 1972), igualmente, podría correlacionarse con la secuencia metasedimentaria que aflora entre Silos y Guaca (Santander) que en concepto de Forero (1972) es de edad predevónica, posiblemente silúrica, y cartografiada por Ward et al 1973 como Formación Floresta Metamorfizada.

Rocas Ígneas

Formación Noreán (J1-2n):

Las rocas de esta unidad constan de tobas y aglomerados cristalino-líticos de colores gris verdoso a rosado, se disponen en capas planas a ligeramente onduladas de composición dacítica a riolítica junto con capas de lavas dacíticas, poseen fenocristales y cristales de plagioclasa, cuarzo y

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

fragmentos angulares de tobas con estructuras de flujo. Se ha subdividido de base a techo con base en su litología, composición y estilo de emplazamiento, en cuatro conjuntos: Clástico - piroclástico (Jncp), piroclástico - epiclástico (Jnpe), efusivo dacítico (Jned) e hipoabisal andesítico (Jnha) (Mantilla et al., 2006).

Hacia el sur de Curumani se presenta como una franja limitada al W por la falla Caracoli de la unidad Pzv del Paleozoico Inferior y al E limita por medio de una discontinuidad estratigráfica con la Formación Río Negro del Cretácico Inferior. Se presenta como una franja NW - SE que además presenta una repetición parcial por efecto de la Falla de cabalgamiento de Animito, que la pone en contacto de nuevo con la Formación Río Negro, esta vez suprayaciéndola. En estas dos fajas, la unidad está constituida predominantemente por tobas cristalinas, de composición dacítica, riodacítica y riolítica, dispuestas en capas muy delgadas (1-5 cm), planas paralelas de color rojo grisáceo, gris intermedio y naranja grisáceo, en menor proporción se tienen areniscas arcósicas de grano medio y grueso rojizas y púrpuras, areniscas lodosas púrpuras conglomeráticas, areniscas y limolitas tobáceas de color púrpura y aglomerados de color rojizo con clastos subredondeados de rocas volcánicas de hasta 20 cm de diámetro (Clavijo, 1994b).

La Formación Noreán, descansa en inconformidad sobre el Neis de San Lucas exhibiendo un contacto continuo pero neto marcado por el cambio composicional de shales oscuros, a arenitas tobáceas blancas y brechas volcánicas (Mantilla et al., 2006).

No se conoce en la región el tope de la Formación Noreán, sin embargo, espesores estimados en campo alcanzan los 300 m, aunque se le atribuyen 700m basado en la construcción de cortes geológicos (Mantilla et al., 2006).

La edad de la formación se calculó mediante el método Rb-Sr; y se obtuvo un valor de 161 ± 27 Ma que corresponde a la parte alta del Jurásico Medio. Esta edad indicaría una fase terminal del evento volcanoclástico Noreán. Por otro lado, se obtuvo una edad en K-Ar de 194 ± 6 Ma que corresponde a la parte baja del Jurásico Temprano, la cual representaría la fase inicial del mismo evento volcanoclástico. De acuerdo con lo anterior, se acepta una edad Jurásico Temprano-Jurásico Medio para la Formación Noreán (Mantilla et al., 2006).

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

La Formación Noreán constituye el registro de un gran evento volcánico de carácter predominante explosivo, acaecido a principios y a mediados del jurásico, que generó enormes cantidades de material piroclástico y efusivo que fue depositado en una cuenca tipo graben, en parte inundada por un mar somero, en parte drenada por Ríos y lagos (Mantilla et al., 2006).

La Formación Noreán es correlacionable litológica y cronológicamente en las estribaciones Orientales de la Sierra Nevada de Santa Marta con las rocas volcanoclásticas de la Formación Guatapurí (Tschanz et al., 1969). Igualmente es correlacionable con la Formación La Quinta (Maze, 1984) en la Serranía de Perijá en Colombia y Venezuela.

Rocas Sedimentarias

Formación Rionegro (K1r):

La Formación Río Negro está constituida por areniscas, conglomerados, lodolitas y arcillolitas, en general, las areniscas son blancas de grano grueso, los conglomerados son heterogéneos y las lodolitas y arcillolitas muestran típicamente los tonos brillantes de amarillo, rojo y morado por presencia de óxidos de hierro. Con base en la columna estratigráfica propuesta por GEOESTUDIOS LTDA (2005) se han subdividido los siguientes segmentos:

Segmento A: secuencias granodecrecientes incompletas que inician con conglomerados matriz y clastosoportados, seguidos por arenitas conglomeráticas y terminan con arenitas de grano grueso con estratificación cruzada planar.

Segmento B. secuencia granodecrecientes completas que se inician con areniscas de grano medio con estratificación cruzada planar y continúan con arenisca bioturbadas y terminan con limolitas o lodolitas bioturbadas, Se observan intercalaciones de limolitas rojas y areniscas arcólicas.

En las inmediaciones de Curumani se halla limitada y repetida por la falla animito, está constituida predominantemente por areniscas de grano medio y grueso de color crema, bien seleccionadas con granos subredondeados a subangulares; areniscas conglomeráticas de grano medio a guijo y en menor proporción por conglomerados arenosos de guijos, guijarros y lodolitas arenosas. Composicionalmente, las areniscas varían de subarcólicas y sublíticas hasta cuarzoarenitas, las lodolitas son predominantemente cuarzosas y los conglomerados desde líticos

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

hasta cuarzosos. Están dispuestas en capas medianas y gruesas de geometría cuneiforme y plana paralela con laminación interna cruzada plana y en artesa. Las lodolitas son grises claras dispuestas en capas delgadas planas paralelas. Estas rocas aparecen cruzadas localmente por venas de Barita de 20 a 40 cm de espesor (Quebrada Piedra Moná) (Clavijo, 1994b).

Esta sucesión clástica que representa el relleno final de la grieta mesozoica fue depositada de manera discordante sobre los lechos rojos jurásicos, durante los episodios extensionales que controlaron la sedimentación hasta el Cretácico temprano (pre-Aptiano tardío), Por sus características litológicas Hernández (2003) ha postulado un ambiente de depósito fluvial a transicional que corresponde a abanicos aluviales. A medida que el mar avanzó en su proceso transgresivo, el ambiente se fue tomando marino (Cáceres et al., 1980; García, 1990).

La deposición de la Formación Río Negro podría haber ocurrido desde tiempos berriasianos (?) Hasta tiempos anteriores a Aptianos tardíos (?), Dependiendo de la ubicación de la deposición: dentro de la grieta o sobre sus hombros. Etayo-Serna et al., (1983) asignaron una edad Aptiana-Berriasiana-Barremiana-temprana a la Formación Río Negro.

Formación Cogollo (K1c):

Garner (como se citó en PDVSA-INTEVEP, 2008) introdujo el término Calizas del Río Cogollo en el distrito de Perijá estado de Zulia, para definir una secuencia de calizas macizas, grises fosilíferas. Se hallan situadas por debajo de la Formación La Luna. Liddle (como se citó en Julivert 1968) y Hedberg & Sass (1937) introducen el nombre de Formación Cogollo.

Sutton (como se citó en Julivert, 1968) designa estas calizas como Grupo Cogollo y las subdivide en las formaciones Apón en la parte inferior, Aguardiente en la parte media y Capacho en la superior. Incluye los sedimentos cretácicos comprendidos entre la Formación Río Negro y la Formación La Luna. En Colombia esta unidad en la Cuenca del Cesar fue subdividida en Formación Aguas Blancas y Formación Lagunitas (Haught et al., 1945).

Esta unidad se divide en los siguientes segmentos:

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Segmento A: capas gruesas de calizas fosilíferas (conchillas de pelecípodos, gasterópodos, corales y amonites (máximo 290 m). Formación Lagunitas: sección tipo en quebrada Jaguey cerca de la población de Lagunitas, en el valle del río Ranchería (Neelands, 1922).

Segmento B: lutitas negras carbonosas, calcáreas con abundante materia orgánica, con concreciones calcáreas hacia la base. Intercaladas con las lutitas aparecen calizas negras, micríticas, duras, localmente fosilíferas que gradan lateralmente a areniscas de grano fino compuestas de cuarzo con cemento calcáreo (285 m) (Formación Aguas Blancas: conjunto lodolítico calcáreo, miembro Las Ánimas).

Segmento C: Hacia la base está compuesto por limolitas arenosas, de color gris oscuro, ligeramente calcáreas, algo físciles, las cuales gradan localmente a areniscas de grano fino, subangular a subredondeado, moderadamente sorteadas, color pardo, compuestas de cuarzo, con matriz arcillosa, cemento silíceo o calcáreo. En menor proporción se encuentran arcillolitas limoarenosas, levemente calcáreas, algo físciles, color gris pardo, carbonosas y moscovíticas (450 m) (Formación Aguas Blancas: conjunto arenoso, Miembro Tucuy).

Segmento D: compuesto por calizas lumaquélicas masivas (fósiles de pelecípodos y gasterópodos) (217 m) (Formación Aguas Blancas: conjunto calcáreo superior, Miembro Maracas).

Según PDVSA-INTEVEP (2008), este grupo es de edad Aptiano Temprano y según Govea & Dueñas (1975) es Aptiano.

Formación La Luna (K2I):

La sección tipo se describe como una secuencia típica de calizas y lutitas calcáreas con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa, delgadamente estratificadas y laminadas, densas, de color gris oscuro a negro. Es frecuente la presencia de chert negro en forma de nódulos y capas delgadas. Concreciones elipsoidales a discoidales de 1 a 80 cm, son características típicas de la formación, que permiten reconocerlas en cualquier afloramiento. Muchas de las concreciones tienen amonitas y macrofósiles en su interior. Las capas de caliza varían en espesor

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

hasta unos de 1 a 2 cm hasta unos 50 cm, con estratificación y monótona (PDVSA – INTEVEP, 2008).

Esta unidad se caracteriza, en esta plancha, por la ocurrencia de rocas estratificadas dispuestas N15°E a N55°E con buzamientos entre 18° y 44° hacia el Noroeste. En general está compuesta por intercalaciones de lodolitas, lodolitas calcáreas y chert en la parte inferior; hacia la parte superior por calizas masivas intercaladas con lodolitas calcáreas. En otros sectores se presentan calizas masivas y calizas fosilíferas con niveles irregulares de chert.

La Formación La Luna se generó en un ambiente euxínico de aguas con profundidad entre 100 y 800 m (PDVSA-INTEVEP, 2008). Esta unidad es correlacionable con la Formación Villeta en Colombia. En Venezuela oriental, se correlaciona con la Formación Querecual (PDVSA-INTEVEP, 2008).

5.2 Geología estructural

La cuenca de Cesar-Ranchería es una cuenca asimétrica limitada al norte por la falla de oca, al oriente por la serranía de Perijá y la zona norte del macizo de Santander y al sureste por la falla de Bucaramanga y la sierra nevada de santa marta, cuyo mayor espesor se encuentra hacia el E y disminuye a medida que se acerca a él W, su geometría está definida por la conjunción de tres placas tectónicas (Nazca, Caribe y Suramerica) (Ujueta & Llinas, 1990), además, estas últimas generaron sistemas de fallas como el de Santa Marta-Bucaramanga y Oca y el levantamiento de la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta (Hernández, 2003).

Las fallas y pliegues presentes en la subcuenca de Cesar tienen una orientación preferencial NE-SW (*Figura 2*). Las fallas en su mayoría son inversas de alto ángulo con vergencia hacia el suroeste; y componentes recientes de rumbo (Higgs, 2008). La resolución sísmica debajo del Cretácico es muy baja y no permite ver el comportamiento de las fallas en profundidad, sólo se observa que el estilo tectónico es predominantemente de piel gruesa (thick-skinned), a excepción de algunas fallas someras con despegues en la Formación Colón asociados a la deformación del Oligoceno Tardío y Plio-Pleistoceno. Algunos autores consideran que estas fallas de alto ángulo se horizontalizan en profundidad (ECOPETROL, 1998), mientras otros las interpretan como estructuras extensionales Jurásicas que limitan cuencas de inversión (INTERABIOSS, 1995). La

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Falla de Perijá es una falla de rumbo sinistral con orientación NE-SW que atraviesa la Serranía de Perijá (ECOPETROL, 1998). Según Ayala (2009) esta falla presenta episodios de actividad con movimientos verticales en el Jurásico-Cretácico inferior (extensional) y en el Paleoceno Tardío-Eoceno (inversión). Estudios previos en la subcuenca de Cesar han interpretado varias fases de deformación, pasando de condiciones tectónicas extensionales a compresivas. (Ayala-Calvo et al. 2009).

Falla Animito:

Falla de cabalgamiento orientada en sentido NW-SE, con vergencia hacia el NE que repite las secuencias jurásico cretácicas, Norean y Rio negro, poniendolas en contacto a lo largo de su afloramiento.

Falla Curumaní:

Falla de tipo dextral con una dirección N30°E, gran parte del trayecto de la Falla Curumaní se encuentra enmascarado por sedimentos cuaternarios, pero en algunos sectores afecta y fuertemente las rocas de la Formación La Virgen y Noreán, generando zonas de cizallamiento y fracturamiento. (Ingeominas UIS, 2006).

Falla Caracolí:

Traza suavemente sinuosa con rumbos entre N70E y N80E, con presencia a nivel local de pequeños pliegues y cabalgamientos producto de dichos esfuerzos compresivos. (Colmenares et al., 2007).

Se hallan diaclasas asociadas clasificadas en 5 familias diferentes: los rumbos de mayor frecuencia para las (diaclasas) N75E, N14W y N24W y los de menor frecuencia N26E y N74W; presentando buzamientos generales de 64°, 51°, 70°, 54° y 16° respectivamente. Las fallas se aprecian como zonas de debilidad, casi verticales con aperturas centimétricas de dirección preferencial NEE-SWW, con rumbo de N84°E predominante y pequeñas fallas con rumbos de direcciones N74°-75°W, buzando en ángulos que van desde lo 67°-85° (Zuluaga et al, 2019).

Y se calcula que los esfuerzos principales que generaron el tectonismo para el área de Caracolí son: σ_1 con un trend 17,6° y un plunch de 13°, σ_2 con un trend de 271° y un plunch de 51° y σ_3 con un trend de 117,2° y un plunch de 36° (FIGURA 8). Para el área de Camperucho son: σ_1 con

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

trend de $9,1^\circ$ y un plunch de $20,6^\circ$, σ_2 con un trend de $254,4^\circ$ y un plunch $48,1^\circ$ y σ_3 con un trend de $114,1^\circ$ y un plunch de $34,6^\circ$ (Zuluaga et al, 2019).

Falla Los Llanos:

Esta estructura recibe el nombre del sector conocido como Los Llanos, en la vía hacia el municipio de Pailitas (Cesar) y se extiende por las veredas Los Llanos (cuadrículas H1, H2), El Horno (G1, G2, F1 y F2) y finaliza en la cuadrícula E2, tiene dirección NE, NS, NNW con una extensión de unos 18 km y se infiere un comportamiento inverso con buzamiento hacia el Oriente, constituyendo una estructura de cabalgamiento, que pone en contacto rocas paleozoicas con unidades cretácicas y se caracteriza por rasgos morfológicos como silletas, drenajes rectilíneos, drenajes deflectados y valles en U con pendientes altas.

Esta falla pone en contacto las rocas paleozoicas de la Unidad Metasedimentaria de La Virgen con rocas cretácicas de la Formación Río Negro. En el sector de la vereda Bobilandía (G2), se encuentra una falla satélite de ésta con disposición NS/60°E en rocas de la Formación Río Negro. Esta falla probablemente ha cambiado sus movimientos a lo largo del tiempo: durante el Cretáceo temprano fue una falla normal, levantando el lado este, depositándose la Formación Rionegro en el lado oeste. Posteriormente cambió el movimiento a falla inversa.

Fallas mayores controladoras de la deformación en dirección NE (30° a 80°):

Hacia el norte las fallas de La Raya y Quebradientes de movimiento dextral, complementan el movimiento del bloque definido entre ellas y la Falla El Piñal-Pailitas, desplazando la zona de daño de la Falla Bucaramanga-Santa Marta por cerca de 1km.

Sinclinal de Chingalean:

Afecta niveles blandos (lodolitas y lodolitas calcáreas) de la Formación La Luna y el Grupo Cogollo. El eje del pliegue fotogeológicamente tiene una dirección NE con flancos apretados y afectados por diaclasas

6. Resultados

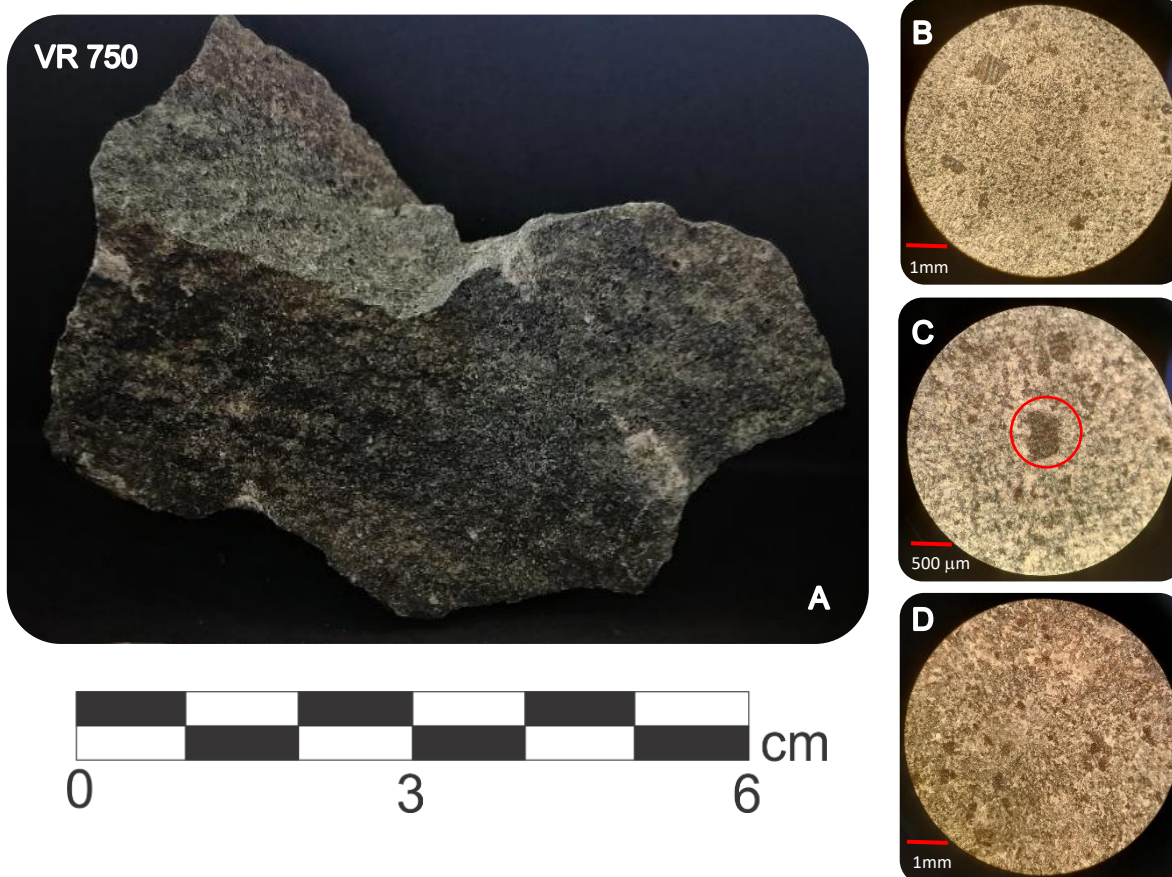
6.1 Petrografía

6.1.1 VR 750

Esta muestra pertenece a una roca ígnea volcánica, holocristalina con textura fanerítica identificada como basalto (*Figura 5*). En ella se observa una distribución cristalina panidiomorfica inequigranular y con tonalidades grisáceas asociadas a minerales máficos de tipo piroxenos de tamaño aproximados de 0.5-1 mm y los cuales ocupan el 25% de la muestra (*Figura 3D*), clasificándola como una roca leucocrática con base en su índice de color. Por otro lado, la roca está compuesta por fenocristales de plagioclasa en el orden de los 0.1 milímetros, augita, diopsido, hornblenda y algunos cristales de apatito, ilmenita y magnetita, los cuales se encuentran embebidos en una matriz vítrea que ocupa solo el 9% de la roca.

