

Caracterización mineralógica, petrográfica y geoquímica de clastos ricos en Fe-Ti, presentes en depósitos aluviales cuaternarios. (Vereda Angelinos - Municipio de Bucaramanga -

Departamento de Santander)

Mauricio Cala Gómez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogo

Director

Luis Carlos Mantilla Figueroa

Geólogo PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

A Dios: Padre, Hijo y Espíritu, la Santísima Virgen María y su Castísimo esposo José, junto con los demás santos y ángeles, porque de ellos, por ellos y para ellos son todas las cosas en Nuestro Señor Jesucristo, ¡A él la gloria por los siglos! Amén.

A mis padres Carlos e Isabel por su incondicional apoyo y amor durante toda mi vida, educándome y acompañándome en todos mis proyectos. Dios les pague esa honorable deuda de amor que nunca podre saldar.

A mis hermanos Luis Javier y Sonia Andrea por su amor fraternal, sus consejos y paciencia para conmigo, así como su estupendo sentido del humor y honestidad, a quienes deseo puedan alcanzar todos los bienes que buscan de corazón.

A todos mis familiares que de una y otra forma me apoyaron, así como a mis amigos y allegados con quienes he tenido la gracia de compartir alegrías y tristezas.

A mis compañeros de Geología con quienes compartí este viaje, que con su amistad y genialidad siempre supieron sacarme una sonrisa y enseñarme como disfrutar esta bella experiencia.

A la Escuela de Geología por haberme enseñado a leer las rocas y a contemplar paisajes, porque ahora mis viajes nunca son aburridos, tal como Albino León, un paisano geólogo, me dijera al iniciar este paseo.

A Pamela, mi amor, a quien por pura gracia de Dios he venido a conocer, que es la ternura de mi corazón y la dama a la que dedico este pequeño triunfo.

### **Agradecimientos**

Un agradecimiento especial al profesor Luis Carlos Mantilla por orientarme en la realización de este proyecto, su colaboración, disposición y paciencia facilitaron la culminación de este trabajo a pesar de las anomalías y restricciones fruto de la pandemia.

Al Profesor Guillermo Vargas Pieschacón, quien movido por la curiosidad científica y sencillamente humana se propuso indagar sobre estos materiales geológicos “extraños”, acompañándome generosamente en el trabajo de campo y apoyándome con su conocimiento.

A la Universidad Industrial de Santander por haberme brindado este espacio de enriquecimiento, crecimiento y experiencias que llevare en mi corazón.

A la Escuela de Geología, cuerpo administrativo, docente y compañeros con los que tuve la oportunidad de compartir varios años de esta carrera.

Al Laboratorio de Microscopia del Parque Tecnológico Guatiguará, en especial al profesor Carlos Alberto Ríos por su apoyo y colaboración, así como al profesor Carlos Villareal por su acompañamiento en la adquisición de datos.

A el profesor Andrés Cáceres por su generosidad e interés en la presentación final de este trabajo, sus correcciones y apreciaciones fueron una valiosa contribución.

A la profesora Edith Katherine Jerez por su amabilidad y sencillez, sus comentarios, observaciones y consejos fueron de gran ayuda en este proceso.

A Luis Garrido técnico del laboratorio de preparación de muestras y secciones delgadas por su colaboración y diligencia en la fabricación de las secciones requeridas.

Al Laboratorio de Rayos X del Parque Tecnológico Guatiguará y su director el profesor José Antonio Henao, por su gentileza y apoyo en la adquisición de datos de difracción.

Al Laboratorio ALS Global por la realización de los análisis geoquímicos solicitados.

A Cesar Enrique Llenera Betancourt por su amistad, apoyo y diligencia, beneficiándome con la necesaria ayuda de la auxiliatura administrativa y facilitar el préstamo de equipos de laboratorio de microscopia, entre otros.

A todos los profesores, amigos y colegas geólogos que de una u otra forma aportaron su opinión, discusión y acompañamiento durante mi vida universitaria, en el marco del desarrollo de este proyecto de investigación, especialmente a Camilo Mejía, William Eduardo Peñaranda, Cristian Castellanos, Fabián Samuel Reyes y Omar Latorre.

A Alexandra Elbakyan fundadora de Sci-Hub y que facilita que muchos estudiantes e investigadores podamos acceder a una amplia base de datos académicos de manera gratuita.

A los administradores y propietarios de la Cantera Cemex, Finca El Tunó y habitantes del sector aledaño quienes gentilmente permitieron la realización del trabajo de Campo.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	13
2.1 Objetivo General .....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Metodología .....	14
2.1 Pre – campo.....	14
2.2 Trabajo de campo.....	14
2.3 Fase de laboratorio.....	15
2.3.1 Elaboración de láminas delgadas .....	15
2.3.2 Análisis de Microscopía óptica y electrónica .....	15
2.2.3 Difracción de Rayos X (DRX).....	16
3. Localización .....	17
4. Antecedentes .....	19
5. Resultados .....	23
5.1 Generalidades sobre los clastos ricos en Fe – Ti .....	23
5.2 Análisis mineralógico – petrográfico.....	30
5.2.1 Muestra MC-001 .....	31
5.2.2 Muestra MC-002.....	33
5.2.3 Muestra MC-003 .....	35
5.2.4 Muestra MC-004.....	37
5.2.5 Muestra MC-006.....	38
5.3 Microscopia electrónica de barrido.....	40
5.3.1 Analisis de SEM para la muestra MC-001 .....	40
5.3.2 Análisis de SEM para la muestra MC-002 .....	44
5.3.3 Análisis de SEM para la muestra MC-003 .....	47
5.3.4 Análisis de SEM para la muestra MC-006 .....	50
5.4 Difracción de Rayos X (DRX).....	54
5.4.1 Muestra 003A.....	55
5.4.2 Muestra 003B.....	56
5.4.3 Muestra 003C Negro.....	57
5.4.4 Muestra MC-004.....	58
5.4.5 Muestra MC-006.....	59
5.5 Análisis Geoquímico.....	60
6. Consideraciones preliminares sobre la génesis de las mineralizaciones Fe – Ti.....	64
7. Conclusiones .....	66
8. Recomendaciones .....	68

Referencias bibliográficas..... 69

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Listas coordinadas registradas en campo correspondientes a las muestras.</i> .....	30
Tabla 2 <i>Composición mineralógica de la sección delgada MC-001.</i> .....	32
Tabla 3 <i>Composición mineralógica de la sección delgada MC-002.</i> .....	34
Tabla 4 <i>Composición mineralógica de la sección delgada MC-003</i> .....	35
Tabla 5 <i>Composición mineralógica de la sección delgada MC-004</i> .....	37
Tabla 6 <i>Composición mineralógica de la sección delgada MC-006.</i> .....	38
Tabla 7 <i>Resultados DRX muestra 003A</i> .....	55
Tabla 8 <i>Resultados DRX muestra 003B</i> .....	56
Tabla 9 <i>Resultados DRX muestra 003C</i> .....	57
Tabla 10 <i>Resultados DRX muestra MC-004</i> .....	58
Tabla 11 <i>Resultados DRX muestra MC – 006</i> .....	59
Tabla 12 <i>Elementos mayores Análisis Geoquímica roca total.</i> .....	60

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Localización del área de estudio, Vereda Angelinos (Municipio de Bucaramanga).</i> ....	17
Figura 2 <i>Esquema geológico del área de estudio, en el cual se resalta el área objeto de estudio.</i> .....	18
Figura 3 <i>Aspecto general del área El Tuno, en la cual se observan los depósitos que contienen clastos ricos en Fe-Ti.</i> .....	24
Figura 4 <i>Aspecto General de los Clastos ricos en Fe-Ti, finca el Tuno.</i> .....	25
Figura 5 <i>Depósito aluvial aflorante en el sector Sur de la Cantera Cemex, en donde se presentan clastos ricos en Fe-Ti.</i> .....	26
Figura 6 <i>Imagen ilustrativa del nivel gravoso del depósito aluvial en donde se presentan clastos ricos en Fe-Ti.</i> .....	27
Figura 7 <i>Aspecto General del Nivel sedimentario que contiene los Clastos Ígneos y metamórficos en depósito aluvial en el sector sur de la Cantera Cemex.</i> .....	28
Figura 8 <i>Registro fotográfico Clasto MC -003 y Clasto MC-004.</i> .....	30
Figura 9 <i>Imagen ilustrativa de la localización en campo de los clastos recolectados.</i> .....	31
Figura 10 <i>Aspecto general de la muestra MC-001 vista en microscopía de luz transmitida en nicoles cruzados y objetivo de 10X.</i> .....	33
Figura 11 <i>Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti.</i> .....	33
Figura 12 <i>Aspecto general de la muestra MC-002 vista en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 10X.</i> .....	34
Figura 13 <i>Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti.</i> .....	35
Figura 14 <i>Aspecto general de la muestra MC-003 vista en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 20X.</i> .....	36
Figura 15 <i>Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti.</i> .....	37
Figura 16 <i>Aspecto general de la muestra MC-004 vista en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 10X.</i> .....	38
Figura 17 <i>Aspecto general de la muestra MC-006 en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 10X.</i> .....	39
Figura 18 <i>Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti, muestra MC-006</i> .....	39
Figura 19 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	42
Figura 20 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	42
Figura 21 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	43
Figura 22 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	43

Figura 23 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	44
Figura 24 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	45
Figura 25 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	45
Figura 26 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	46
Figura 27 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	46
Figura 28 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	47
Figura 29 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	48
Figura 30 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	48
Figura 31 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	49
Figura 32 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	49
Figura 33 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	50
Figura 34 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	50
Figura 35 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	51
Figura 36 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	52
Figura 37 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	52
Figura 38 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	53
Figura 39 <i>Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).</i> .....	53
Figura 40 <i>Difractograma Muestra 003A</i> .....	55
Figura 41 <i>Difractograma Muestra 003B</i> .....	56
Figura 42 <i>Difractograma muestra 003C</i> .....	57
Figura 43 <i>Difractograma muestra MC-004</i> .....	58
Figura 44 <i>Difractograma muestra MC-006</i> .....	59
Figura 45 <i>Diagrama tierras raras comparado con condrito (Nakamura 1974).</i> .....	61
Figura 46 <i>Diagrama tierras raras comparado con condrito (Anders &amp; Grevesse 1989).</i> .....	62
Figura 47 <i>Diagrama tierras raras comparado con el manto primitivo (McDonough &amp; Sun 1995).</i> .....	62
Figura 48 <i>Diagrama tierras raras comparado con condrito (Boynton 1984).</i> .....	63

## Resumen

**Título:** Caracterización mineralógica, petrográfica y geoquímica de clastos ricos en Fe-Ti, presentes en depósitos aluviales cuaternarios. (Vereda Angelinos - Municipio de Bucaramanga - Departamento De Santander) \*

**Autor:** Mauricio Cala Gómez \*\*

**Palabras Clave:** Macizo de Santander, Rocas Metamórficas, Depósitos Aluviales Cuaternarios, Clastos ricos en Fe-Ti.

**Descripción:** Al norte de la ciudad de Bucaramanga, en el sector sur de la cantera “La Cemento” (propiedad de la compañía Cemex), afloran depósitos cuaternarios aluviales - coluviales, con presencia de clastos negros redondeados de esfericidad media a baja, que evidencian una dirección de foliación. Los clastos presentan un alto contenido de óxidos de Fe-Ti con contenidos que oscilan entre (28-38%) y (49-55%), estos valores de Ti y Fe se relacionan principalmente con minerales de ilmenita y magnetita, los cuales están muy por encima del Clark de estos elementos. Dentro de los aspectos geoquímicos, la escasa presencia de sílice y los altos contenidos de óxidos de aluminio contrastan, junto con los patrones de tierras raras permiten plantear de manera preliminar un origen ligado a protolitos de afinidad cortical. La notoria foliación espaciada de algunas muestras sugiere que el origen de estos clastos se encuentra ligado con procesos de metamorfismo regional, que se podrían relacionar con el desmantelamiento del basamento metamórfico del Macizo de Santander (Gneis de Bucaramanga) de protolitos ígneos.

Aunque no se cuenta con un afloramiento *in situ* de la roca fuente del material, en este trabajo se plantea aportar sobre la composición mineralógica y geoquímica de estos clastos ricos en Fe - Ti, descritos a detalle por primera vez en esta área adyacente al Macizo de Santander, en aras de aportar datos que permitan comprender su procedencia y los procesos involucrados en la formación y evolución de estas rocas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Pregrado Geología. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Geólogo PhD en Geología económica y geoquímica.