Figura 3:

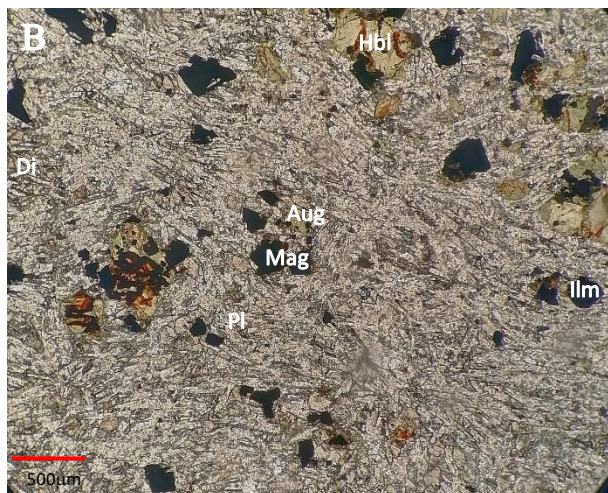
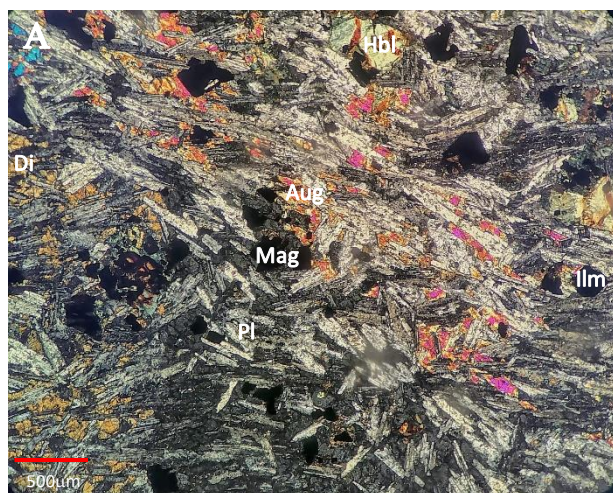
Macrofotografías de la muestra VR 750 A) Muestra de mano correspondiente a una roca ígnea con piroxenos y matriz de plagioclasa. B) Muestra en Lupa de aumento donde se evidencia la matriz y los cristales de minerales máficos. C) Piroxeno de aproximadamente 0.5mm. D) Relación de máficos y matriz en la muestra



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

En la sección delgada se identificó abundantes fenocristales de plagioclasa levemente orientados con textura fluidal que representan un 60% del total de la muestra y que se exhiben en forma de cristales equigranulares de hábito tabular y tamaños aproximados de 100 μ m. Además, se presentan cristales de clinopiroxenos de tipo Augita y Diopsido (*Figura 4 A y B*). La Augita se evidencia como cristales subhedrales y anhedrales cortos, incoloros que presentan un alto relieve y colores de interferencia del primero y principios del segundo orden, representando aproximadamente un 10% del total de la muestra (*Figura 4 C, D, G y H*). El Diópsido se identifica como cristales cortos, alargados e incoloros que presentan formas subhedrales y una buena exfoliación marcada en 2 direcciones. Asimismo, su relieve es alto y su color de interferencia de mitad del segundo orden, presentando una birrefringencia mayor que la Augita. Este mineral se distribuye en forma de cristales subhedrales de 0.5 a 1 mm que ocupan el 7% del total de la muestra.

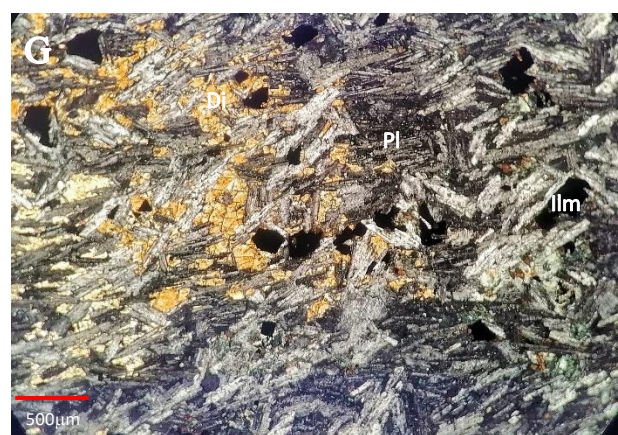
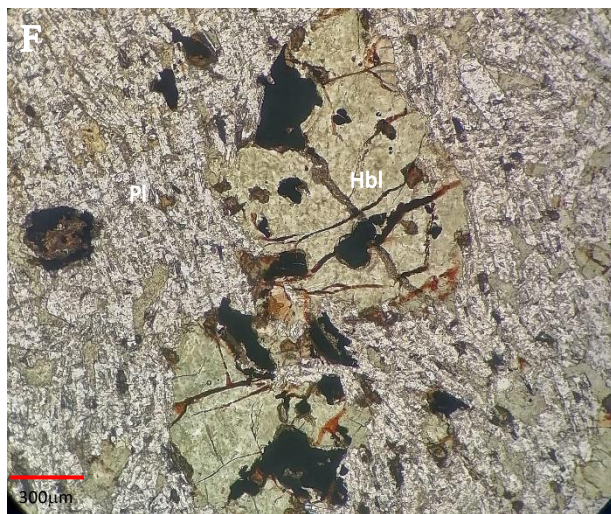
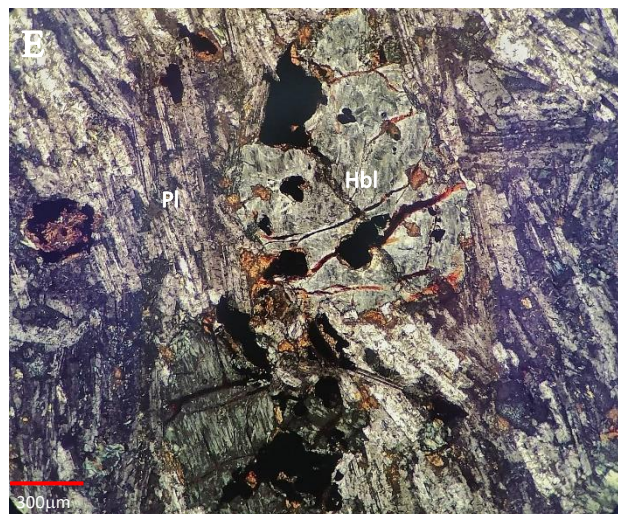
Por otra parte, se identificó un mineral verde oliva con forma subhedral (*Figura 4 E y F*), que presentan cierta oxidación en forma de zonación o rellenando fracturas y que fue identificado como hornblenda. Este mineral posee un leve pleocroísmo verde y tamaños que varían entre 50-250 μ m. Además, hace parte del 8% total de la roca y se encuentra alterando parcialmente a clorita. Finalmente, se observan apatitos en menos del 1% de la roca y algunos minerales opacos (5%) que exhiben formas anhedrales y otras euhedrales cuadradas (*Figura 4 C y D*) y los cuales corresponden a óxidos de hierro: magnetita e ilmenita. La roca fue clasificada como un basalto con base en la mineralogía (*Figura 5*).



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 4:

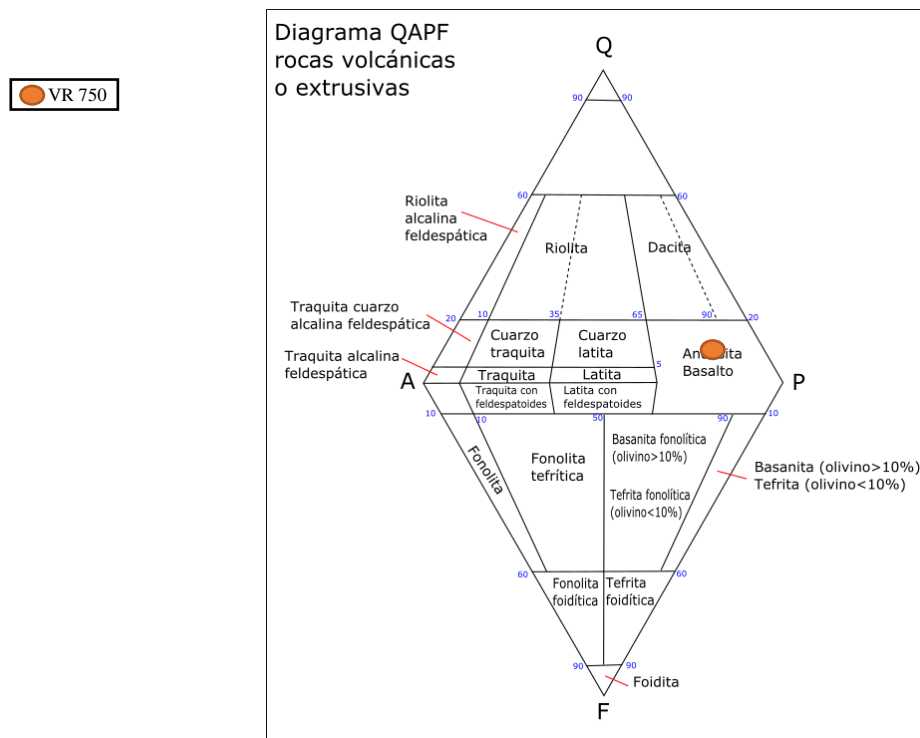
Petrografía óptica de roca ígnea, en las cuales se observan en las columnas izquierdas el microscopio en nicoles cruzados y en las de la derecha en nicoles paralelos. A y B) microfotografía del basalto. C y D) microfotografía con augita, plagioclasa, hornblenda y algunos minerales opacos. E y F) cristal de hornblenda con matriz de plagioclasa. G y H) Diópsido con opacos en matriz de plagioclasa. Pl=plagioclasa, Aug=augita, Di=Diopsido, Hbl=hornblenda, Ilm =ilmenita y Mag=magnetita



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Figura 5:

Triángulo de clasificación rocas volcánicas, Streckeinsen (1972)



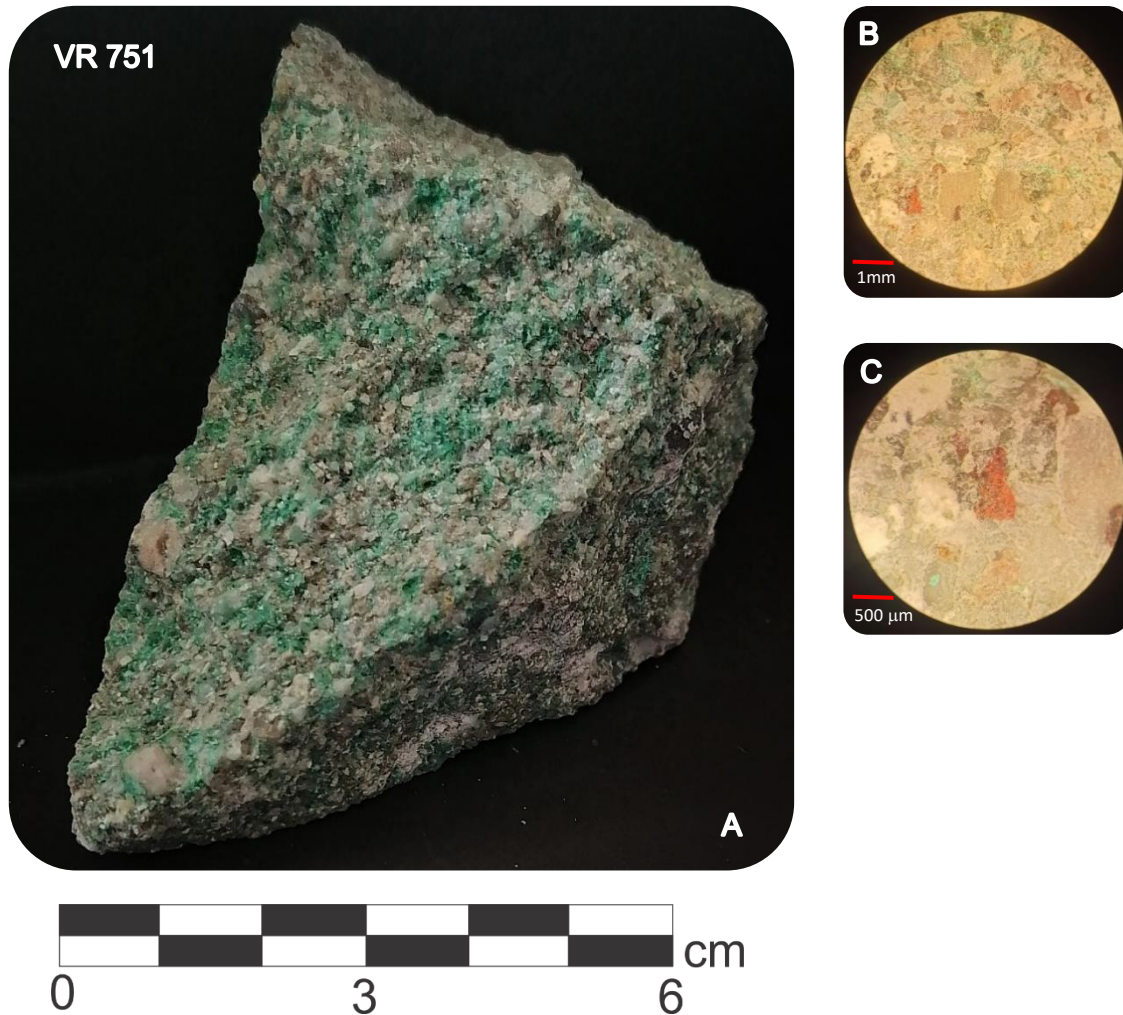
6.1.2 VR 751

Roca sedimentaria clástica de tonalidad grisácea y coloraciones verdosas clasificada según su textura como arenisca conglomerática (*Figura 11*) al estar compuesta de granos de tamaño arena de entre 0.5mm y 1.5mm y unos pocos de tamaño grava de más de 2mm. Según su composición fue clasificada como arcosa lítica (*Figura 10*), compuesta en un 65% por un armazón de fragmentos equigranulares, subredondeados y subsféricos de cuarzo y feldespato de tamaño grueso (*Figura 6B*), que junto con los minerales secundarios se encuentran embebidos en una matriz arcillosa producida a partir de la alteración de los feldespatos en menos de 5%, además de recubrimientos de cemento en los bordes de los granos.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 6:

Macrofotografías de la muestra VR 751. A) Muestra de mano de la arcosa lítica con su respectiva mineralización de cobre (color verde) B) Muestra en Lupa binocular de la muestra en donde se observan los granos de cuarzo, feldespatos, la matriz arcillosa y la mineralización verde. C) Muestra en Lupa binocular del mineral metálico siendo oxidado.



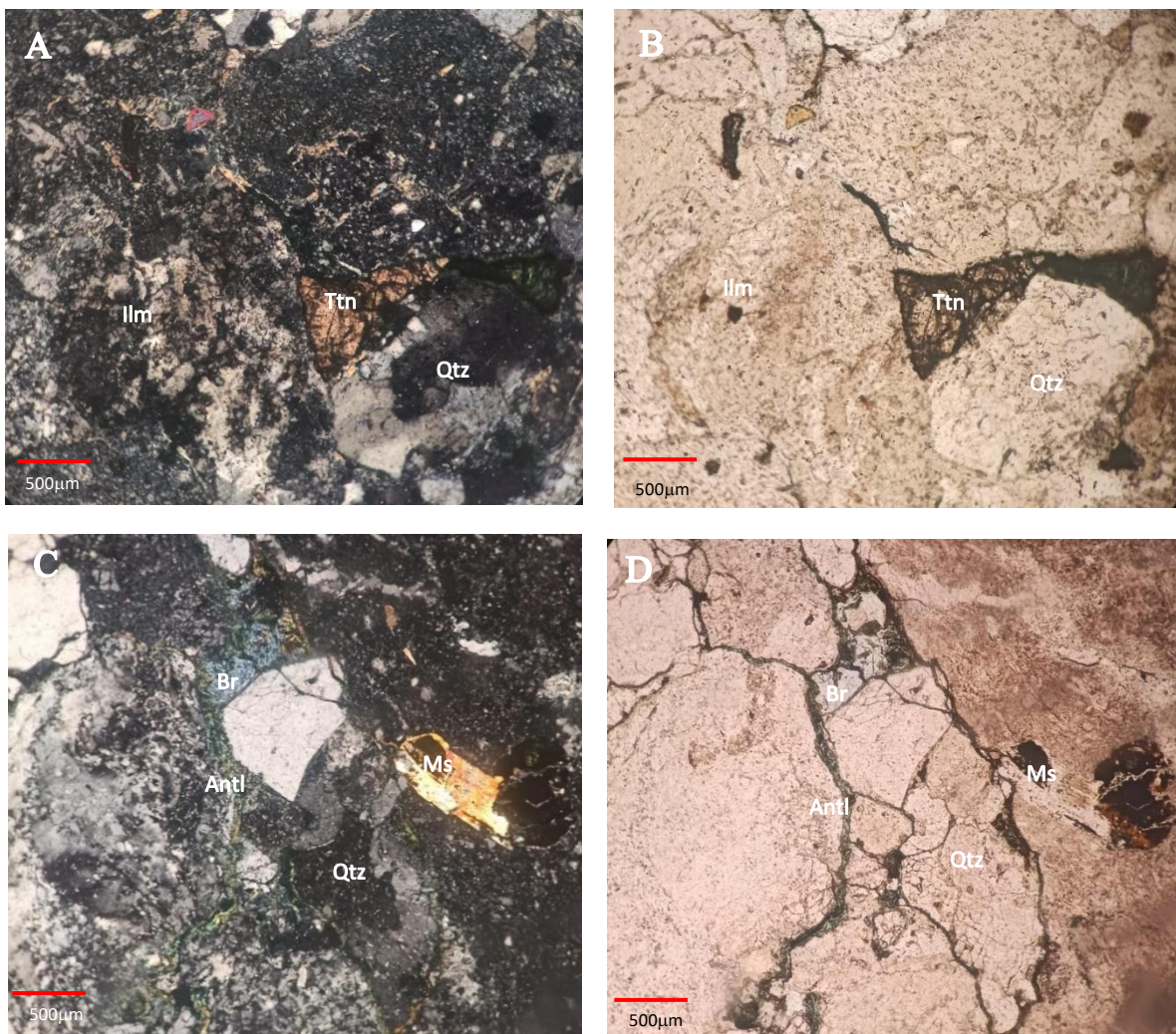
La sección delgada de esta roca sedimentaria confirma la predominancia del cuarzo en la muestra, debido a que se observan fragmentos equigranulares, subredondeados y subesféricos de tamaño grueso en más del 50 % (Figura 7 A y B) o en agregados microcristalinos. También se observan granos de feldespato, como microclina y ortoclasa de tamaño medio a grueso en un 15%, y algunos granos de plagioclasa sódica de tamaño medio en menor cantidad, ocupando un 10% de la muestra. Se destaca la presencia de un 3% de clorita en muchas de las micas y en algunos anfíboles, cambiando la textura y coloración de estos minerales.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Es evidente la presencia en un 15% de un mineral verde esmeralda, de hábito fibroso y colores de interferencia de segundo orden que se clasifica como antlerita, el cual, se encuentra dispuesto en masas o como relleno a través de las paredes de los granos en forma de pequeños cristales perpendiculares a la dirección de vetilleo. Esta mineralización es cortada por un relleno de cuarzo que presenta en sus bordes un mineral de alta birrefringencia y color azul pálido identificado como brochantita (*Figura 7 C y D*). También se pueden observar algunos microcristales de moscovita, epidota, titanita y zircón en menos de 7% de la roca.