### Abstract

**Title:** Mineralogical, petrographic and geochemical characterization of clasts rich in Fe-Ti, present in quaternary alluvial deposits. (Angelinos sector - Municipality of Bucaramanga - Department of Santander) \*

**Author:** Mauricio Cala Gómez \*\*

**Key Words:** Santander Massif (M.S.), Metamorphic Rocks, Quaternary Alluvial Deposits, Clasts rich in Fe-Ti.

**Description:** In the north of the city of Bucaramanga, in the southern sector of the “La Cemento” quarry (owned by the Cemex company), Quaternary alluvial deposits outcrop, with the presence of rounded black clasts of medium to low sphericity, which show a foliation direction. The clasts have a high content of Fe-Ti oxides with contents ranging between (28-38%) and (49-55%), these Ti and Fe values are mainly related to ilmenite and magnetite minerals, which are far above the Clark of these elements. Within the geochemical aspects, the scarce presence of silica and the high contents of aluminum oxides contrast, together with the REE patterns, allowing us to preliminarily propose an origin linked to crustal affinity protoliths. The notorious spaced foliation of some samples suggests that the origin of these clasts is linked to regional metamorphism processes, which could be related to the dismantling of the Santander Massif (Bucaramanga Gneiss) metamorphic basement, from igneous protoliths.

Although there is no *in situ* outcrop of the source rock of the material, this work proposes to contribute to the mineralogical and geochemical composition of these clasts rich in Fe - Ti, described in detail for the first time in this area associated with Santander Massif, in order to provide data that can understand their origin and the processes involved in the formation and evolution of these rocks.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. Geology School. Geology Degree. Advisor: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Geologist PhD in Economic Geology and geochemistry

## Introducción

Diferentes procesos geológicos que afectan a la corteza terrestre; tales como el magmatismo, metamorfismo, hidrotermalismo, entre otros; pueden activar algún tipo concreto de ‘sistema mineral’, al interior del cual se desencadenarían fenómenos de lixiviación, transporte y acumulación de metales. Por esta razón, la identificación de algunos atributos físicos y/o químicos al interior de cualquier sistema rocoso (por ejemplo: alteraciones hidrotermales, presencia anormal de óxidos o sulfuros), pueden ser un punto de partida clave para el reconocimiento futuro de algún sistema mineral en algún sector de la corteza terrestre (con o sin implicaciones económicas). Por esta razón, la presencia de algún atributo físico o químico (sea in-situ o ex-situ) en una determinada región, merece ser caracterizado y analizado, para fines de poder aportar progresivamente conocimiento, de tal manera que a futuro se logre con mayor precisión establecer o no, su origen y eventual relación con algún sistema mineral concreto.

En el marco de lo anteriormente mencionado, el presente trabajo de proyecto de grado ‘modalidad investigación’, se enfocó en la caracterización preliminar (mineralógica, petrográfica y geoquímica) de unos clastos ex-situ, ricos en Fe-Ti, de diámetros que varían entre 0.05 y 0.7 m (guijarros, gravas y bloques), confinados a depósitos aluviales cuaternarios restringidos (asociados a las partes topográficamente más bajas del sistema de drenajes de la cuenca del río Suratá), distribuidos espacialmente al norte de la ciudad de Bucaramanga (Vereda Angelinos). En este contexto de ideas, el objetivo del presente trabajo de tesis de pregrado es aportar datos preliminares sobre la composición mineralógica y química de estos clastos ricos en Fe-Ti, a priori asociados con rocas metamórficas del Macizo de Santander, entre las cuales deben existir niveles sensiblemente ricos en Fe-Ti, no reportados previamente en la literatura científica.

## **1. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Realizar una caracterización mineralógica, petrográfica y geoquímica de los clastos ricos en Fe-Ti, presentes en depósitos aluviales cuaternarios del Norte de la Ciudad de Bucaramanga.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar mediante microscopia la composición mineralógica de los clastos.
- Identificar la composición geoquímica de los clastos mediante la aplicación de métodos pertinentes.
- Plantear una aproximación acerca de las características geológicas de la roca fuente de los clastos a partir de la información obtenida.

## **2. Metodología**

Con el fin de alcanzar los objetivos anteriormente mencionados, se aplicó la metodología, estructurada mediante las siguientes fases: (1) Trabajo de Pre-campo; (2) Trabajo de Campo; (3) Trabajo de Laboratorio; (4) análisis, interpretación de datos y elaboración del documento final del trabajo de tesis de pregrado.

### **2.1 Pre – campo**

Mediante una recopilación de los distintos estudios geológicos y cartográficos previamente elaborados y disponibles en la literatura, se realizó una contextualización geológica del área de estudio para facilitar la identificación de unidades geológicas y depósitos de la Formación Bucaramanga. Asimismo, se definieron las posibles áreas para el muestreo durante las labores de campo, para lo cual fue necesario el uso de la información disponible en artículos científicos, documentos de proyectos de grado, mapas geológicos, imágenes satelitales, información de Google Earth, entre otros.

### **2.2 Trabajo de campo**

Consistió en realizar un reconocimiento de los posibles afloramientos con presencia de clastos ricos en Fe-Ti, presentes en el área de estudio, con el fin de recolectar muestras y establecer algunas relaciones de campo teniendo en cuenta la distribución de los diferentes materiales geológicos aflorantes en el área. Debido a que el trabajo de laboratorio ofrece nuevos datos y permite caracterizar de una manera detallada la mineralogía de las muestras recolectadas, se presenta a continuación cada una de las sub-fases que la componen. La adquisición de muestra se centró en dos afloramientos presentes en la propiedad de la Compañía Cemex y la finca “El Tuno”,

tal y como se describe con mayor detalle en el apartado de localización del área de estudio (Figura 1).

### **2.3 Fase de laboratorio**

Durante esta fase se realizó un análisis preliminar de las muestras tomadas en campo para reconocer a escala macroscópica, su composición mineralógica, características texturales y estructurales. Seleccionando las muestras más representativas y con un menor grado de alteración supérgena, se procede a la fabricación de secciones delgadas para su estudio mediante microscopía óptica y electrónica. Asimismo, se seleccionarán las muestras para los análisis de DRX y geoquímica de roca total.

#### ***2.3.1 Elaboración de láminas delgadas***

En esta etapa se seleccionaron las muestras destinadas a la fabricación de las correspondientes secciones delgadas. Las seis (6) secciones delgadas doblemente pulidas (sin cubreobjetos) fueron elaboradas en el Laboratorio de Preparación de Muestras de la Escuela de Geología en la Universidad Industrial de Santander.

#### ***2.3.2 Análisis de Microscopía óptica y electrónica***

Las 6 secciones delgadas fabricadas fueron analizadas mediante microscopía óptica de luz transmitida, en el laboratorio de Petrografía de la Escuela de Geología UIS, ubicado en el aula 312 que cuenta con el microscopio NIKON modelo Eclipse E200 50/POL. Este análisis permite la identificación de especies minerales presentes en los clastos, características texturales de los minerales y relaciones entre estos, considerando el caso especial de los minerales opacos en los cuales la identificación mediante microscopía electrónica permite complementar las descripciones petrográficas realizadas.

Los análisis de microscopía electrónica se realizaron en el Laboratorio de Microscopía Electrónica ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, usando el Microscopio Electrónico de Barrido FEG Quanta FEG 650 (Field Emission Gun) en alto vacío, equipado con un detector EDAX APOLO X (resolución de 16,1 eV (en. Mn Ka), con un voltaje de aceleración para análisis químico de 25 KV y procesando los datos con el Software EDX Genesis. Este análisis corresponde con un método semicuantitativo para estimar el porcentaje atómico y en masa de los elementos que conforman los minerales. Las muestras fueron previamente secadas y recubiertas con grafito para mejorar la conducción y permitir el funcionamiento adecuado del microscopio electrónico.

### ***2.2.3 Difracción de Rayos X (DRX)***

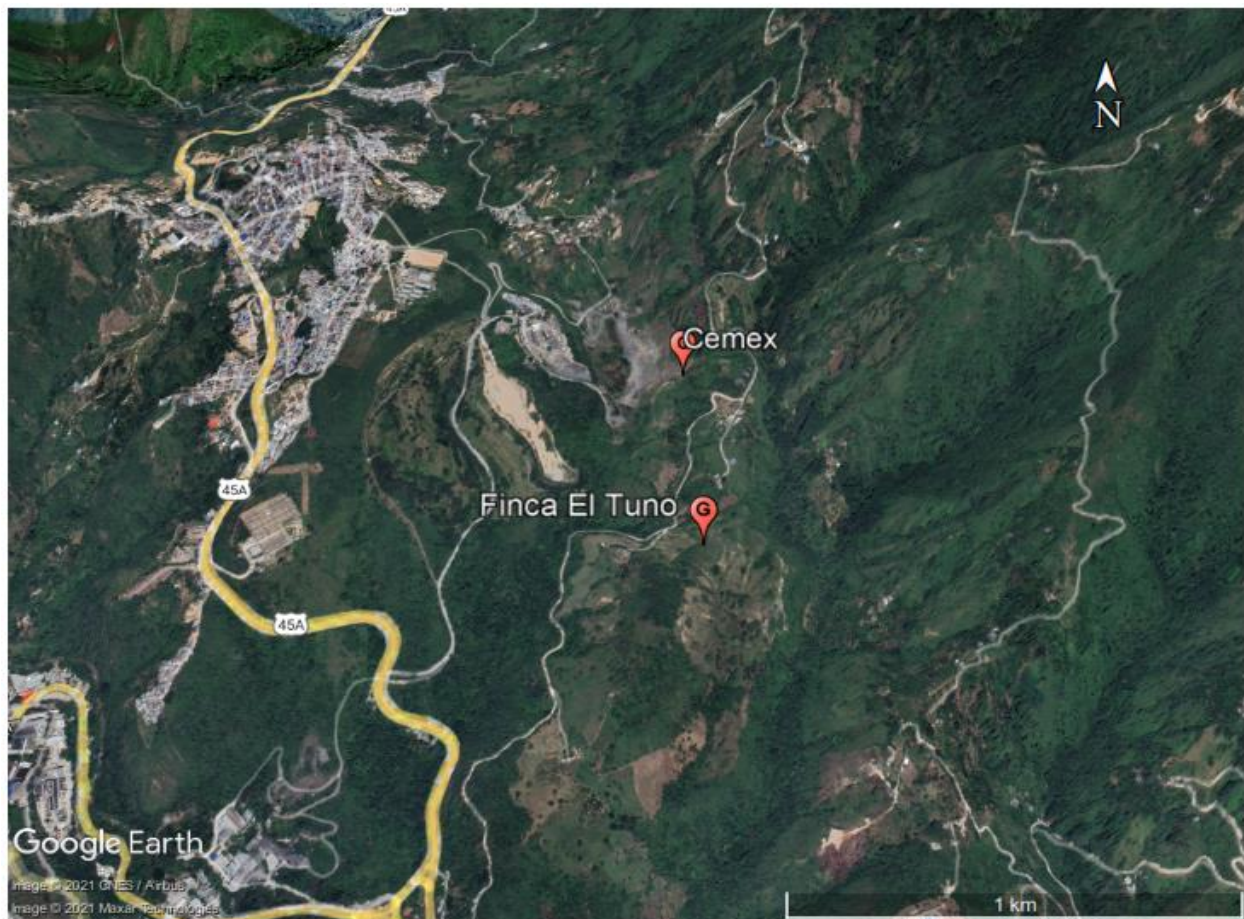
El análisis de difracción convencional de rayos X, se realizó en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará. Con el fin de tener una comprensión adecuada de la mineralogía de la vena se tomaron cinco (5) muestras que abarcan las variaciones texturales observadas en muestra de mano. Los especímenes seleccionados fueron molturados, homogenizados en un mortero de ágata y llevados a un tamaño de partícula menor a 38 micras. Las muestras pulverizadas fueron montadas en porta muestras de polimetilmetacrilato mediante la técnica de llenado frontal, para ser procesadas en el difractor de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci. Los datos fueron procesados en el software DIFFRAC.EVA para estimar de forma cualitativa las especies minerales presentes en las muestras analizadas.

### 3. Localización

La localización geográfica del área de estudio en la Vereda Angelinos, área rural al nor-oriente de Bucaramanga, en el Departamento de Santander, Colombia; particularmente en el predio de la Cantera propiedad de la Compañía Cemex y la finca “El Tuno” (Figura 1 y Figura 2).