Figura 7:

Petrografía óptica de roca sedimentaria, en las cuales se observan en las columnas izquierdas el microscopio en nicols cruzados y en las de la derecha en nicols paralelos. A y B) microfotografía de la arenisca. C y D) microfotografía de las venas de Antlerita y el armazón de cuarzo y plagioclasa. Pl=plagioclasa, Qz= cuarzo, Ser= sericita, Ms= moscovita, Antl= antlerita, Br=brochantita, y Mc= microclina.



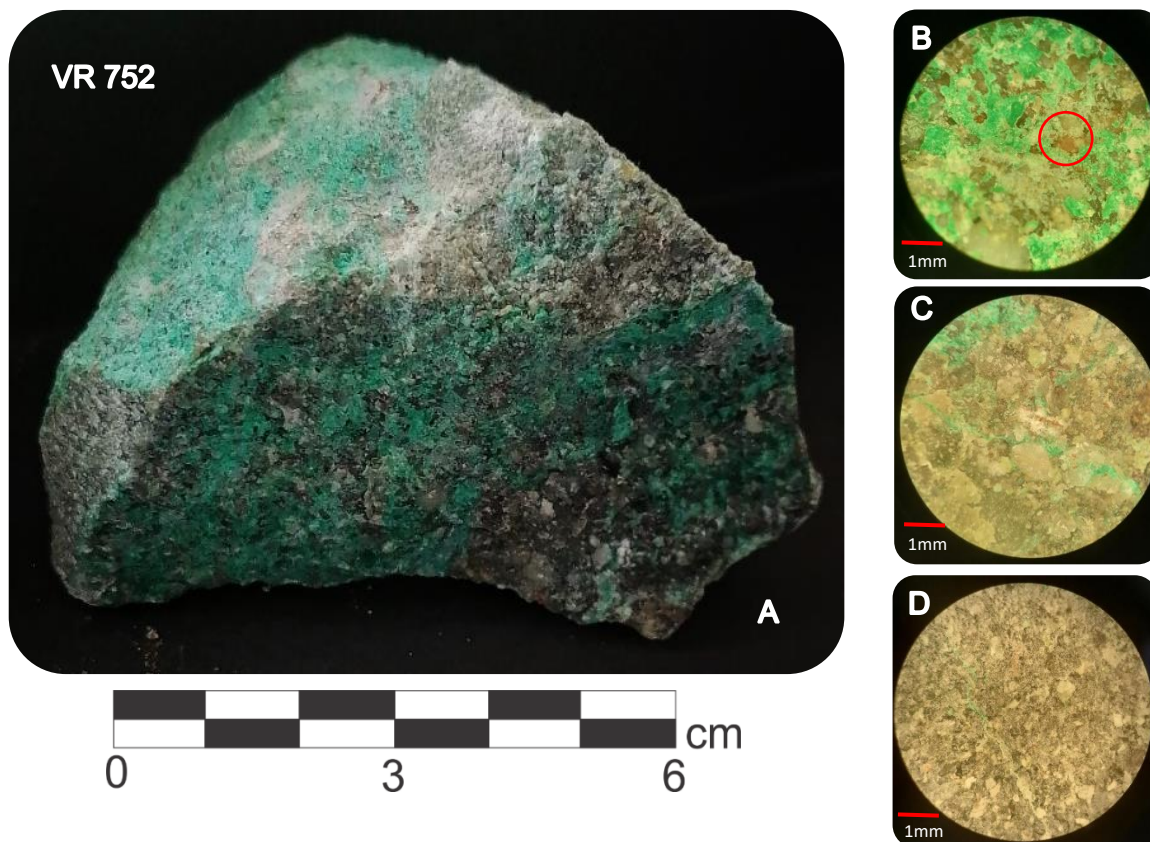
ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

6.1.3 VR 752

Roca sedimentaria clástica de tonalidad grisácea con zonas que presentan coloraciones verdosas intensas la cual fue clasificada según su textura como arenisca conglomerática (*Figura 11*) al estar compuesta de granos de tamaño arena de entre 0.25mm y 1.8mm y unos pocos tamaños grava de más de 2mm. Según su composición fue clasificada como arcosa sublitarenita (*Figura 10*), compuesta en un 65% por un armazón de fragmentos equigranulares, subredondeados y subsféricos de cuarzo y feldespato (*Figura 8C*). Además, se encuentran minerales secundarios de cobre en un 30% con tonalidades verdosas y algunos en formas redondeada y subelongada, mientras que la gran mayoría se evidencian sobre los intersticios del armazón, rellenando fracturas. Asimismo, fueron identificados minerales como magnetita e ilmenita que ocupan el 5% de la roca (*Figura 8B*), fragmentos líticos en un 6% y una matriz arcillosa en menos de 5% con tonalidad blanca.

Figura 8:

Macrofotografías de la muestra VR 752 A) Muestra de mano correspondiente a una roca sedimentaria que presenta mineralización de cobre (color verde). B) Muestra en Lupa de aumento donde se evidencia la mineralización y la existencia de óxidos de color pardo. C) Mineralización rellenando fracturas y mineral verde oliva que corresponde posiblemente con un mineral de cobre. D) Armazón de la muestra constituido de cuarzo y feldespato



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

En la sección delgada se observó la predominancia de un armazón compuesto por cuarzo y plagioclasas con alteración a sericita, que es evidente por el cambio de tonalidad a un color marrón y por la textura de los granos con un aspecto policristalino microgranular (*Figura 9 A y B*). En cuanto a las plagioclasas se concluyó que son del tipo albita y que también existe la presencia de algunos feldespatos potásico de tipo microclina en menor cantidad que se identificaron por su macla en enrejado (*Figura 9 E y F*). Además, se observó que el armazón posee granos equigranulares, subredondeados y subesféricos con tamaño entre 0.15 y 1.5mm ocupando un 70% de la muestra aproximadamente. Por otro lado, se presentan algunas micas con hábito tabular y exfoliación basal que fueron identificadas como moscovita (*Figura 9 A y B*) y que se encuentran alterando parcialmente a clorita, representando un 4% del total de la muestra.

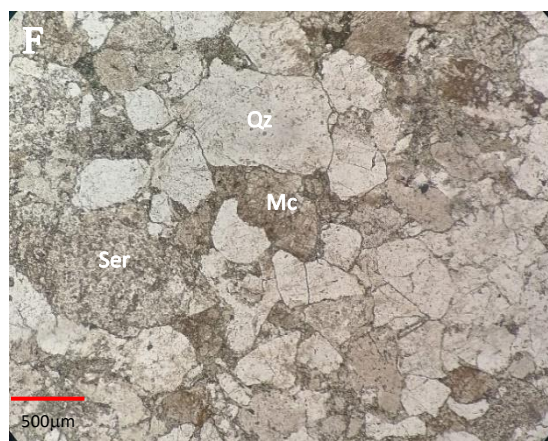
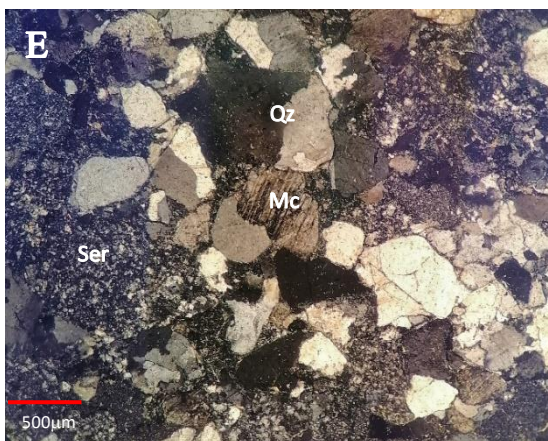
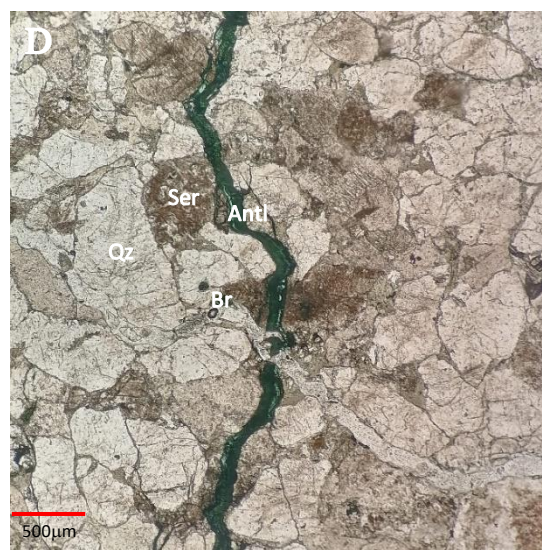
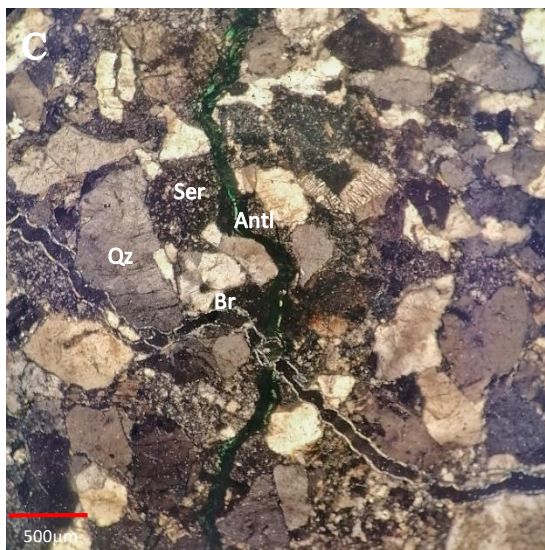
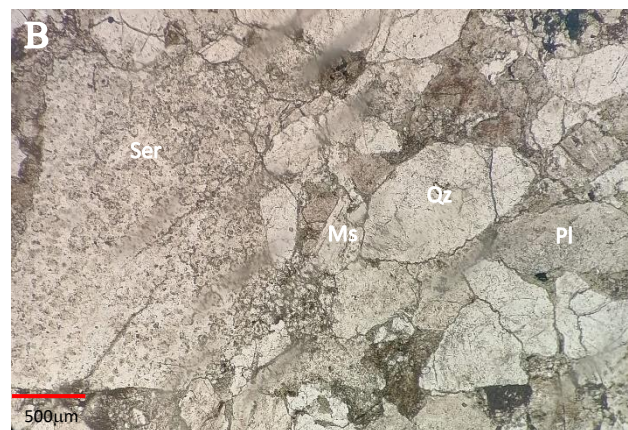
Asimismo, se identificó un mineral verde esmeralda intenso que se observa sobre los intersticios del armazón, relleno de fracturas y en algunos granos más definidos el cual representa un 26% del volumen total de la roca y es clasificado como un mineral de cobre secundario de tipo antlerita y brochantita (*Figura 9 C y D*).

Finalmente se observaron algunos minerales en menor proporción como lo son algunos óxidos de hierro y pequeños zircones como inclusiones en cuarzos.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 9:

Petrografía óptica de roca sedimentaria, en las cuales se observan en las columnas izquierdas el microscopio en nicols cruzados y en las de la derecha en nicols paralelos. A y B) microfotografía de la arenisca en donde se evidencia el armazón de plagioclasa. C y D) microfotografía con vena de Antlerita. E y F) granos de microclina con macla en enrejado. Pl=plagioclasa, Qz= cuarzo, Ser= sericita, Ms= moscovita, Antl= antlerita, Br= brochantita, y Mc= microclina.



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Figura 10:

Triángulo de clasificación rocas sedimentarias, Pettijohn, (1975).

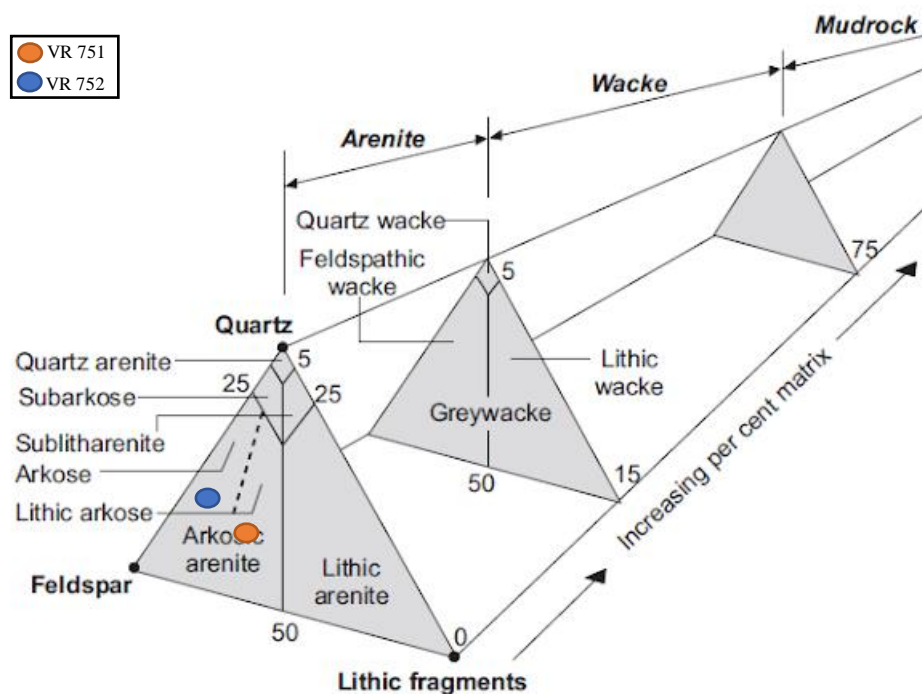
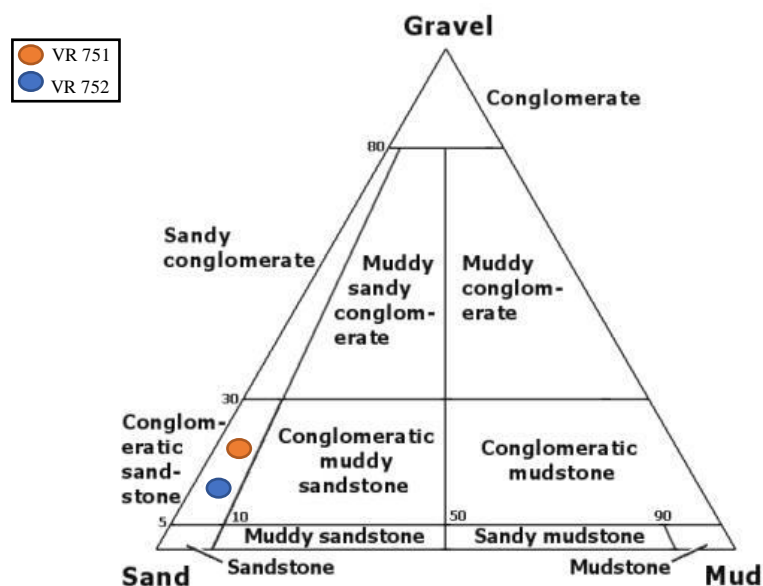


Figura 11:

Triángulo de clasificación textural de rocas sedimentarias, Dickinson (1983).



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

6.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para el desarrollo del proyecto y los análisis especializados de la petrografía se implementó la microscopía electrónica de barrido (SEM) en tres muestras correspondientes a: VR-750, VR-751 y VR-752. Dichas muestras fueron seleccionadas al encontrar algunos minerales desconocidos en la petrografía óptica sobre los cuales se requería mayor información para lograr su óptima identificación, lo cual fue posible mediante la composición elemental cualitativa que arroja este tipo de estudio.

6.2.1 VR-750

Hornblenda

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Mg, Ca, Fe, Al, Si y O, los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de cristales de Hornblenda en esta muestra ígnea.

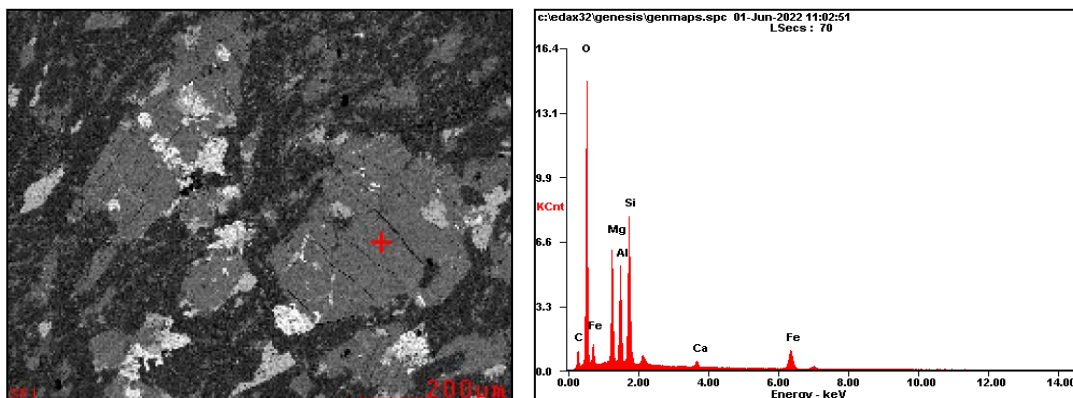
Tabla 2:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Hornblenda para la sección VR-750

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
CK	07.89	13.89
OK	36.88	48.76
MgK	12.37	10.76
AlK	10.14	07.95
SiK	16.20	12.20
CaK	01.16	00.61
FeK	15.37	05.82
Matrix	Correction	ZAF

Figura 12:

Cristales de Hornblenda y diagramas de elementos



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Augita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Ca, Mg, Fe, Al, Si y O, los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de cristales de Augita en esta muestra ígnea. Siendo de este modo, la augita el clinopiroxeno principal encontrado en la roca.

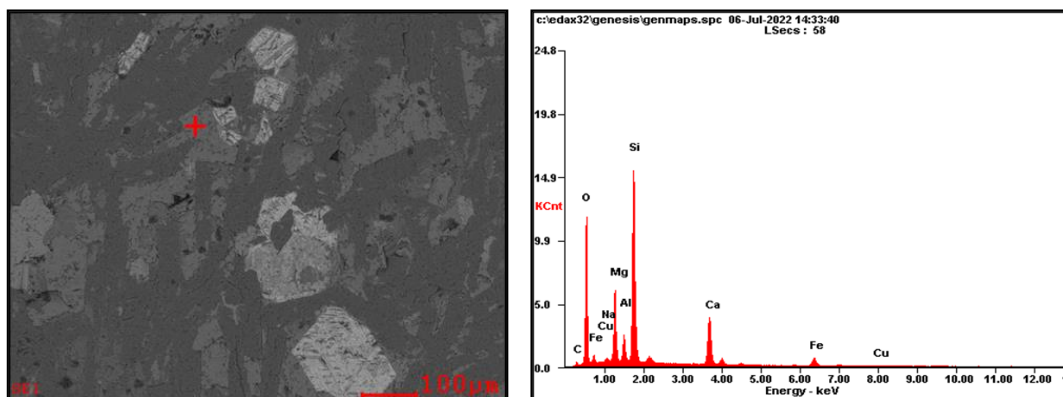
Tabla 3:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Augita para la sección VR-750.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.88	03.60
<i>OK</i>	34.87	50.04
<i>NaK</i>	00.61	00.61
<i>MgK</i>	10.11	09.55
<i>AlK</i>	03.35	02.85
<i>SiK</i>	26.89	21.98
<i>CaK</i>	13.74	07.87
<i>FeK</i>	08.16	03.36
<i>CuK</i>	00.38	00.14
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 13:

Cristales de Augita y diagramas de elementos



Plagioclasa sódica: albita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Na, Si, Al y O, los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de cristales de Plagioclasa sódica que fue clasificada como Albita.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

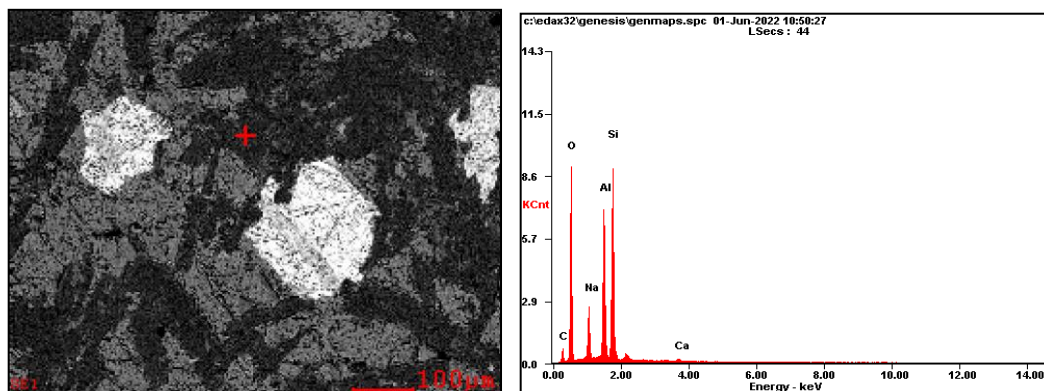
Tabla 4:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Albita para la sección VR-750.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	08.95	14.73
<i>OK</i>	36.91	45.62
<i>NaK</i>	07.23	06.22
<i>AlK</i>	18.98	13.91
<i>SiK</i>	27.22	19.17
<i>CaK</i>	00.70	00.35
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 14:

Cristales de Albita y diagramas de elementos



Mineral accesorio: apatito

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Ca, P, y O, los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de cristales de Apatito en la muestra.