#### Figura 1

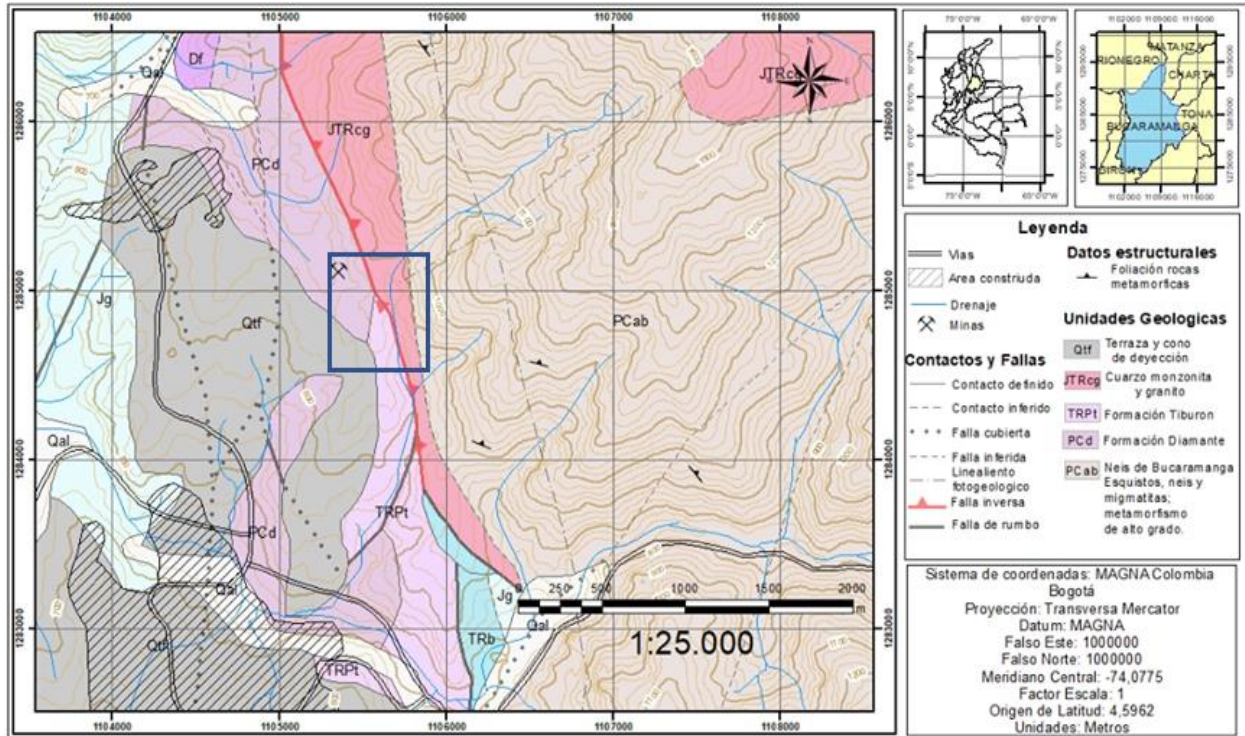
*Localización del área de estudio, Vereda Angelinos (Municipio de Bucaramanga).*



*Nota.* Tomado y modificado de Google Earth.

**Figura 2**

*Esquema geológico del área de estudio, en el cual se resalta el área objeto de estudio.*



*Nota.* Modificado de plancha 1.100.000 Servicio Geológico Colombiano

El área de estudio se encuentra a una altura de 800 a 1000 metros sobre el nivel del mar, el relieve montañoso está dominado por altas pendientes, escarpes y drenajes subparalelos controlados estructuralmente. Se caracteriza por ser un ambiente estructural controlado fuertemente el sistema de fallas Bucaramanga. Cerca de los drenajes se desarrollan bosques naturales, secundarios y primario, que cambian a zonas dominadas por cobertura de transición de arbustales y herbazales. La mayor parte de la zona recorrida en campo está dominada por pastos limpios y enmalezados destinados para actividades de pastoreo, así como labores extractivas de material rocoso en los predios de la compañía CEMEX.

#### 4. Antecedentes

Múltiples estudios se han desarrollado respecto del Macizo de Santander enfocados en múltiples aspectos entre los cuales los más importantes se relacionan con la génesis y los procesos que actuaron para llevar a cabo la formación de las diferentes litologías presentes. El Macizo de Santander forma parte de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, que junto con los Andes de Mérida y Ecuatorianos conforma el bloque denominado Andes del Norte (Pennington, 1981; Alemán y Ramos, 2000). El Macizo de Santander es considerado como un bloque alóctono acrecionado durante los eventos regionales que se presentaron al margen de Gondwana durante el Ordovícico – Carbonífero. Mayoritariamente el macizo está compuesto por gneises y esquistos intruidos por granitoides, que a su vez presentan unidades sedimentarias de diferente composición. La unidad más antigua del Macizo de Santander corresponde con el denominado Neis de Bucaramanga, cuyo nombre fue utilizado por Goldsmith *et al.*, (1971) y posteriormente propuesto por Ward *et al.*, (1973). Esta unidad se define como una secuencia formada por rocas meta – sedimentarias de “alto grado metamórfico” que consisten principalmente de paraneises cuarzo feldespáticos biotíticos y sillimaníticos, cuarcita, cantidades subordinadas de mármol, neis horbléndico y anfibolita. El Neis de Bucaramanga también incluye zonas que presentan a escala macroscópica morfologías de primer y segundo orden (Sawyer, 2008) de procesos de migmatización, con leucosomas compuestos por cuarzo y feldespato alcalino, y mesosomas conformados en su mayoría por paraneises biotítico – anfibolíticos (Urueña y Zuluaga, 2011).

Los estudios realizados en el Macizo de Santander comprenden dataciones, descripciones, correlaciones litoestratigráficas e hipótesis relacionados con geología histórica y modelos evolutivos de las unidades aflorantes del Macizo ígneo-metamórfico, entre la información que

brinda dichos trabajos se menciona grosso modo los límites del Neis de Bucaramanga de occidente a oriente. La faja más occidental llamada como Faja Bucaramanga esta al este de la falla del mismo nombre en vecindad con la ciudad, se extiende hacia el norte con una ancha zona de contacto hasta el batolito de Rionegro. Hacia el Noreste está cubierta por las rocas metamórficas de grado más bajo de la formación Silgara. En su lado oriental está limitado por el Batolito de Santa Barbara y termina hacia el sur entre este Batolito y la Falla Bucaramanga en el área de Cepitá (Ward *et al.*, 1973).

Intrusiones pequeñas de cuarzo monzonita, así como otros granitoides (monzogranito, granodiorita, tonalita) que varían desde texturas cristalinas faneríticas de tamaño fino a tamaños de grano muy grueso de diques pegmatíticos que están intruyendo la Formación Silgará y en el Neis de Bucaramanga. Muchas de estas se hallan al este del batolito de Rionegro, otras intrusiones y masas como silos. Pequeños Stocks están localizados en el área de la gran curva de río Surata, al suroeste de Matanza, contienen roca porfirítica. Estas intrusiones difieren entre sí en textura y composición (Ward *et al.*, 1973). El Complejo Bucaramanga consta de una secuencia de paraneises cuarzo-feldespáticos, hornbléndicos, micáceos, granatíferos y cantidades subordinadas de anfibolitas, migmatitas, cuarcitas, mármoles y esporádicamente granulitas (Royero & Clavijo, 2001).

Mas específicamente, se han realizado estudios, informes y reportes asociados a rocas con contenidos importantes de hierro hacia la zona del macizo de Santander. Los cuales se enumerarán a continuación:

(1) El informe No. 1584 del Instituto de Investigaciones Geológico-Mineras, acerca de los yacimientos de hierro en Colombia y depósitos de hierro en Sudamérica por Jaime Cruz Buenaventura (1971). Expone entre los yacimientos colombianos a la Magnetita de Ocaña,

formulando que la mineralización se encuentra a 15 km al norte de Ocaña, Departamento de Norte de Santander, en el cerro denominado Piedra del Imán. El tipo de mineralización se trata de lentes mineralizados de magnetita, epidota y cuarzo encajados en el cuarzo monzonita del batolito de Ocaña de edad jurásica. Es posible que se trate de relleno de fracturas de enfriamiento; se estimó la calidad del mineral, los resultados de análisis de muestras meteorizadas dieron valores para Fe de 13.98 % a 44.40% (Buenaventura J., 1971).

(2) Manifestación Los Cristales y Piedra de Imán (Otero,1975), manifestación El Imán; asociadas al Ígneo de Santander en Ocaña, Norte de Santander. En Colombia se han reportado depósitos de hierro clasificados como de segregación magmática en áreas de dominio de rocas ígneo-metamórficas en la cordillera Central, la cordillera Oriental, el Macizo de Santander y la Sierra Nevada de Santa Marta. Específicamente para la zona del Macizo de Santander la manifestación Los Cristales y Piedra de Imán por Otero (1975), se encuentran asociadas al Ígneo de Santander en Ocaña, N. Santander. Además de enunciar otros depósitos y manifestaciones sobre el macizo de Santander, Prieto *et al.*, (2019) ha reportado la presencia de minerales de hierro asociados a procesos hidrotermales.

(3) INGEOMINAS (1987) publica el primer tomo, segunda edición de Recursos minerales de Colombia que contiene tablas y un listado de los yacimientos, prospectos y manifestaciones de hierro en Colombia, entre los cuales cabe resaltar los siguientes:

- a) Cuchilla de Palencia, Silos, Norte de Santander.
- b) Hacienda Tomita, Silos, Norte de Santander.
- c) El Imán, La Playa, Norte de Santander.
- d) Loma Samaria, Chitagá, Norte de Santander.

- e) Manifestación Piedra de Imán, Ocaña, Norte de Santander.
- f) Manifestación Los Cristales, Ocaña, Norte de Santander.

Todos asociados al Macizo de Santander, pero ciertamente solo las dos últimas manifestaciones (e y f) asociadas a segregación magmática.

Específicamente para la región cercana a la zona de estudio, en el sector sur de la cantera de la compañía Cemex (ubicada al Norte de la ciudad de Bucaramanga), que geológicamente se localiza al oeste de la Falla Bucaramanga, Martínez (2019) reporta afloramientos con un contenido abundante de clastos negros ferrosos, redondeados de esfericidad media a mala con fragmentos líticos de cuarzo plagioclasa y matriz de hematita, magnetita y abundantes óxidos de titanio, los cuales no fueron encontrados en otros afloramientos previamente descritos. Las rocas que presentan minerales con cantidades considerables de hierro en su composición son variadas en la zona de estudio, entre las cuales resaltan los clastos redondeados de magnetita en depósitos cuaternarios (Martínez, 2019).

El afloramiento identificado en los predios de la cantera Cemex a grandes rasgos comprende niveles en forma de cuñas coluviales, constituidas únicamente por fragmentos de la Formación Tiburón, que se acumularon en la parte oriental profunda de la cuenca, con una dirección de transporte del SW al NE. Los niveles superiores están conformados por conglomerados clasto – soportados de rocas ígneas y sedimentarias, los cuales sugieren una fuente más alejada, posiblemente situada en el Macizo de Santander. Suprayaciendo estos niveles está un nivel de gravas de composición similar, cubriendo toda la cuenca y descansando discordantemente sobre La Formación Tiburón. Sobre estas gravas inicia una secuencia sedimentaria fina con abundante presencia de materia orgánica en la zona central y occidental de la cuenca, con un particular nivel arcilloso de tonalidades blancuzcas, sin presencia de materia orgánica y con lentes

arenoso; lo anterior sugiere según Diederix *et al.*, (2009) un posible origen relacionado con depósitos subaéreos (en el caso del material blancuzco) y en general una alta probabilidad que el material haya sido depositado en una cuenca tectónica “*sagpond*”. Hacia la zona más oriente este nivel fino se interdigita con cuñas detríticas provenientes del complejo ígneo-metamórfico del Macizo de Santander; sobre toda la secuencia se encuentran tres niveles de arcillas orgánicas de color marrón oscuro, compuesto por clastos angulares (Diederix *et al.*, 2009).

Esta unidad superior (Qal) a la cual pertenecen los clastos de interés; está conformada por depósitos de aluvión, coluvión, derrubios glaciares, fluvio-glaciares que son considerados de edad holoceno (Royero & Clavijo 2001). Teniendo en cuenta la amplia miscelánea de artículos que se posee la zona y sus zonas aledañas, se hace necesario un mayor estudio de los clastos previamente nombrados, debido a la particularidad de estos y la respuesta que dichos podrían brindar al conocimiento geológico.