Tabla 5:

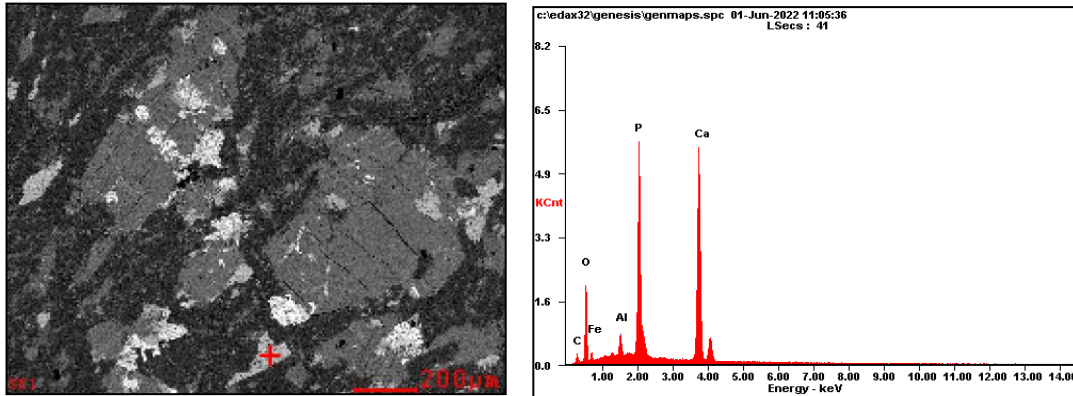
Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Apatito para la sección VR-750.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.18	07.14
<i>OK</i>	23.91	40.23
<i>FeL</i>	07.02	03.38
<i>AlK</i>	02.00	01.99
<i>PK</i>	22.06	19.17
<i>CaK</i>	41.83	28.09
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 15:

Cristales de Apatito y diagramas de elementos



Mineral accesorio: titanita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Ca, Ti, y Si, los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de cristales de Titanita en la muestra.

Tabla 6:

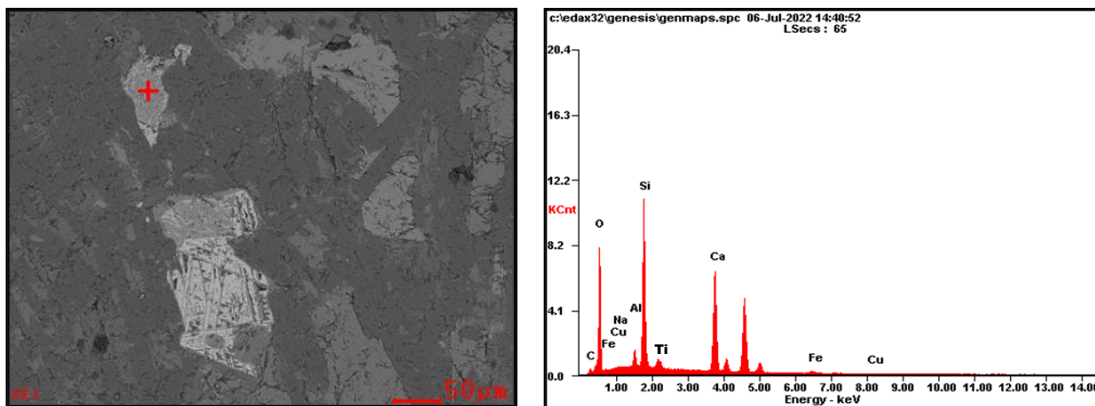
Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Titanita para la sección VR-750.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.17	04.08
<i>OK</i>	41.90	59.05
<i>NaK</i>	00.38	00.38
<i>AlK</i>	02.17	01.81
<i>SiK</i>	21.30	17.10
<i>CaK</i>	29.29	16.48
<i>FeK</i>	02.49	01.00
<i>CuK</i>	00.30	00.11
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 16:

Cristales de Titanita y diagramas de elementos



Minerales opacos: magnetita e ilmenita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Fe, O, y Ti, sobre los cuales se concluyó la presencia de 2 especies de minerales opacos, una de ellas con cantidades considerables de Ti, Fe y O, la cual fue clasificada como Ilmenita y la otra que solo estaba compuesta por Fe y O que fue clasificada como Magnetita. Sin embargo, es necesario aclarar que el microscopio electrónico de barrido se encontraba con falencias en el momento de cuantificar el Ti en la muestra, por lo cual se sabe de la presencia de este elemento debido al pico generado y la interpretación del experto a cargo del manejo del microscopio.

Tabla 7:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de A) Ilmenita y B) Magnetita para la sección

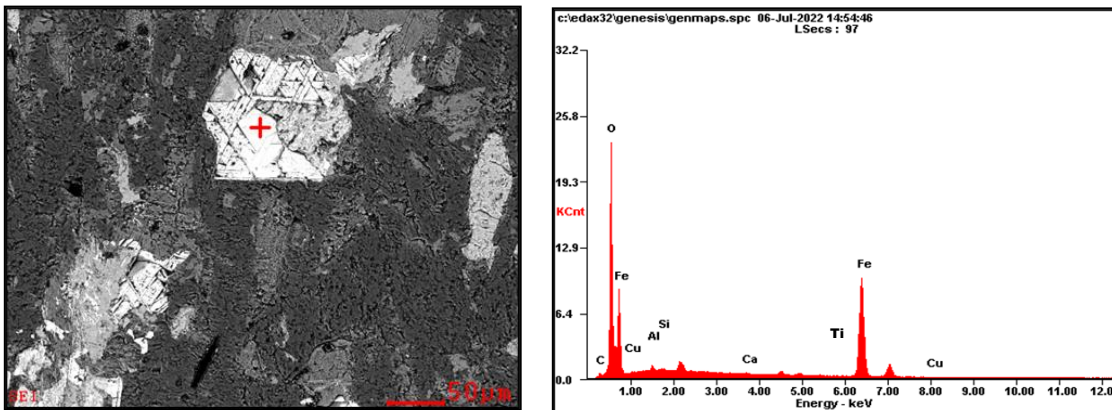
A)			B)		
<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>	<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.13	03.30	<i>CK</i>	02.03	05.31
<i>OK</i>	21.55	47.37	<i>OK</i>	27.06	53.15
<i>AlK</i>	00.68	00.89	<i>NaK</i>	00.21	00.29
<i>SiK</i>	00.24	00.31	<i>AlK</i>	01.58	01.84
<i>CaK</i>	00.13	00.11	<i>SiK</i>	00.96	01.08
<i>FeK</i>	75.95	47.84	<i>CaK</i>	00.16	00.13
<i>CuK</i>	00.32	00.18	<i>FeK</i>	67.32	37.87
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF	<i>CuK</i>	00.67	00.33
			<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

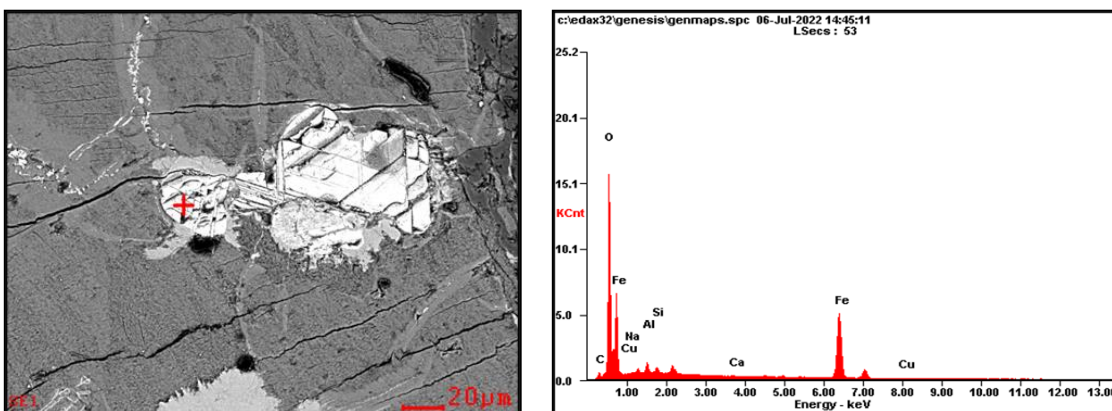
Figura 17:

Cristales de A) Ilmenita y B) Magnetita y diagramas de elementos

A)



B)



6.2.2 VR-751

Antlerita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Cu, S y O los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de granos y venas de Antlerita.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

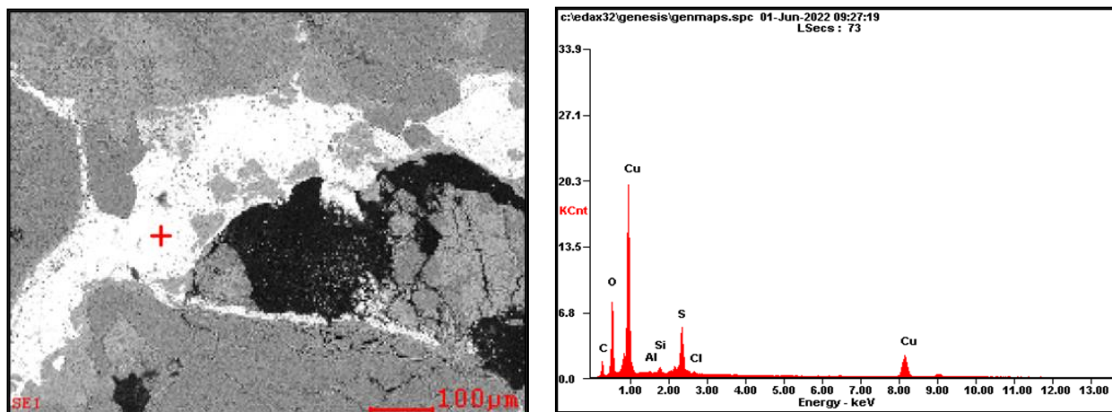
Tabla 8:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Antlerita para la sección VR-751.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	09.54	24.72
<i>OK</i>	17.36	33.78
<i>AlK</i>	00.40	00.46
<i>SiK</i>	01.01	01.11
<i>SK</i>	09.56	09.28
<i>ClK</i>	00.51	00.45
<i>CuK</i>	61.63	30.20
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 18:

Cristales de Antlerita y diagramas de elementos



Calcosiderita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Cu, P y O los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de granos y venas de Calcosiderita.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

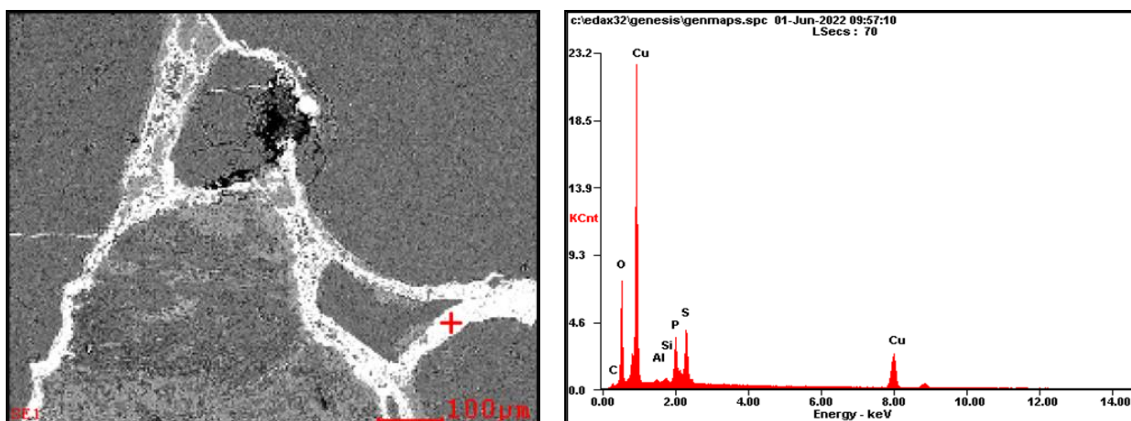
Tabla 9:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Antlerita para la sección VR-751.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.84	02.68
<i>OK</i>	15.50	37.06
<i>AlK</i>	00.35	00.49
<i>SiK</i>	00.61	00.83
<i>PK</i>	06.81	08.41
<i>SK</i>	08.25	09.84
<i>CuK</i>	67.64	40.71
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 19:

Cristales de Calcosiderita y diagramas de elementos



Alteración de albita a sericita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Si, Al y O, además de una disminución notable en el contenido de Na, por lo cual al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de sericita, es decir, una alteración propia de la plagioclasa sódica (Albita) existente en la muestra.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

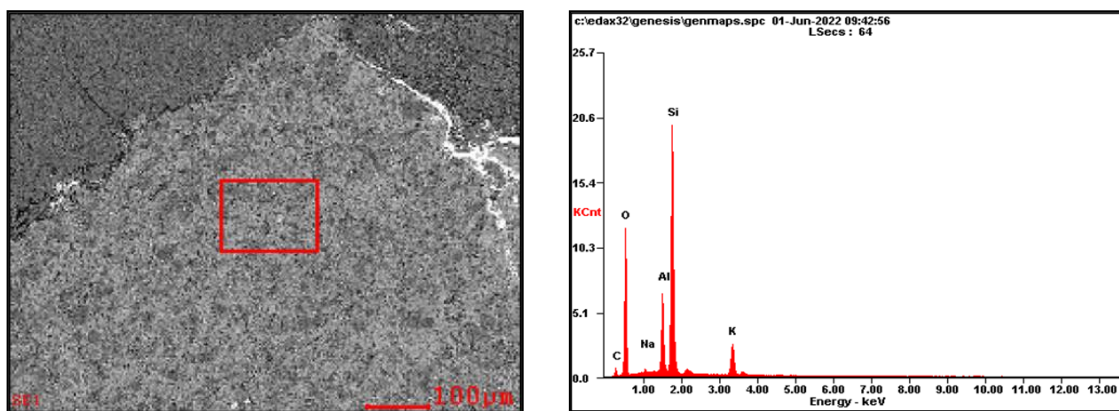
Tabla 10:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Sericita para la sección VR-751.

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	05.39	09.48
<i>OK</i>	36.95	48.76
<i>NaK</i>	00.54	00.50
<i>AlK</i>	11.00	08.61
<i>SiK</i>	36.63	27.53
<i>KK</i>	09.48	05.12
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 20:

Cristales de Sericita y diagramas de elementos



Microclina

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para K, Si, Al y O, por lo cual al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de Microclina en la muestra analizada.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

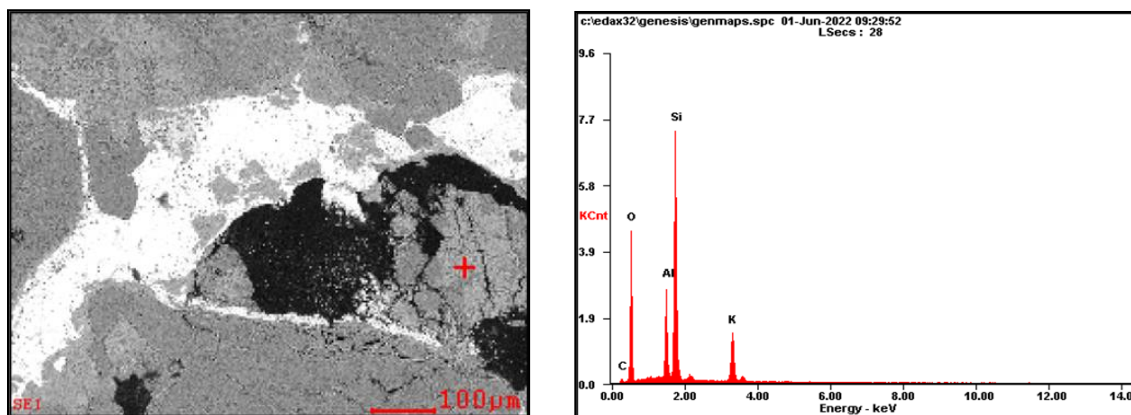
Tabla 11:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Microclina para la sección VR-751.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	02.25	04.10
<i>OK</i>	37.92	51.88
<i>AlK</i>	11.63	09.43
<i>SiK</i>	34.62	26.99
<i>KK</i>	13.58	07.61
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 21:

Cristales de Microclina y diagramas de elementos



6.2.3 VR-752

Alteración de moscovita a clorita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Mg, Fe, Si, Al y O los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de granos de Clorita en la muestra. Es importante mencionar también la presencia de Cu dentro de la composición elemental del mineral, ya que es este el elemento principal de la mineralización.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

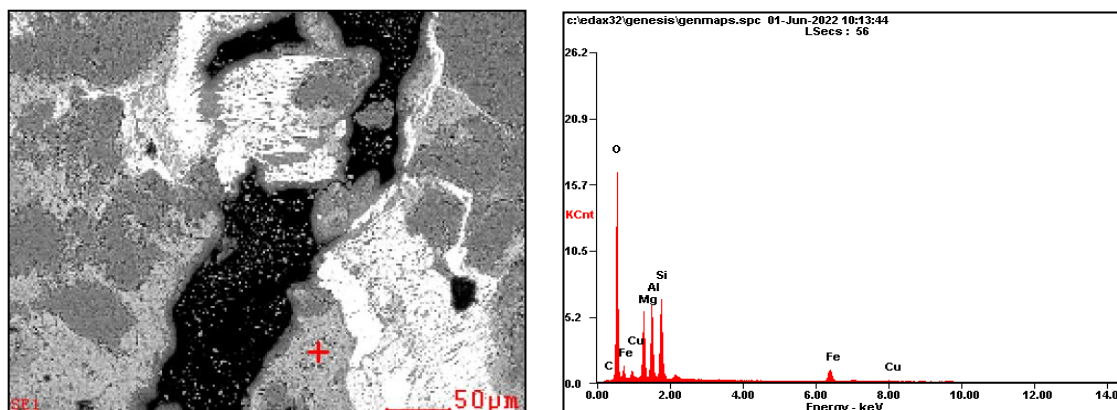
Tabla 12:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Clorita para la sección VR-752.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	00.77	01.47
<i>OK</i>	38.99	55.54
<i>MgK</i>	11.79	11.05
<i>AlK</i>	13.69	11.56
<i>SiK</i>	15.74	12.77
<i>FeK</i>	15.90	06.49
<i>CuK</i>	03.12	01.12
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 22:

Cristales de Clorita y diagramas de elementos



Antlerita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Cu, S y O los cuales al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de granos y venas de Antlerita.