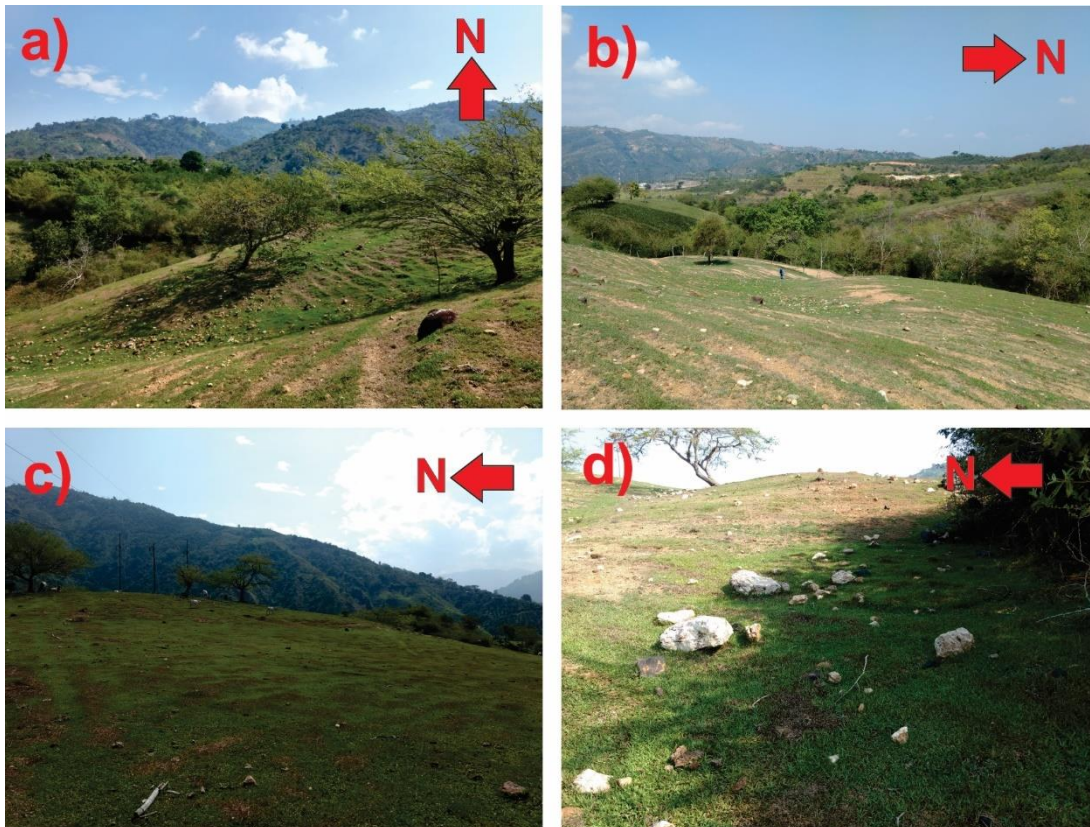
## 5. Resultados

### 5.1 Generalidades sobre los clastos ricos en Fe – Ti

Durante los trabajos en campo se reconocieron dos locaciones particulares donde se identificaron muestras con componentes minerales ricos en óxidos de Fe-Ti (principalmente magnetita, ilmenita y hematita con contenidos modales ocasionalmente mayores a los 30-40%). Una de estas localidades corresponde al predio denominado “Finca El Tuno” (Figura 3) donde se hallaron la mayor cantidad de clastos dispuestos sobre una pequeña elevación en lo que correspondería geomorfológicamente a un depósito aluvial. Este predio se encuentra a mayor altura y más cerca al escarpe de falla Bucaramanga – Santa Marta con respecto a la segunda locación ubicada en el predio de Cemex (Figura 5).

**Figura 3**

*Aspecto general del área El Tuno, en la cual se observan los depósitos que contienen clastos ricos en Fe-Ti.*



*Nota.* Visuales **a)** Finca el Tuno Vista hacia el Norte; **b)** Finca el Tuno Vista hacia el Oeste, vista hacia la cantera Cemex; **c)** Finca el Tuno Vista hacia el Este, Escarpe de falla Bucaramanga y **d)** Aspecto general de la disposición en superficie de los clastos ricos en Fe-Ti presentes en los depósitos de aluvión, finca el Tuno.

En esta área los clastos de mayor tamaño (cerca de 50 cm de diámetro) y pesados se encuentran concentrados en la parte superior (más cercana a la falla), y en lo que sería la parte más baja del depósito la frecuencia de los clastos es menor y presentan un tamaño más pequeño. También se observa en las dos locaciones que los clastos ricos en Fe-Ti presentan una evidente

foliación espaciada con dominios de minerales máficos con respuesta magnética al acercarse el imán y coloración medianamente rojiza por la acción de procesos supérgenos (Figura 4). Adicionalmente respecto a las características del depósito, los clastos objeto de estudio se encuentran junto a fragmentos de cuarzo posiblemente asociados con el Neis de Bucaramanga.

#### Figura 4

*Aspecto General de los Clastos ricos en Fe-Ti, finca el Tuno.*

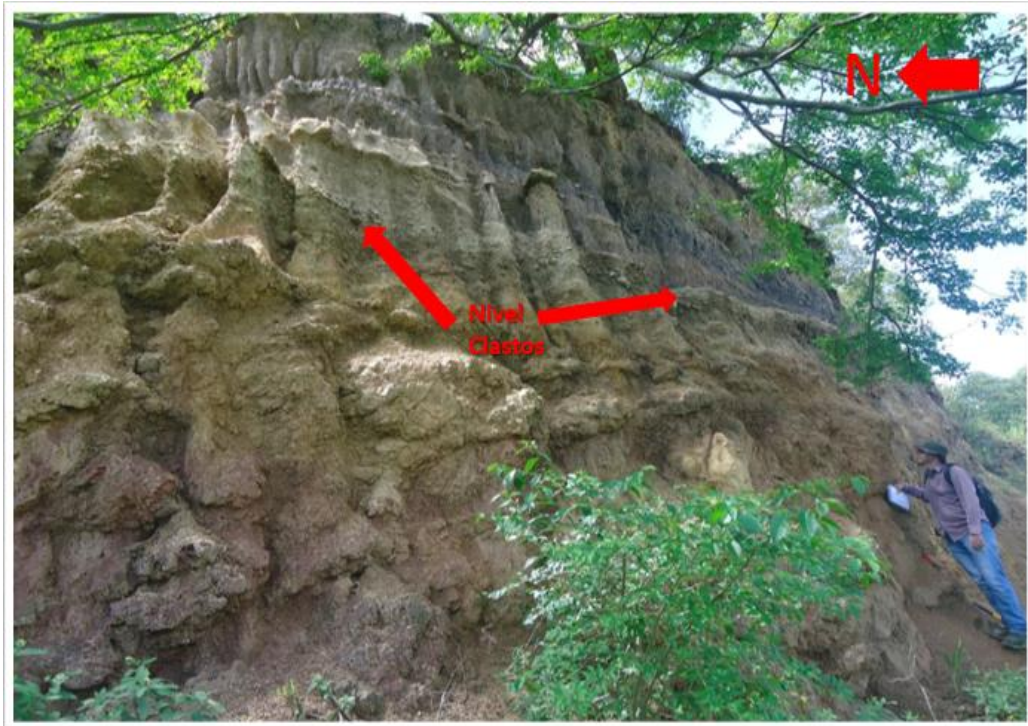


*Nota.* Los clastos evidencian foliación típica de rocas con metamorfismo regional.

Dentro de los predios de Cemex, parcialmente cubierto por vegetación y por las laderas estabilizadas por la compañía, se encuentra el afloramiento descrito por (Diederix *et al.*, 2009), el cual este situado a 250 m al oeste de la traza principal de la falla de Bucaramanga y a una distancia de 100 m de una falla satelital, al oeste, que pone en contacto las calizas con gravas cuaternarias de la terraza del río Suratá y que este interpreta como cuenca tectónica (*Sagpond*) situada sobre una depresión erosionada sobre la terraza cuaternaria más alta del río Suratá (Figura 1).