Tabla 13:

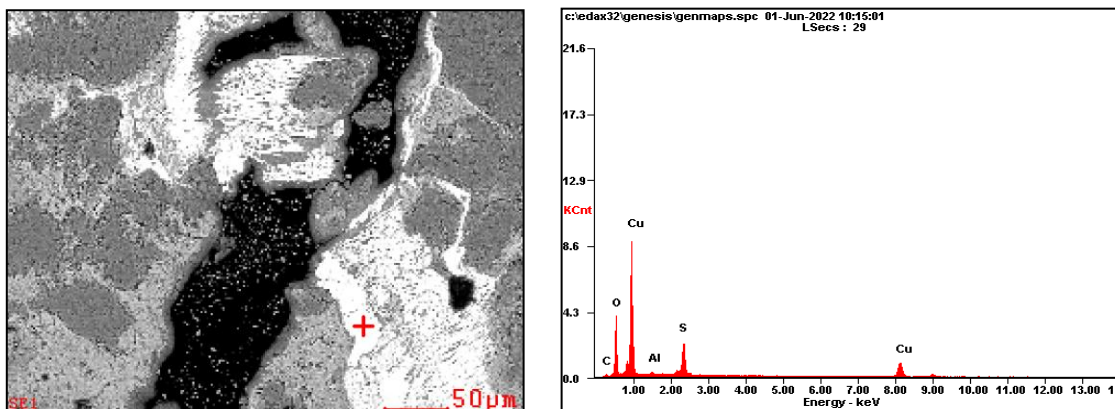
Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Antlerita para la sección VR-752.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.30	03.89
<i>OK</i>	19.65	44.33
<i>AlK</i>	00.85	01.14
<i>SK</i>	11.14	12.53
<i>CuK</i>	67.06	38.09
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 23:

Cristales de Antlerita y diagramas de elementos



Alteración de albita a sericita

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para Si, Al y O, además de una disminución notable en el contenido de Na, por lo cual al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de sericita, es decir, una alteración propia de la plagioclasa sódica (Albita) existente en la muestra.

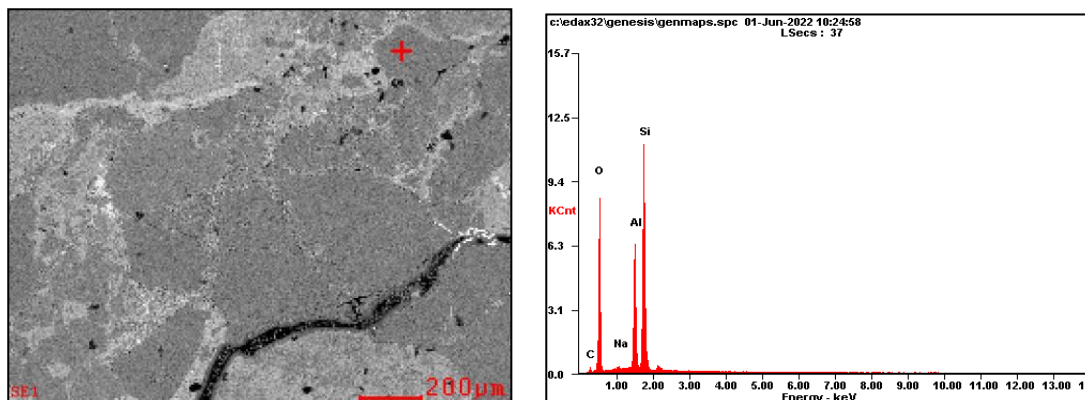
Tabla 14:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Sericita para la sección VR-752.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	03.73	06.42
<i>OK</i>	39.82	51.43
<i>NaK</i>	00.38	00.34
<i>AlK</i>	18.34	14.04
<i>SiK</i>	37.73	27.76
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 24:

Cristales de Sericita y diagramas de elementos



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Microclina

A partir de los resultados, se identificaron valores de porcentaje en peso (Wt%) altos para K, Si, Al y O, por lo cual al correlacionarse con la información obtenida de los análisis petrográficos se lograron interpretar como la composición elemental necesaria para la formación de Microclina en la muestra analizada.

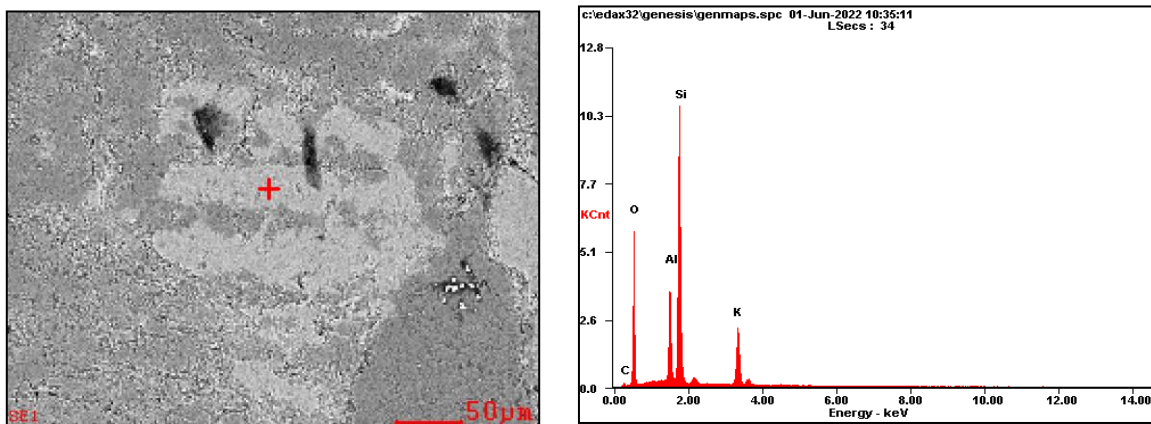
Tabla 15:

Tabla de Wt% y At% para el diagrama elemental de Microclina para la sección VR-752.

<i>Elementos</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	01.13	02.11
<i>OK</i>	36.60	51.21
<i>AlK</i>	12.14	10.07
<i>SiK</i>	35.19	28.05
<i>KK</i>	14.94	08.56
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Figura 25:

Cristales de Microclina y diagramas de elementos



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

6.3 Difracción de rayos X (DRX)

En el presente estudio de laboratorio se examinaron tres (3) muestras, que corresponden a VR-750, VR-751 y VR-752 sobre las cuales se realizaron 2 etapas: una correspondiente a un análisis cualitativo y otra correspondiente a un análisis cuantitativo. La primera de ellas se trata de una identificación cualitativa de fases minerales para determinar a mayor detalle los componentes de las rocas, para ello fue necesario el software Diffrac.Eva sobre el cual se trabajaron las bases de datos PDF-2 de 2021 del International Center for Diffraction Data (ICDD). En una segunda etapa, y teniendo en cuenta los resultados arrojados del análisis cualitativo, fue necesario el software Topaz para comparar la firma espectral creada por los minerales identificados y la firma original generada por el estudio de difracción de rayos X, buscando generar el menor error posible entre las dos e identificando los porcentajes de cada mineral en la roca.

6.3.1 VR-750

De acuerdo con las firmas del difractograma, se reconocieron minerales como albita, augita, hornblenda, clorita, diópsido y apatito principalmente. Además, fue posible identificar calcosiderita, mineral que no había sido previamente reconocido en análisis petrográficos y de microscopia electrónica de barrido (SEM).

Tabla 16:

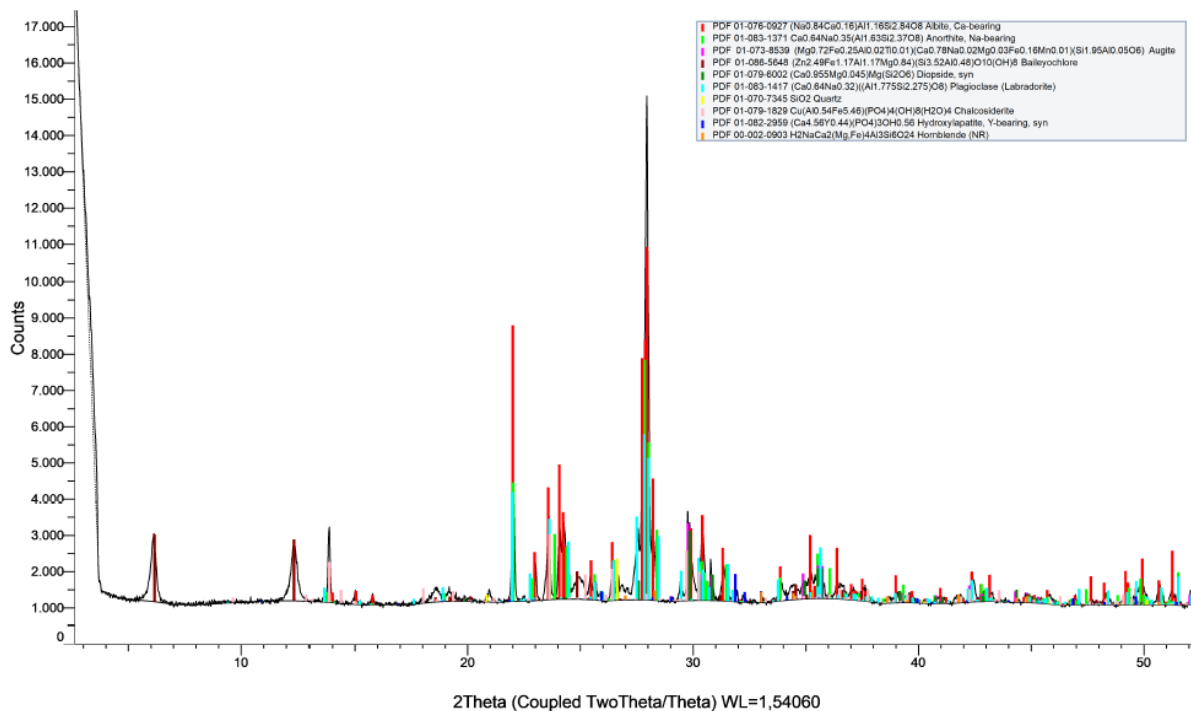
Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra VR-750

Nombre	Fórmula	Sistema	N° de PDF
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Triclínico	PDF 01-076-0927
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Triclínico	PDF 01-083-1371
Augita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$	Monoclínico	PDF 01-073-8539
Baileycloro	$(\text{Zn},\text{Fe}^{2+},\text{Al},\text{Mg})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Triclínico	PDF 01-086-5648
Diópsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	Monoclínico	PDF 01-079-6002
Cuarzo	SiO_2	Trigonal	PDF 01-070-7345
Calcosiderita	$\text{CuFe}^{3+}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Triclínico	PDF 01-079-1829
Hidroxiapatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$	Hexagonal	PDF 01-082-2959
Hornblenda	$\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_5(\text{Al},\text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Monoclínico	PDF 00-002-0903

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Figura 26:

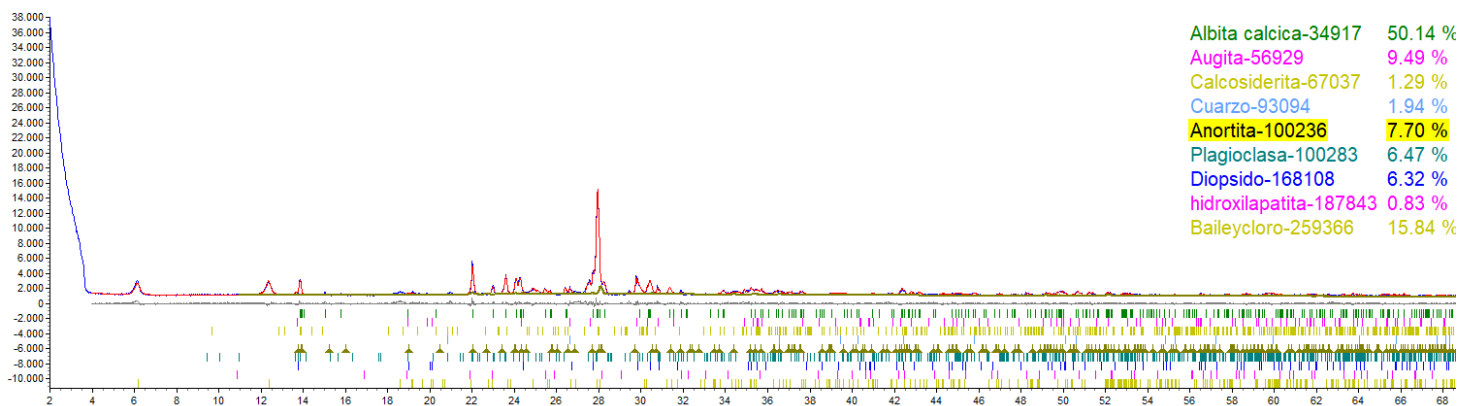
Difractograma de la muestra VR-750 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra.



A partir del análisis cuantitativo de la muestra se lograron identificar como minerales mayoritarios la albita, augita, baileycloro y anortira y como minerales minoritarios pero que poseen cantidades significativas a la labradorita, diópsido, calcosiderita, cuarzo e hidroxiapatito.

Figura 27:

Análisis cuantitativo de la muestra VR-750



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

6.3.2 VR-751

De acuerdo con las firmas del difractograma, se reconocieron minerales como cuarzo, microclina, albita, baileycloro y antlerita principalmente. Además, fue posible identificar brochantita y calcosiderita, minerales que no habían sido previamente reconocidos en análisis petrográficos y de microscopia electrónica de barrido (SEM).

Tabla 17:

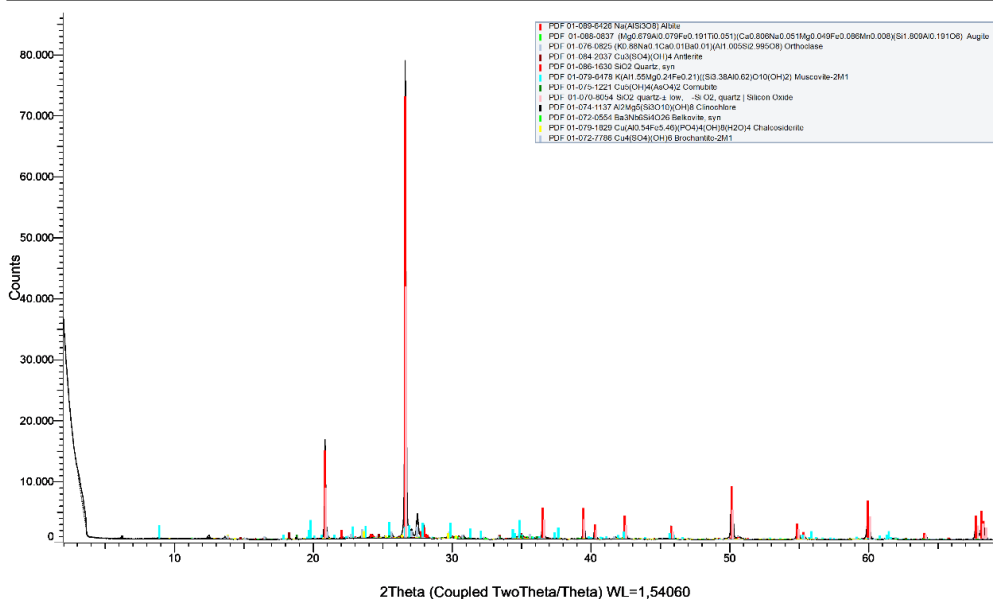
Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra VR-751

Nombre	Fórmula	Sistema	N° de PDF
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Triclínico	PDF 01-070-3752
Cuarzo	SiO_2	Trigonal	PDF 01-086-1560
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Monoclínico	PDF 01-079-6478
Ortoclasa	KAlSi_3O_8	Triclínico	PDF 01-076-0825
Antlerita	$(\text{Cu}^{2+})_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	Ortorrómico	PDF 01-072-6504
Calcosiderita	$\text{CuFe}^{3+}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Triclínico	PDF 01-079-1829
Brochantita	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$	Monoclínico	PDF 00-003-0282
Clinocloro	$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_5\text{Al}((\text{OH})_8/\text{AlSi}_3\text{O}_{10})$	Monoclínico	PDF 01-074-1137

Figura 28:

Difractograma de la muestra VR-751 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra

22041002 (Coupled TwoTheta/Theta)

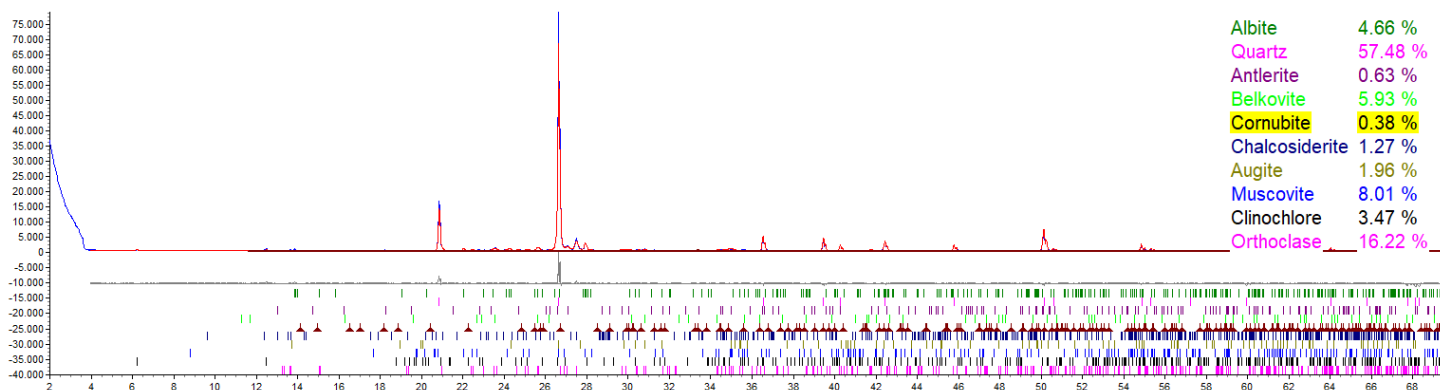


ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

A partir del análisis cuantitativo de la muestra se lograron identificar como minerales mayoritarios el cuarzo, la albita, la microclina, la belkovita y la calcosiderita, y como minerales minoritarios pero que poseen cantidades significativas a la augita, el clinocloro y la cornubita.

Figura 29:

Análisis cuantitativo de la muestra VR-751



6.3.3 VR-752

De acuerdo con las firmas del difractograma, se reconocieron minerales como cuarzo, microclina, albita, baileycloro y antlerita principalmente. Además, fue posible identificar brochantita y tetrahedrita, minerales que no habían sido previamente reconocidos en análisis petrográficos y de microscopia electrónica de barrido (SEM).

Tabla 18:

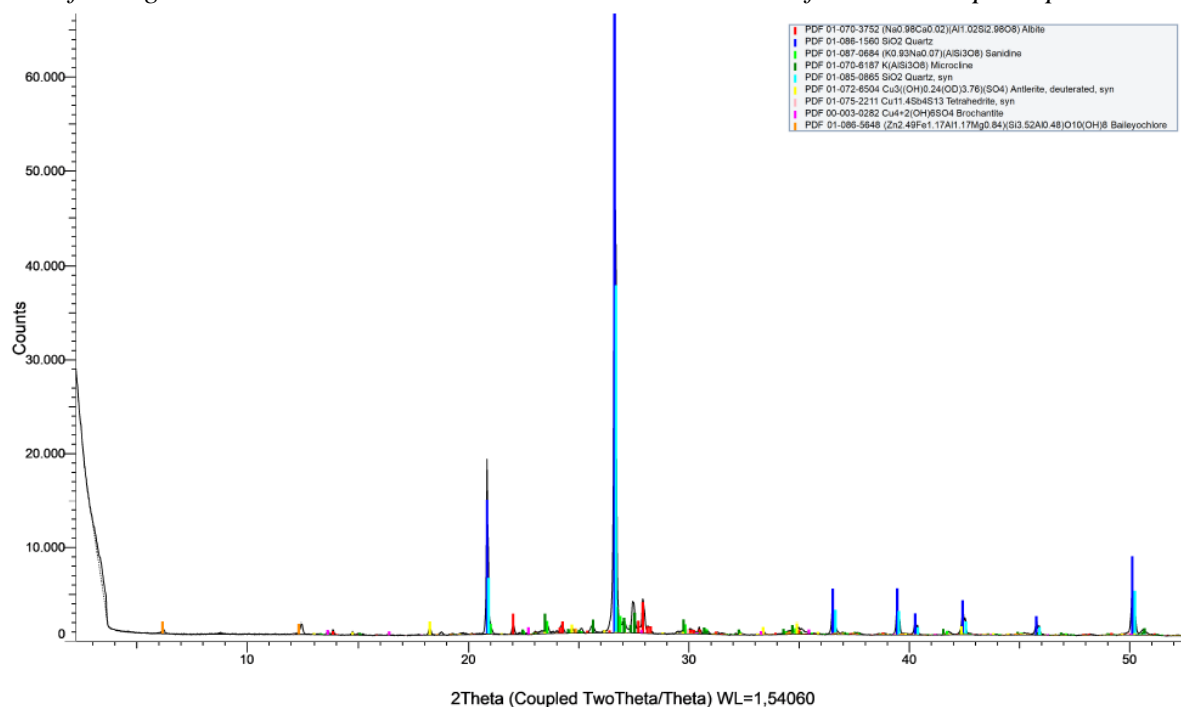
Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF 2021 del International Centre for Diffraction Data (ICDD), de la muestra VR-752

Nombre	Fórmula	Sistema	N° de PDF
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Triclínico	PDF 01-070-3752
Cuarzo	SiO ₂	Trigonal	PDF 01-086-1560
Sanidina	(K,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	Monoclínico	PDF 01-087-0684
Microclina	KAlSi ₃ O ₈	Triclínico	PDF 01-070-6187
Antlerita	(Cu ²⁺) ₃ SO ₄ (OH) ₄	Ortorrómico	PDF 01-072-6504
Tetrahedrita	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	Cúbico	PDF 01-075-2211
Brochantita	Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆	Monoclínico	PDF 00-003-0282
Baileycloro	(Zn,Fe ²⁺ ,Al,Mg) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Triclínico	PDF 01-086-5648

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Figura 30:

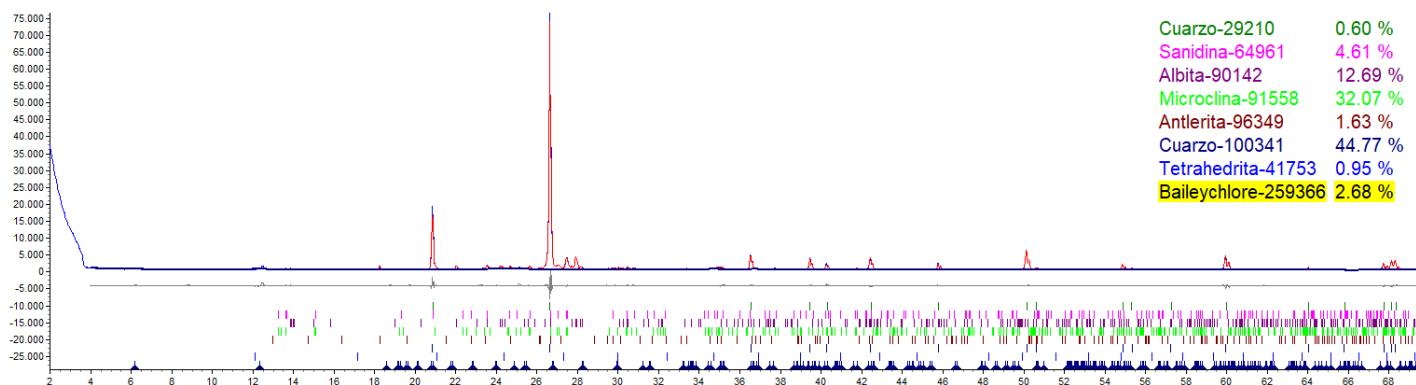
Difractograma de la muestra VR-752 donde se evidencian las firmas de los principales minerales de la muestra



A partir del análisis cuantitativo de la muestra se lograron identificar como minerales mayoritarios el cuarzo, la albita, la microclina y la antlerita y como minerales minoritarios pero que poseen cantidades significativas a la sanidina, el baileycloro y la tetraedrita.

Figura 31:

Análisis cuantitativo de la muestra VR-752



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

6.4 Geoquímica

Para identificar las características elementales de las muestras recolectadas en el estudio y reconocer de este modo la cantidad de cobre presente en el área, se realizaron análisis geoquímicos por medio del laboratorio ALS en donde se desarrollaron estudios de: a) Análisis de roca total, b) Digestión de agua regia con análisis de supertrazas ICP-MS y c) Elementos traza por fusión, en cuatro muestras: VR-750, VR-751, y VR-752.

6.4.1 Geoquímica de elementos mayores, menores y traza

Tabla 19:

Resultados de elementos mayores en las muestras VR 750, VR 751 y VR 752 de Curumaní

Elementos mayores	Muestra VR 750 (%)	Muestra VR 751 (%)	Muestra VR 752 (%)
Al	2,35	0,56	0,97
Ca	1,89	0,06	0,05
Fe	6,38	0,71	1,11
K	0,02	0,11	0,11
Mg	2,61	0,3	0,47
Na	0,06	0,01	0,02
S	<0,01	0,08	0,18
Ti	0,525	0,027	0,041

Para el caso de los elementos menores se tiene en cuenta que, cuando el contenido de cobre sobrepasó los 10.000 ppm se realizó un sobrelímite de estas muestras (VR-752) en el laboratorio, con el fin de identificar el potencial total del mineral.

Tabla 20:

Resultados de sobrelímites en la muestra VR 752 de Curumaní

Elementos menores	Muestra 752 (ppm)
Cu	23800

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Tabla 21:

Resultados de elementos menores en las muestras VR 750, VR 751 y VR 752 de Curumaní

Elementos menores	Muestra VR 750 (ppm)	Muestra VR 751 (ppm)	Muestra VR 752 (ppm)
Cu	20,2	9820	>10000
P	3860	390	280
Mn	625	108	165
Zn	111	18	29
V	141	11	9
Ce	89,7	32,5	31,6
Sr	39,4	20,1	11,4
Li	29,8	9	12,4
Cr	57	7	5
La	38,1	17,6	15,5
Ni	48,8	5,8	9
Ga	12,95	1,87	3,67
Co	26,3	2,4	12,2
Zr	11,7	1,2	1,2
Ba	10	1010	90
Ag	0,02	48,1	19,95
Y	23,8	3,92	3,85
Pb	2,8	2,1	10
Sc	6	0,4	0,5
Th	0,9	1,3	1,3
Cs	0,57	0,47	0,65
Rb	0,7	4,7	5,3
Sn	1,1	<0,2	<0,2
Nb	2,44	0,25	0,18
As	0,7	0,8	0,7
Be	1,27	0,13	0,27
U	0,27	0,35	0,21
Cd	0,03	0,03	0,08
Mo	0,78	1,62	1,87
Hf	0,19	0,06	0,08
Te	<0,01	0,01	0,01
Se	0,2	0,2	<0,2
Ge	0,38	<0,05	<0,05
Bi	0,01	0,07	0,05
In	0,04	0,007	0,006

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

7. Discusión

A continuación, serán discutidos y analizados los resultados obtenidos a partir de estudios macroscópicos, petrográficos, de microscopia electrónica de barrido (SEM) y de difracción de rayos X (DRX) que contribuyen con la identificación del tipo de yacimiento al cual pertenece la mineralización presente en Curumaní, creando un primer resultado preliminar de la zona de estudio.

Tres muestras de roca fueron tomadas en la zona de estudio. La primera corresponde con una roca ígnea extrusiva clasificada como basalto (VER-750), y las otras dos hacen parte de las rocas sedimentarias clasificadas como arcosas (VR-751 y VR-752). La importancia de la muestra de basalto radica en comprobar si esta roca tenía evidencias de ser la fuente de aporte de los metales en el sistema. Dentro de esta muestra fue posible encontrar minerales primarios como plagioclasa, augita, diópsido y hornblenda, minerales accesorios como apatito y finalmente, minerales opacos como la ilmenita y la magnetita. Los análisis de SEM determinaron que el contenido de cobre se encuentra principalmente en los minerales opacos (*Figura 16*) oscilando entre 10 y 30 ppm de Cu. Además, se evidenció una orientación preferencial de los cristales que componen la muestra, marcando su posible dirección de flujo y permitiendo identificar que el origen de esta roca hace parte de un evento volcánico de características máficas y que se relaciona directamente con la formación Noreán.

En las rocas sedimentarias (VR-751 y VR-752) se determinó la presencia de minerales primarios como albita, cuarzo, sanidina y microclina, al igual que minerales secundarios de cobre como antlerita, brochantita y calcosiderita. También se identificaron algunos minerales accesorios como la moscovita y algunos minerales de alteración como la sericita y la clorita. Además, estas rocas se correlacionaron con la formación Rio Negro, aflorante en el municipio de Curumaní.

El análisis de estas muestras se realizó con el fin de identificar la paragénesis mineral y los eventos que dieron paso a la precipitación de los metales que se encuentran ahora hospedados en los intersticios de las arcosas. Para lograr determinar el tipo de yacimiento al cual corresponde el enriquecimiento de cobre encontrado en el sistema sedimentario de Curumaní es necesario tener en cuenta las condiciones bajo las cuales se originaron las formaciones de la zona, es decir, el ambiente de las mismas. Además, se requiere determinar la fuente del cobre, los procesos que

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

permitieron el transporte del mismo, los procesos necesarios para la precipitación del elemento y finalmente las condiciones bajo las cuales se encuentra la roca hospedadora de la mineralización.

La mineralización de cobre reportada consiste en concentraciones de minerales secundarios de tipo antelirita y brochantita (los cuales solo tienen lugar en el sistema si existe un mineral primario de cobre) que se encuentran relacionados con una capa de materia orgánica, que actúa como un agente reductor en los frentes de reducción del sistema. Estos frentes se encuentran a unos metros de la discordancia angular entre la Fm Noreán y la Fm Rio negro, deduciéndose de esta manera que el contexto geológico bajo el cual pudo suceder la precipitación primaria del cobre correspondería a un sistema de tipo REDOX (*Figuras 32, 33 y 34*).

Figura 32:

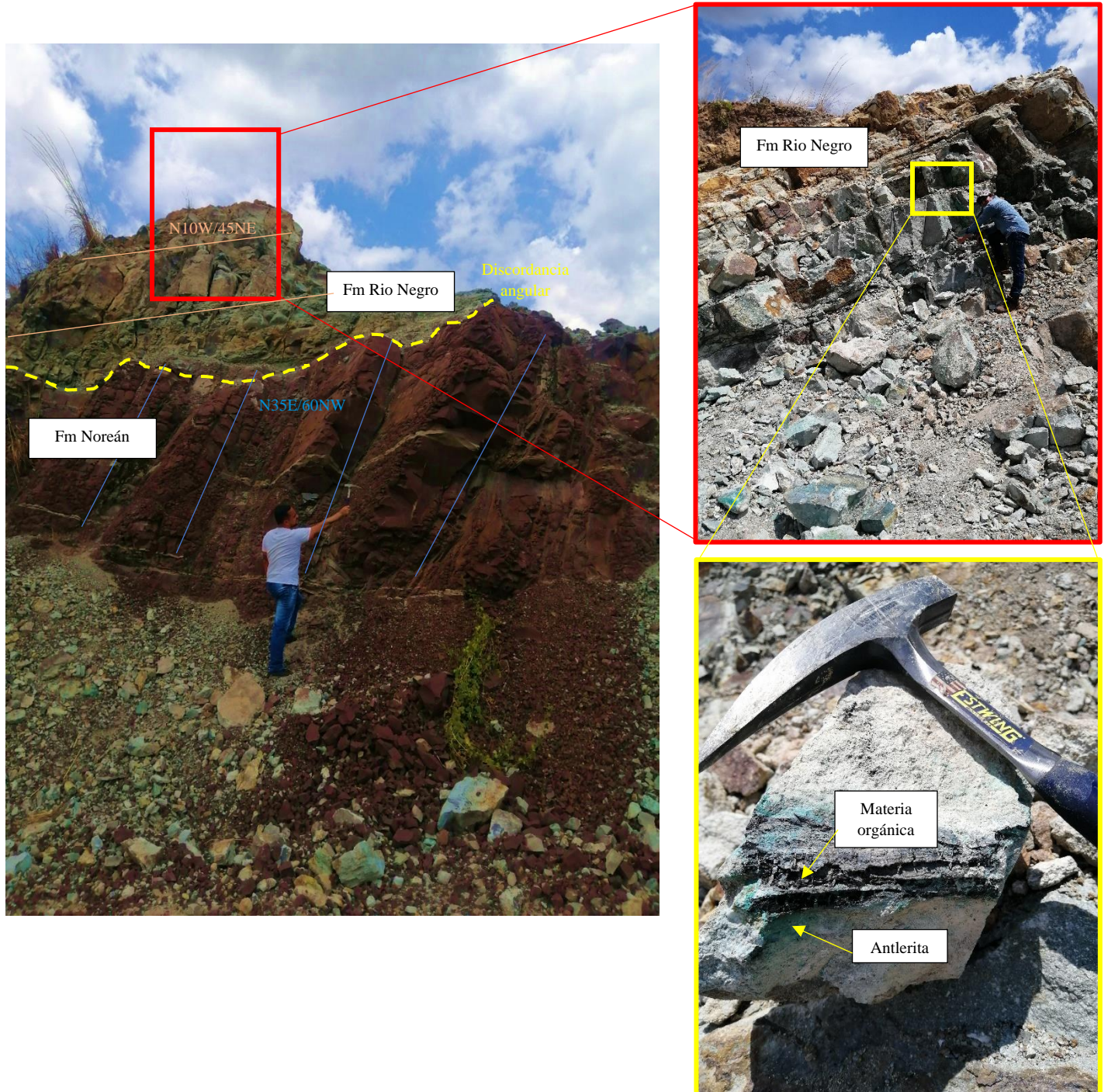
Contacto entre areniscas y basalto de la Fm Noreán en zona perteneciente a VR-750



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 33:

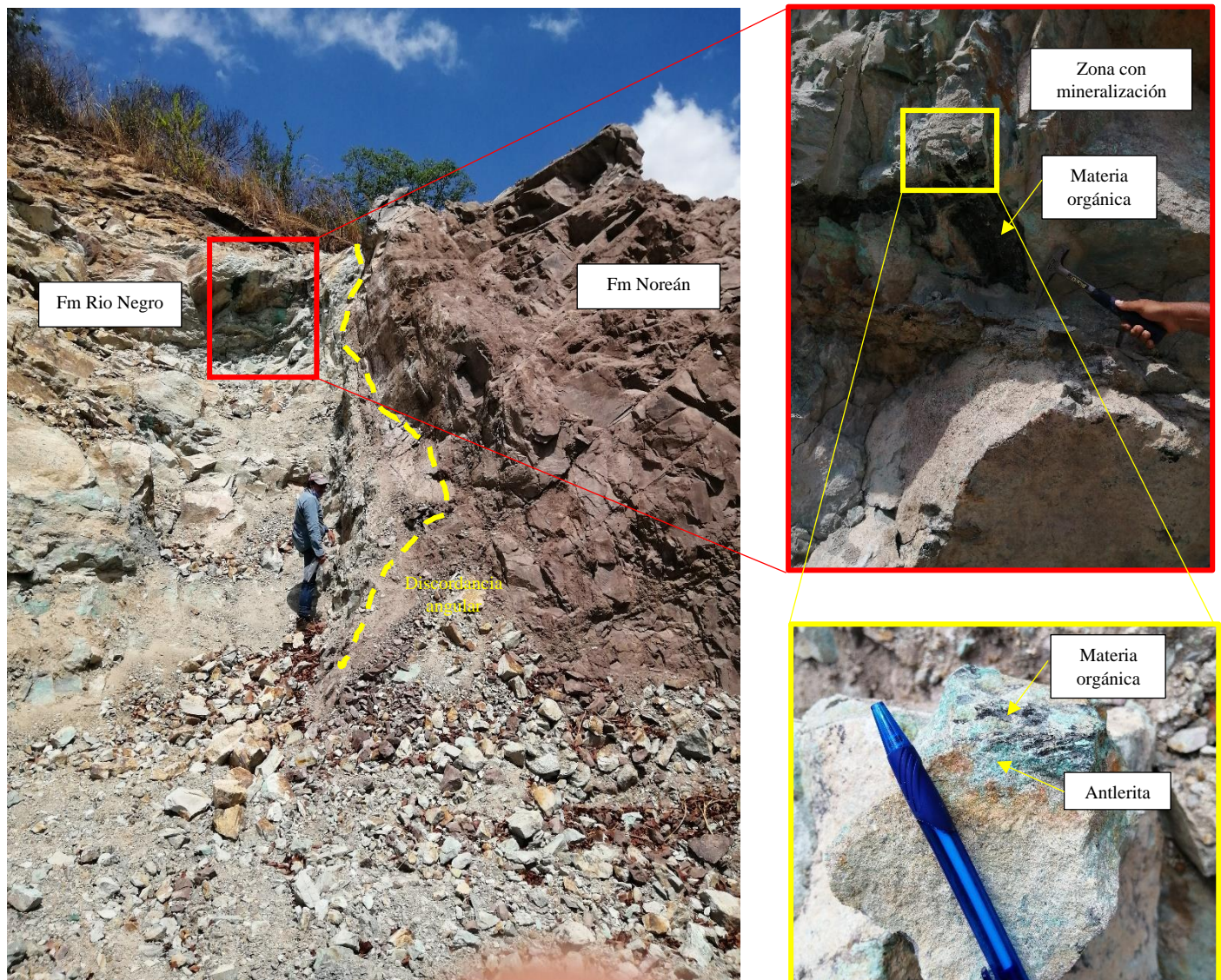
Capas rojizas de fm Noreán en contacto con capas sedimentarias de fm Rio Negro en zona perteneciente a VR-751



ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 34:

Frente REDOX con mineralización de cobre en la fm Rio Negro, en donde se identificaron Antlerita y Magnetita en zona perteneciente a VR-752



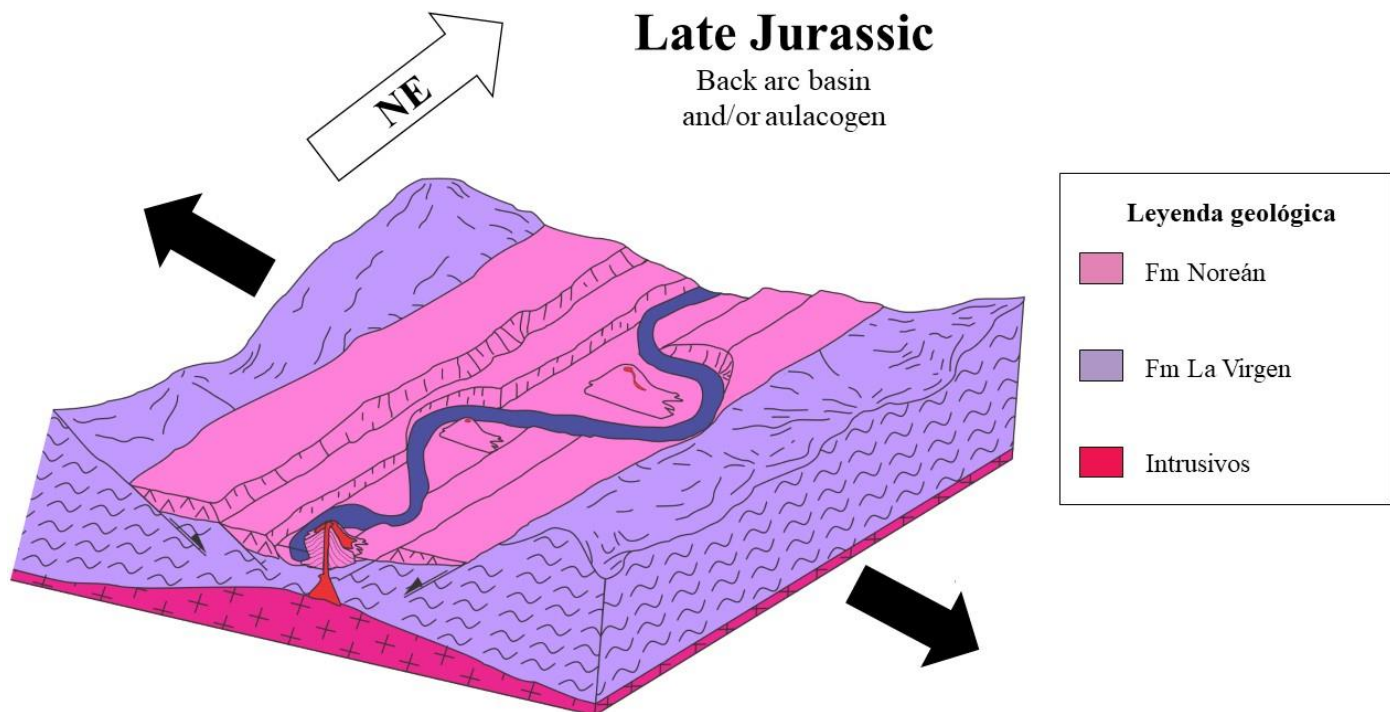
ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Con el fin de comprender la configuración actual del evento de precipitación del cobre, se propone el siguiente evento evolutivo para el sector de Curumaní:

El ambiente extensivo en el cual se depositaron las capas rojizas de la Fm Noreán se interpreta como el producto de un evento efusivo generado en el marco tectónico que tuvo lugar en la franja NW de la placa Suramericana (Jaillard et al., 1990; Pindell & Erikson 1993; Pindell & Tabut, 1995) y al del rifting asociado al aulacógeno Bolívar durante el jurásico temprano (Cediel & Cáceres, 2000), en donde el magma del manto superior ascendió rápidamente desde una profundidad no mayor a 30km a través de una corteza continental adelgazada (*Figura 35*) formando los basaltos reportados en la muestra VR750.

Figura 35:

Formación de basaltos de la Fm Noreán durante el Jurásico. Fuente: autores



La fuente de aporte del cobre correspondería a la Fm Noreán, pues el resultado del análisis multielemental en esta muestra indicó un empobrecimiento en Cu (20 ppm Cu) en comparación con la abundancia promedio de este elemento en los basaltos (110 ppm Cu) (Misra, 2012), valores que puede ser identificado en la *Tabla 21* y *22*. Adicionalmente, en la sección delgada se

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

evidenció una fuerte oxidación de los minerales opacos (dentro de la hornblenda), los cuales son los mayores portadores de cobre en la roca, permitiendo su movilización en forma de Cu^{+2} (Figura 8F).

Tabla 22:

Abundancia promedio de elementos formadores de minerales seleccionados (en ppm) en la corteza continental de la tierra, los principales tipos de rocas y el agua de mar (simplificado de la compilación de Krauskopf y Bird 1995)

Element	Crust (a)	Granite (b)	Diabase (c) (Basalt)	Shale	Seawater (d)
Al	81,300	74,300	79,400	80,000	0.003
Fe	50,000	13,700	76,600	47,200	0.003
Ti	4,400	1,500	9,400	4,600	0.0001
Mn	950	195	1,280	850	0.0002
S	260	58	123	2,240	900
C	200	200	100	1,000	28
V	135	17	264	130	0.0022
Cr	100	20	114	90	0.0003
Ni	75	1	76	68	0.0005
Zn	70	45	86	95	0.0003
Cu	55	13	110	45	0.0002
Co	25	2.4	47	19	1×10^{-6}
Pb	13	48	7.8	20	3×10^{-6}
U	1.8	3.4	0.6	3.7	0.0032
Sn	2	3.5	3.2	6.0	6×10^{-7}
Mo	1.5	6.5	0.6	2.6	0.01
W	1.5	0.4	0.5	1.8	0.0001
Hg	0.08	0.1	0.2	0.4	4×10^{-7}
Ag	0.07	0.05	0.08	0.07	3×10^{-6}

Concentrations of Au and Pt are <0.05 ppm in rocks and <0.00001 ppm in seawater.

(a) "Crust" means the continental crust only, a part of the crust that is assumed to be made up of roughly equal parts of granite and basalt. For the oceanic crust a composition similar to that of average basalt can be assumed.

(b) "Granite" includes silica-rich rocks ranging from alkali granite to granodiorite and their volcanic equivalents.

(c) "Diabase" includes the more common varieties of basaltic lava, diabase, and dolerite.

(d) "Seawater" is an average analysis of deep Atlantic and deep Pacific water.

Las muestras VR-751 y VR-752 corresponden a arcosas porosas y permeables que hacen parte de las facies fluviales y marinas que se depositaron durante el cretácico superior (Cáceres et al, 1980; García, 1990). Para finales de este periodo y comienzos del paleógeno comenzó un evento de regresión marina (Gaona-Narváez et al., 2015), que progresivamente redujo el nivel del mar, promoviendo la depositación de la secuencia marina de la cuenca Cesar-Ranchería (Figura 36), las cuales se identifican principalmente en las calizas de las formaciones Rio Negro, La Luna y Manaure.

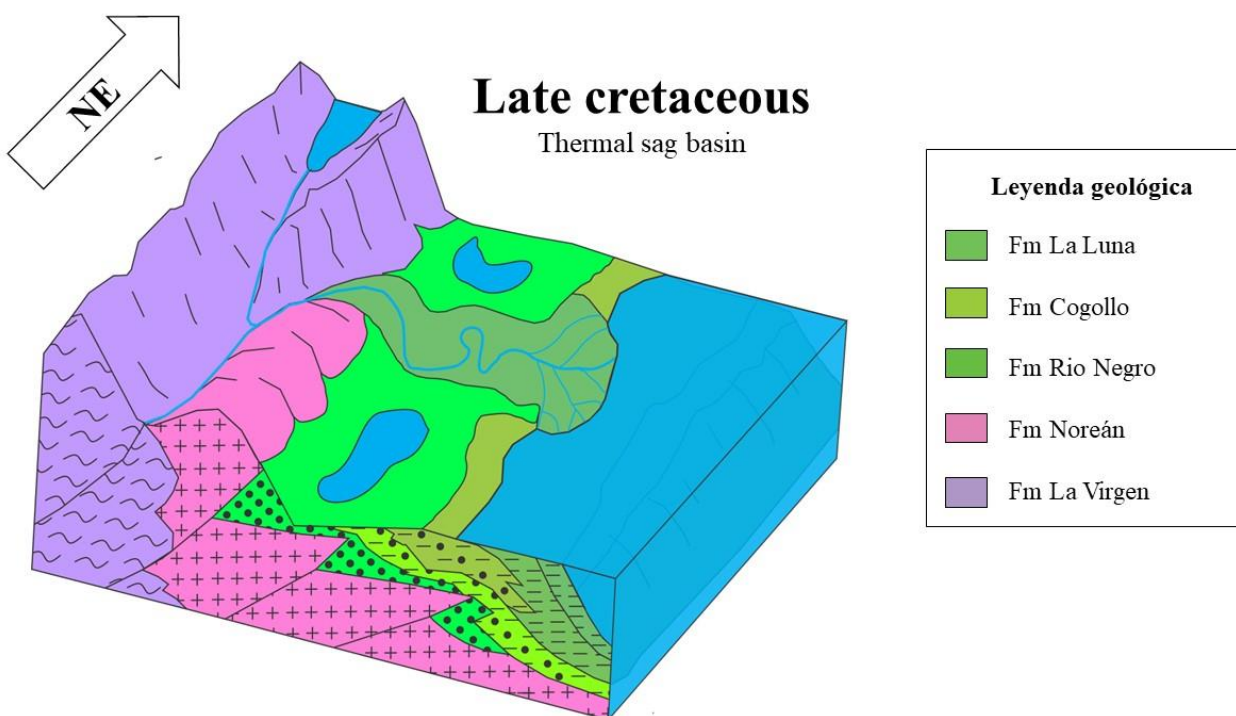
ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Esta cuenca ha sido afectada desde el Maastrichtiano por el movimiento relativo entre las placas del Caribe y Suramérica (Pindell, 1990; Villamil, 1999; Mann et al., 2006), y es el punto en el que convergen la falla de Bucaramanga - Santa Marta y el sistema de fallas de Boconó.

En el área de estudio la formación Noreán se presenta al E limitada por medio de una discontinuidad estratigráfica con la Formación Río Negro del Cretácico Inferior, con la cual presenta una repetición parcial por efecto de la Falla de cabalgamiento de Animito, que las ponen en contacto de nuevo, esta vez suprayaciéndola (Clavijo 1994b).

Figura 36:

Deposición de la secuencia marina de la cuenca Cesar-Ranchería durante el Cretácico. Fuente: autores



Gracias a este escenario tectónico y estratigráfico se propone que durante el paleógeno y neógeno se fragmentaron las litologías que permitieron la circulación de aguas freáticas a baja temperatura y profundidad, las cuales se enriquecieron en salinidad al entrar en contacto con las formaciones de ambiente marino, constituyéndose vehículos idóneos para el transporte de cobre y plata mediante complejos clorurados (Figura 37), generándose las siguientes reacciones:

- 1) $\text{SO}_4^{2-} + \text{CH}_4 = \text{S}^2 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ Reducción de sulfatos
- 2) $2\text{CuCl}_3^{2-} + \text{S}^2 = \text{Cu}_2\text{S} + 6\text{Cl}^- \rightarrow$ Mineralización de sulfuros de Cu
- 3) $2\text{CuCl}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-} + \text{CH}_4 = \text{Cu}_2\text{S} + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 6\text{Cl}^- \rightarrow$ Mezcla de fluidos

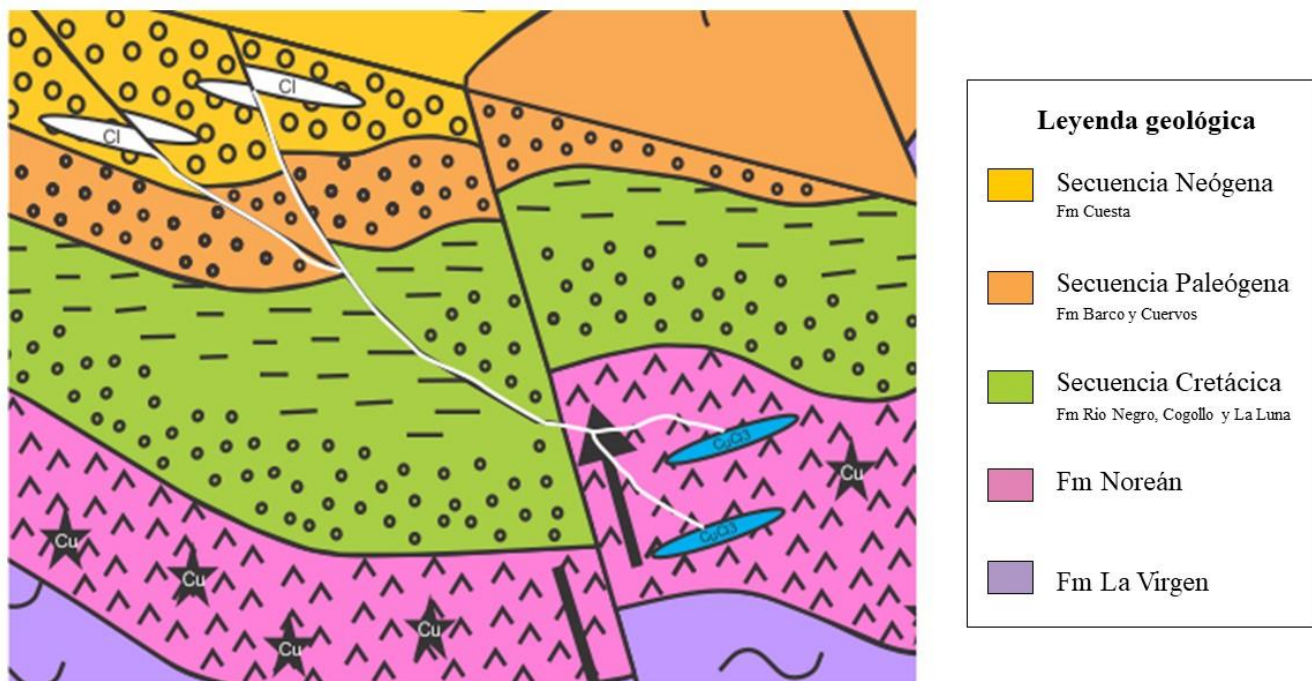
ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

La removilización del cobre fue posible gracias procesos de oxidación generados por los mismos fluidos circulantes en la que se considera la roca fuente (Fm Noreán), encontrando evidencias claras de esto en la sección delgada perteneciente al basalto VR-750 (*Figura 8F*), en donde se identificó la oxidación de los minerales opacos localizados dentro de la hornblenda, y a los resultados litogeoquímicos que mostraron un empobrecimiento de cobre.

Figura 37:

Aporte de salinidad al sistema durante el Neógeno. Fuente: autores

Neogene



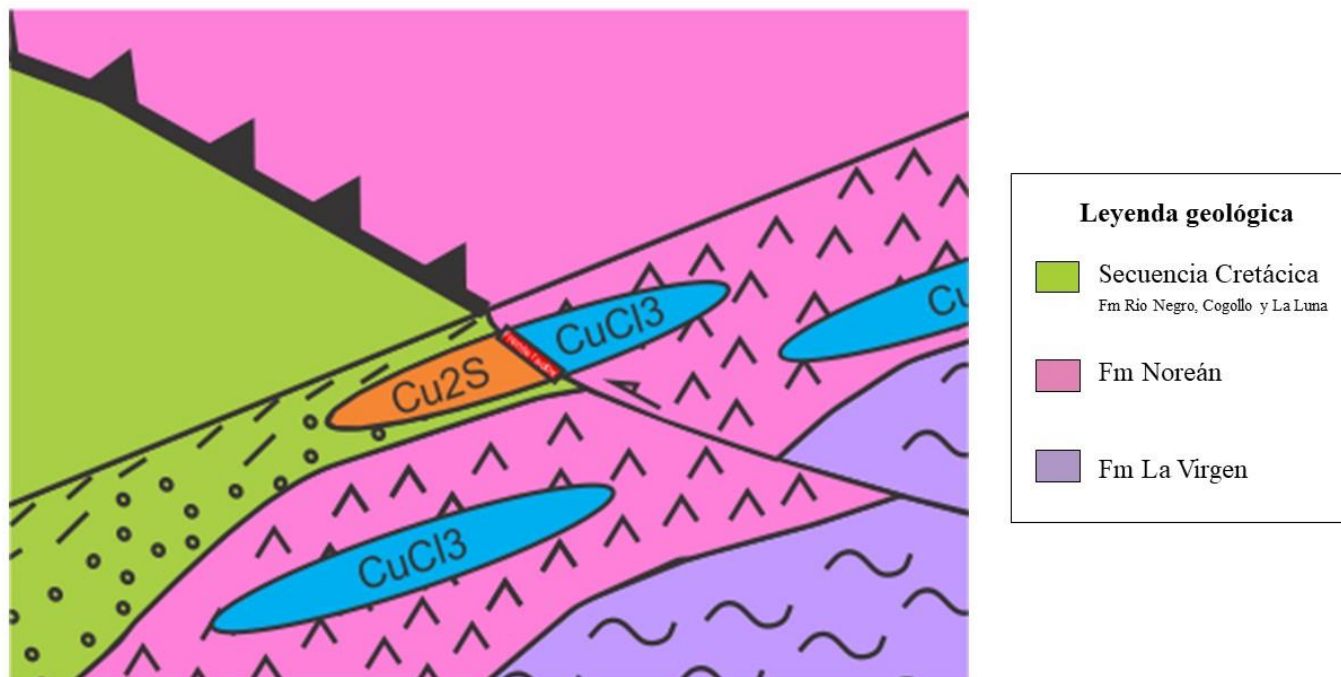
Los fluidos mineralizados viajaron hasta las capas de materia orgánica presente en las rocas sedimentarias de la roca huésped (Fm Rio Negro), las cuales sirvieron como trampa e incentivaron la precipitación de calcosina, calcopirita y bornita. En periodos más actuales, con eventos de oxidación más fuertes y gracias a la percolación de aguas freáticas, se ha removilizado el cobre de esta mineralización primaria hacia los intersticios de las arcosas (en forma de relleno y cemento), formando una alteración supérgena en donde cristalizaron óxidos y fosfatos de cobre como la antlerita, brochantita y calcosiderita.,

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Figura 38:

Funcionamiento del sistema REDOX para la precipitación de metales. Fuente: autores

Frente REDOX

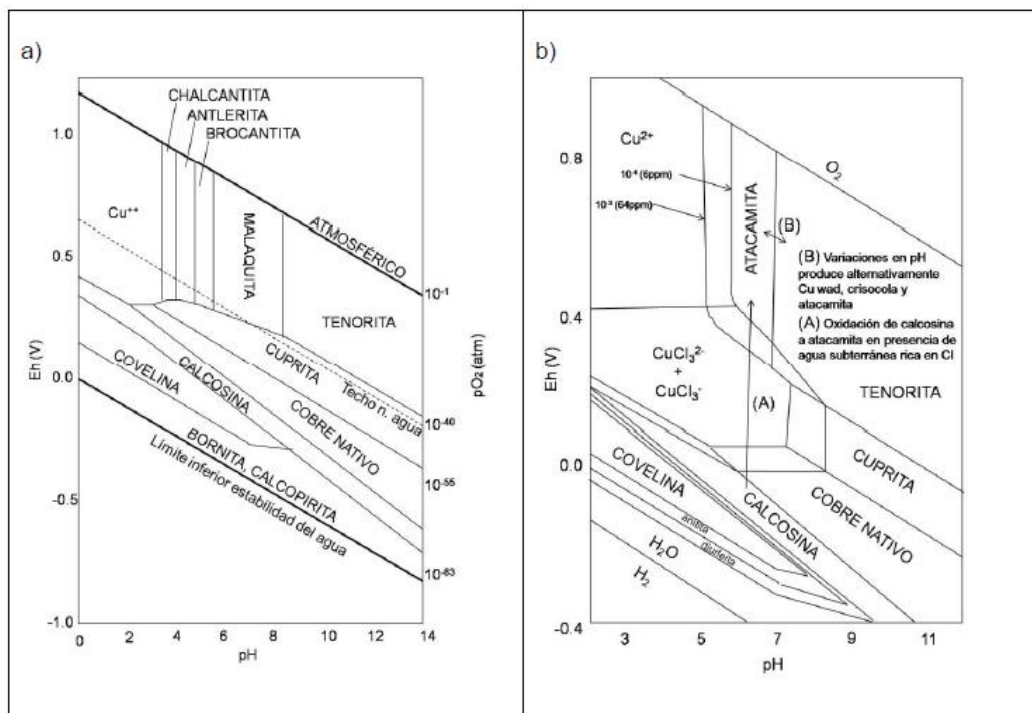


Teniendo en cuenta las relaciones observadas en las secciones delgadas entre los rellenos de la mineralización secundaria de cobre, se establece que primero se dio la precipitación de antlerita y posteriormente la de brochantita (*Figura 10D*). Se interpreta gracias a los diagramas de estabilidad de óxidos de cobre propuestos por Rodríguez (1980) (*Figura 39*) las condiciones bajo las cuales se formaron estos minerales, teniendo primero un pH entre 4 y 6 y potencial de oxidación mayor a 0,5 y luego aumentos leves de pH neutro a alcalino (*Figura 39 A*), ya sea por soluciones con baja concentración de cobre o por soluciones con una concentración alta de sílice y baja de otros aniones.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Figura 39:

Diagramas de estabilidad de óxidos de cobre. a) Diagrama pH-Eh del sistema Cu-O-H-S-Fe a 25°C y 1 atm. b) Diagrama pH-Eh del sistema Cu-O-H-S-Cl a 25°C con $\Sigma S=10^{-4}$ m y $Cl=0,5$ M (Rose, 1976).



El sistema de mineralización que fue descrito anteriormente se presenta como un análogo de lo descrito por Rodríguez (1986) en la investigación llamada “Genesis y mineralogía de los depósitos de cobre del Táchira nororiental, Venezuela”, en donde se plantea que los conglomerados basales de la Formación Rio Negro se presentan como una típica franja mineralizada que se extiende a lo largo del contacto con la Formación La Quinta (correlacionada estratigráficamente según Maze (1984) con la formación Noreán en Colombia). Además, se establece que la mineralización se presenta en forma diseminada, constituyendo microlentes o formando el cemento del material clástico, en donde los sulfuros primarios han sido transformados gracias a la acción de las aguas meteóricas a carbonatos, silicatos y sulfatos de cobre. Finalmente, Rodríguez (1986) concluye que originalmente se pensó que las mineralizaciones asociadas con el conglomerado basal de la Formación Rio Negro solo presentaban depósitos de tipo oxidado, ricos en carbonatos de cobre, sin embargo, perforaciones efectuadas indicaron la presencia de calcosina, calcopirita y bornita asociadas con los clastos de los conglomerados a una profundidad de 150 m. Esto indica claramente que la mena del nivel cuprífero es esencialmente calcopirita, la cual ha sido alterada en cercanías a la superficie.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

A partir de esta referencia se plantea la posibilidad de que exista en la zona de estudio, a una profundidad mayor a 100 m, la mineralización primaria del yacimiento en donde se encontraría la calcopirita y que el enriquecimiento de cobre observado en las muestras de campo pertenezca netamente a una alteración supérgena de esta misma, que la transformó en óxidos de cobre.

La secuencia paragenética fue realizada para las rocas con mineralización cuprífera, estableciéndose de la siguiente forma: 1) Formación de los componentes detríticos como cuarzo, feldespato, micas y materia orgánica propios de la roca sedimentaria huésped de la mineralización epigenética de cobre. 2) Proceso de diagénesis en donde el depósito de arenas se consolida y forma la arcosa 3) Formación de minerales relacionados con el evento de alteración hipógeno como clorita a manera de coronas de reacción en moscovitas, sericita como resultado de alteración de feldespatos y posible formación de calcopirita como mineral primario de Cu 4) Evento de alteración supérgena en donde se formaron minerales secundarios de cobre, como antlerita, brochantita y calcosiderita producto de la oxidación de este elemento a causa de las aguas meteóricas que ingresaron en el sistema.

Tabla 23:

Secuencia paragenética de las rocas mineralizadas VR-751 y VR-752 a partir de las secciones analizadas. Fuente: autores

MINERAL	COMPONENTES DETRÍTICOS	DIAGÉNESIS	EVENTO DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL HIPÓGENO	EVENTO DE ALTERACIÓN SUPERGENA
Cuarzo	-----	-----		
Plagioclasa	-----	-----		
Microclina	-----	-----		
Moscovita	-----	-----		
Materia orgánica	-----	-----		
Clorita			-----	
Sericita			-----	
Calcopirita (?)			----- ? -----	
Antlerita				-----
Brochantita				-----
Calcosiderita				-----

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE CURUMANÍ, CESAR

Finalmente, al recopilar y analizar toda la información expuesta con anterioridad se concluye que el estilo de mineralización correspondiente al enriquecimiento de cobre en el sistema sedimentario del municipio de Curumaní, hace parte de los yacimientos de cobre alojados en sedimentos (SSC), pues su ambiente de formación, fuente del cobre, transporte, precipitación y roca hospedadora concuerda satisfactoriamente con los mismos.

.

8. Importancia económica del cobre en el mercado internacional

El cobre en el mercado internacional ha logrado posicionarse como uno de los metales más apetecidos y con mayores usos dentro de la industria, pues su importancia en el sector minero radica en transformar a la sociedad con sus variadas aplicaciones y en ayudar de este mismo modo, a mejorar las condiciones de vida y el bienestar de las personas que se dedican a su extracción.

El uso masivo del cobre comenzó en 1831, cuando Faraday inventó el generador eléctrico. A partir de entonces, debido a su conductividad, se convirtió en un metal estratégico que solo compite con el oro y la plata, causando que con la llegada de la electrificación en el siglo XX la demanda de este elemento se disparará y desde entonces continúe en aumento. A partir del fin de la segunda guerra mundial la producción del cobre ha crecido con la demanda y de 2 millones de toneladas en 1950, hoy pasa los 17 millones, siendo Chile el principal productor con 5,7 millones de toneladas al año. Lo siguen China con 1,6 millones, Perú es tercero con más de 1,3 millones de toneladas, seguido por EE.UU. con 1 millón y Australia con 990.000. Además, el mayor consumidor de cobre es la Unión Europea, con más de 4 millones de toneladas al año (Unger, 2014).

De acuerdo con este panorama se ha estimado que al paso que crece la demanda, las reservas conocidas no pasarían de 60 años, por lo cual encontrar nuevas fuentes de cobre a nivel mundial se ha convertido en el objetivo de la mayoría de países, al igual que reciclar gran parte del cobre utilizado hoy en día para lograr disminuir la extracción del mismo con el paso de los años.

Por otra parte, los países exportadores de este metal han demostrado que es posible crecer a partir de la explotación de sus riquezas mineras tal como es el caso de Chile, Perú, Canadá, Australia, Estados Unidos, Suecia, Finlandia, Nueva Zelanda, entre otros (Donoso, 2013). En el caso específico de Colombia y teniendo en cuenta que en el año 2019 la UPME destacó que este metal ha venido presentando un crecimiento en los últimos años, se plantea la idea de generar unas condiciones de mercado óptimas para impulsar la producción y la exploración de nuevos yacimientos cupríferos dentro del país, dentro de los cuales la cuenca Cesar-Ranchería constituye uno de los principales focos de interés.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

9. Conclusiones

- Se identificaron 2 tipos de rocas; la primera corresponde con un basalto con textura hipidiomórfica equigranular y orientada, el cual posee una mineralogía principal compuesta por plagioclasa, augita, diópsido y hornblenda, minerales accesorios como apatito y minerales opacos como ilmenita y magnetita. El segundo tipo de roca consiste en arcosas porosas y permeables que están constituidas principalmente de albita, cuarzo, sanidina y microclina. En esta litología se encuentran los minerales que corresponden con el enriquecimiento de cobre del área de estudio, estos son minerales secundarios de cobre como antlerita, brochantita y calcosiderita. Además, se presentan minerales de alteración hidrotermal hipógeno como la sericita y la clorita.
- Las formas en las cuales se observa la mineralización de óxidos de cobre en Curumaní son: reemplazando el cemento de las areniscas mezcladas con material cuarzoso y arcilloso muy fino, rellenando cavidades y creando pequeños cristales aislados producto probablemente de la oxidación de minerales primarios como la calcopirita y calcosina en zonas de mayor permeabilidad.
- Se plantean por lo menos dos posibles eventos de mineralización para el enriquecimiento de cobre, uno de tipo primario en el frente redox causante de la formación de calcopirita, calcosina y bornita (que se hipotetiza son encontradas a más de 100 m de la superficie) y otro de tipo supérgeno, en el cual por acción de aguas meteóricas y demás condiciones oxidantes, la calcopirita y calcosina fueron transformadas en óxidos y fosfatos encontrados en cercanías a la superficie (muestras analizadas en el presente estudio).
- Se concluye que el estilo de mineralización correspondiente al enriquecimiento de cobre en el sistema sedimentario del municipio de Curumaní hace parte de los yacimientos de cobre alojados en sedimentos (SSC).

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

10. Recomendaciones

- Se recomiendan realizar estudios y análisis en zonas ubicadas a mayores profundidades, con el fin de identificar el mineral primario de cobre y corroborar de esta manera si se encuentra un área enriquecida con calcopirita, calcosina y bornita.
- Se sugiere así mismo realizar investigaciones sobre el potencial en mineralizaciones de plata que posee la zona de estudio, ya que se encontraron muestras con hasta 48 ppm de este elemento y según el tipo de yacimiento identificado, sería posible hallar cloruros de plata.
- Se recomiendan concluir los estudios de petrografía y geoquímica a lo largo del contacto fallado entre la formación Noreán y la formación Rio Negro en el municipio de Curumaní, con el fin de comprender y dar continuidad al comportamiento del enriquecimiento de cobre en la zona.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

Referencias bibliográficas

- Agencia Nacional de Minería, «Colombia: Un país Privilegiado - Minería en Colombia», Colombia tierra de oportunidades mineras. [En línea]. Disponible en: <http://mineriaencolombia.anm.gov.co/index.php/es/colombia-un-pais-privilegiado>.
- Arias, A. & Morales, C. J. (1999b). Mapa geológico generalizado del departamento del Cesar [Escala 1:250.000, memoria explicativa]. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería [INGEOMINAS].
- Ayala, R. C. (2009). Análisis tectonoestratigráfico y de procedencia en la subcuenca de Cesar: relación con los sistemas petroleros [Msc. thesis]. Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. & Martínez, J., (2007). Colombian sedimentary basins: nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), Bogotá Colombia.
- Bayona, G., Jaramillo, C., Rueda, M., Pardo, A., Christie, A. & Hernández, G. (2004). Important Paleotectonic and Chronostratigraphic Considerations of the Late Paleocene in the Northernmost Andes as Constrained by Paleocene in the Cerrejón Coal Mine, Guajira, Colombia [Memorias en CD, pág. 14]. Presented at the Tercera Convención Técnica de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Bogotá, Colombia.
- Cáceres, H., Camacho, R. & Reyes, J. (1980): The Geology of the Ranchería basin. In Geotec, ed. 1992, Geological Field-Trips, Colombia 1980-1989 (pp. 1-31). Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo.). Bogotá, Colombia: Colombian Association of Petroleum Geologists and Geophysicists.
- Cediel, F., & Cáceres, C. (2000). Geological Map of Colombia: Geotec Ltd. Bogota, digital format with legend and tectonostratigraphic chart.
- Cediel, F., Shaw, R. P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. En C. Bartolini, R. T. Buffler, & J. F. Blickwede (Eds.), The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics, AAPG Memoir 79 (Vol. 79, pp. p. 815-848). AAPG.
- Cediel, F., Leal-Mejia, H., Shaw, R., Melgarejo, J., & Restrepo-Pace, P. (2011). Regional Geology of Colombia. Petroleum Geology of Colombia. ANH.
- Cediel, F. (2018). Phanerozoic orogens of northwestern South America: cordilleran-type orogens. Taphrogenic tectonics. The maracaibo orogenic float. The chocó-panamá indenter. In Geology and tectonics of northwestern South America (pp. 3-95). Springer, Cham.
- Chaparro, G. A. B., Calvo, R. C. A., Marulanda, C. O., Cardona, A., Valencia, V., Padrón, C. E., ... & Salamanca, J. M. (2009). Estratigrafía y procedencia de las unidades comprendidas entre el Campaniano y el Paleogeno en la subcuenca de Cesar: aportes a la evolución tectónica del área. Geología Colombiana, 34, 3-34.
- Clavijo, J. (1994b). La Formación Noreán: Nueva evidencia de volcanismo explosivo en la paleocuenca del Magdalena (Colombia) y su relación con otras unidades del Jurásico norandino. IX Congreso Latinoamericano de Geología. Caracas, Venezuela
- Colmenares, F., Mesa, A., Roncancio, J., Arciniegas, E., Pedraza, P., Cardona, A., ... & Vargas, (2007). Geología De La Planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33 Y 34. Proyecto: "Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta". Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Ministerio e Ingeominas.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

- Correa-Martínez, A.M., Rodríguez, G., Arango, M.I., y Zapata-García, G. (2019). Petrografía, geoquímica y geocronología U-Pb de las rocas volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander, Colombia. *Boletín de Geología*, 41(1), 29-54. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019002.
- 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.
- Cuéllar Cárdenas, M. A., López Isaza, J. A., Osorio Naranjo, J. A., & Carrillo Lombana, E. J. (2012). Análisis estructural del segmento Bucaramanga del sistema de Fallas de Bucaramanga (sfb) entre los municipios de Pailitas y Curumaní, Cesar-Colombia. *Boletín de Geología*, 34(2), 73-101.
- Doolan, B. L. (1970). The structure and metamorphism of the Santa Marta area, Colombia, South America [Phd. Thesis]. Binghamton, New York, Estados Unidos de América: New York State University.
- Donoso Muñoz, M. J. (2013). El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(2), 248-261.
- ECOPETROL (1998). Evaluación Regional Integrada Cuenca del Valle Inferior del Magdalena Ecopetrol - Informe ejecutivo
- Etayo-Serna, F. et al., (1983). Mapa de terrenos geológicos de Colombia. *Publicación Geológica Especial, Ingeominas*, 14 (1983):1-235. Bogotá.
- Forero, A. (1972). Estratigrafía del Precretácico en el flanco occidental de la Serranía de Perijá. *Geología Colombiana*, 7, 7 – 78.
- Gaona-Narváez, T., Gómez-Tapia, J., & Almanza-Meléndez, M. F. (2015). El Cretácico sedimentario al este de la Falla de San Jerónimo: Compilación para el Mapa Geológico de Colombia. *Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales*, 33, 421-429.
- Garner, A.H., (1926). Suggested Nomenclature and Correlation of the Geological Formations of Venezuela. *Am. Inst. of Mining Metall. Engineers Trans.*, pp. 677- 684. New York
- GEOESTUDIOS LTDA. (2006). Cartografía Geológica Cuenca Cesar – Ranchería Contrato No. 084 de 2005. Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH. 95 pág. Bogotá.
- Gil, A. y Martínez H. (1990) Análisis micro facial del Grupo Cogollo, y Formación La Luna, cuenca Cesar Ranchería, Guajira, Colombia. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Bogotá.
- Harris, P. (28 de abril de 2021). El potencial de la exploración y la explotación que tiene el cobre en la economía del país. *La República*. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/economia/el-potencial-real-que-tiene-colombia-para-la-exploracion-y-explotacion-de-cobre-3160537>
- Hedberg, H. D. (1937). Cretaceous limestone as petroleum source rock in northwestern Venezuela. *Bull. Am. Ass. Petr. Geof*, vol. 15, n° 3, pp 229 . 244.
- Hernández, M. (2003). Geología de la plancha 48 – La Jagua de Ibirico. [Escala 1:100.000, Memoria explicativa]. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería [INGEOMINAS].
- Hernández, O., & Jaramillo, J. M. (2009). Reconstrucción de la historia termal en los sectores de Luruaco y Cerro Cansona-cuenca del Sinu-San Jacinto y en el piedemonte occidental de la Serranía del Perijá entre Codazzi y la Jagua de Ibirico-cuenca Cesar–Ranchería: Bogotá. Colombia, Agencia Nacional de Hidrocarburos.

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

- Higgs, T., Stantic, B., Hoque, M. T., & Sattar, A. (2008). Hydrophobic-hydrophilic forces and their effects on protein structural similarity. In *Suppl. Conf. Proc* (pp. 1-12).
- INGEOMINAS – UIS (2006). Cartografía geológica de 9.600 KM² de la Serranía de San Lucas: planchas 55 (El Banco), 64 (Barranco de Loba), 85 (Simití) y 96 (Bocas del Rosario). (fecha de elaboración, trabajo en proceso de publicación).
- INGEOMINAS. (2010). Cartografía geologica y muestreo geoquimico de la parte norte de la Serrania el Perija, planchas 21, 22, 27, 28, 34 Y 35. Bogota.
- INTERA-BIOSS (1995): Evaluación Regional Cuenca CesarRanchería. Informe Interno Ecopetrol. 190 p. Bogotá.
- Jaillard et al., 1990; Pindell and Erikson 1993; Pindell and Tabut, 1995. Mesozoic rifting and cenozoic basin inversion history of the eastern cordillera, colombian andes Inferences from tectonic models.
- Julivert, M. (1968). *Lexique Stratigraphique International. Amerique Latine. Colombie. Volumen V. Fascicule 4. Paris: Centre Nat. Rech. Scie; 651p.*
- Lozano, E., & Zamora, N. (2014). *Compilación de la cuenca de Cesar–Ranchería.*
- Lugo, J., & Mann, P. (1995). Jurassic-Eocene tectonic evolution of the Maracaibo basin, Venezuela. En *Petroleum Basins of South America, American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir (Vol. 62, pp. 699-725).*
- Mantilla, F. L., Tassinari, C. C., & Mancini, L. H. (2006). C, O, Sr isotope and rare earth elements (REE) study in sedimentary cretaceous rocks from the east cordillera (Dpto. de Santander, Colombia): Paleohydrogeological implications; Estudio de isotopos de C, O, Sr y de elementos de tierras raras (REE) en rocas sedimentarias cretácicas de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander, 28.*
- Max resorce corp. (s.f). “Proyecto CESAR Cobre-Plata”. [En línea]. Disponible en: <https://www.maxresource.com/?cesar>
- Maze, W. (1984). Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perijá, northwestern Venezuela: Geology and tectonic environment of red beds and volcanic rocks. *Geological Society of America Memoir, 162, 263-282.*
- Mesa, A. M., & Rengifo, S. (2011). Cesar Rancheria Basin Vol. 6 (p. 157). Medellín, Colombia: ANH-University EAFIT. Department of Geology.
- Misra, K. (2012). *Understanding mineral deposits. Springer Science & Business Media.*
- Mora, A. & Garcia, A. (2006). Cenozoic tectono–stratigraphic relationship between the Cesar Sub–basin and the southeastern Lower Magdalena Valley Basin of northern Colombia. *Annual Convention American Association of Petroleum Geologists, article 30046, 12 p. Houston, USA.*
- Oszczepalski, S. (1999). Origin of the Kupferschiefer polymetallic mineralization in Poland. *Mineralium Deposita, 34(5), 599-613.*
- PDVSA-INTEVEP. (2008). PDVSA, INTEVEP Lexico estratigrafico de Venezuela. Obtenido de WWW.PDVSA.com/lexico/lexicoh.htm.
- Radelli, L. (1962). Acerca de la geología de la Serranía de Perijá entre Codazzi y Villanueva (Magdalena-Guajira, Colombia). *Geología colombiana, 1, 23-42.*
- Rodríguez, E. (1980). Condiciones de formación de algunos minerales oxidados de cobre. *Revista Geológica de Chile N°9, p. 57-61*
- Rodríguez, S. E. (1986). Génesis y mineralogía de los depósitos de cobre del Táchira Nororiental, Venezuela. *Geología colombiana, 15, 177-184.*
- Royero, J., Clavijo, J., Bernal, L., y Barbosa, G. (1994). *Geología de la Plancha 65-*

ESTUDIO Y ANÁLISIS PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE LAS
MINERALIZACIONES CUPRÍFERAS AFLORANTES EN EL MUNICIPIO DE
CURUMANÍ, CESAR

- Tamalameque. Escala 1:100.000. Mapa Geológico. INGEOMINAS. Bogotá
- Tschanz, Ch. M., Jimeno, A. & Vesga, C. (1969a). Mapa Geológico de reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. [Escala 1:200.000, mapa]. Bogotá, Colombia: Investigaciones Geológicas y Mineras - U. S. Geological Service [U.S.G.S.]
- Ujueta, G. y Llinás, R. (1990). Reconocimiento Geológico de la parte más Septentrional de la Sierra de Perijá. *Geología Colombiana*, 17, 197–209. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30670>
- Unger, T (2014). Linkages between demand-side management and congestion in the European electricity transmission system. *Energy*, 69, 860-872.
- Unión Temporal Prospección Upme (2018). Evaluación de las cuencas y estructuración de escenarios de oferta de hidrocarburos convencionales y no convencionales. V.4
- Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, (2019)-, «Productividad en la minería: ahora viene la parte difícil, Balance nacional minero 2012-2016»
- Villamil, T. (1999) Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 153, pp 239-275. Bogotá.
- Ward, D.E., Goldsmith, R., Cruz, J., y Restrepo, H. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-133.
- Zambrano, E.; Vásquez, E.; Duval, B.; Latreille, M., y Coffiniers B (1975) Síntesis Paleogeográfica y Petrolera del Occidente de Venezuela. IV Congreso Geológico Venezolano. Caracas.
- Zuluaga, A. D., Torrenegra, W., & Lascarro, F. (2019). Control estructural de las mineralizaciones de barita y cobre en los corregimientos de Caracolí y Camperucho, Cesar, Colombia. *Boletín de Geología*, 41(1), 85-96.