**Figura 5**

*Depósito aluvial aflorante en el sector Sur de la Cantera Cemex, en donde se presentan clastos ricos en Fe-Ti.*



**Figura 6**

*Imagen ilustrativa del nivel gravoso del depósito aluvial en donde se presentan clastos ricos en Fe-Ti.*



A grandes rasgos se advierte, que los niveles más bajos del depósito que son acuñaados consisten en conglomerados clasto – soportados de rocas ígneas y metamórficas, que se encuentran depositados sobre sedimentos de la formación Tiburón, que a su vez descansan discordantemente sobre las lodolitas rojas de la Formación Diamante (Figura 5).

Suprayaciendo estos niveles se encuentra un nivel de gravas de menor tamaño cubriendo toda la cuenca y descansando discordantemente sobre La Formación Tiburón. Sobre estas gravas inicia una secuencia sedimentaria fina, con abundancia orgánica y con un particular nivel arcilloso blanco con lentes arenosos.

Sobre toda la secuencia, se encuentran tres niveles de arcillas orgánicas de color marrón oscuro con contenido de clastos angulares (Figura 6). Martínez (2019) reporta un nivel que presenta clastos ricos en Fe-Ti de tonalidad oscura, con respuesta magnética, redondeados, esfericidad media y con presencia de fragmentos líticos de cuarzo. Los clastos ricos en Fe-Ti, en este afloramiento no superan los 15 cm de diámetro y se encuentra abundantemente distribuidos a lo largo del nivel, que como se observa tiene un espesor que varía de 20 a 25 cm aproximadamente y parece disminuir su espesor hasta acuñarse horizontalmente (Figura 7).

### **Figura 7**

*Aspecto General del Nivel sedimentario que contiene los Clastos Ígneos y metamórficos en depósito aluvial en el sector sur de la Cantera Cemex.*



De las muestras de mano recolectadas en campo, se han tomado como referencia dos texturas predominantes que se describen a continuación en las siguientes muestras: La muestra MC-003 corresponde a un clasto de color gris oscuro con bandas de color gris claro a levemente blancuzco, cuyas bandas oscuras presentan brillo metálico y un magnetismo intenso. La muestra evidencia una foliación espaciada considerada como una textura gnéissica, con una composición dominada principalmente por minerales opacos de los cuales se sugiere la presencia de magnetita, alternando con minerales más claros definidos posteriormente con ayuda de petrografía y DRX (Figura 8).

La muestra MC-004 corresponde a un clasto con una coloración más oscura que MC-003 y brillo metálico, presenta un magnetismo más intenso, una disposición masiva con una leve orientación y composición aparentemente homogénea correspondiente a minerales como la magnetita o la ilmenita (mayoritariamente óxidos) (Figura 8).

**Figura 8**

*Registro fotográfico Clasto MC -003 y Clasto MC-004.*



**5.2 Análisis mineralógico – petrográfico**

Los minerales identificados durante la revisión petrográfica y contrastados con el análisis de SEM y DRX en los clastos son: corindón, magnetita, ilmenita, titano-ilmenita, diásporo, amesita, ferrohobomita y hematita. A continuación, se detalla la localización geográfica de las seis muestras (Tabla 1 y Figura 9) y los resultados de los análisis mineralógico-petrográficos realizados en muestras de clastos ricos en Fe-Ti.

**Tabla 1**

*Listas coordenadas registradas en campo correspondientes a las muestras.*

<b>COORDENADAS REGISTRADAS PARA LAS MUESTRAS</b>			
<b>MUESTRA</b>	<b>NORTE</b>	<b>ESTE</b>	<b>ALTURA</b>
<b>MC 001</b>	1284505,176 N	1105618,678 E	858 msnm

<b>MC 002</b>	1284315,675 N	1105650,986 E	847 msnm
<b>MC 003</b>	1284398,660 N	1105665,543 E	803 msnm
<b>MC 004</b>	1284330,728 N	1105650,341 E	851 msnm
<b>MC 005</b>	1284356,537 N	1105650,594 E	856 msnm
<b>MC 006</b>	1284911,952 N	1105465,627 E	865 msnm

**Figura 9**

*Imagen ilustrativa de la localización en campo de los clastos recolectados.*



**5.2.1 Muestra MC-001**

De acuerdo con la observación petrográfico y el conteo de 250 puntos realizado sobre la sección delgada se logró establecer la presencia de minerales opacos en su mayoría, así como también corindón, óxidos de hierro y amesita. Cuantitativamente la muestra presenta la siguiente composición.

**Tabla 2**

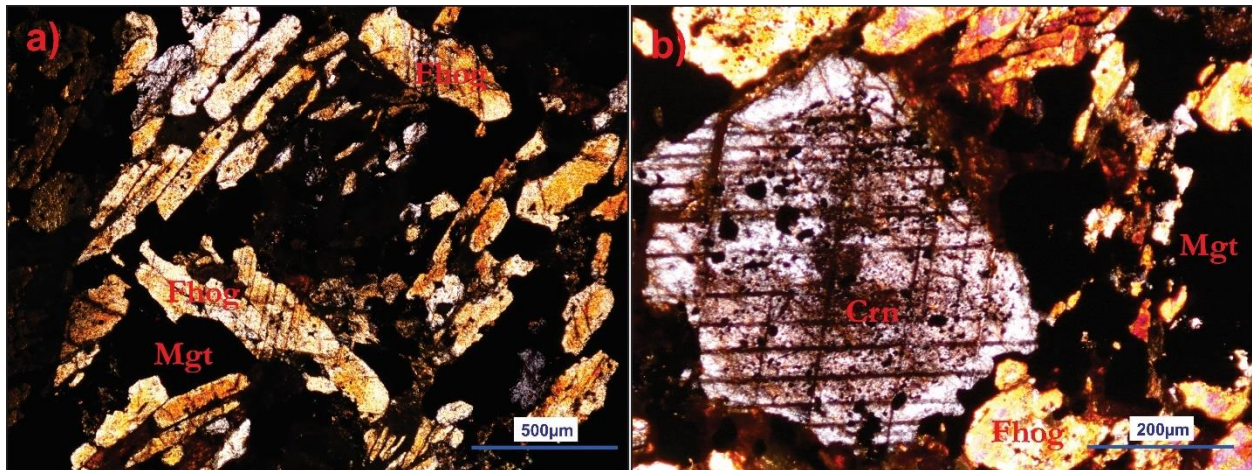
*Composición mineralógica de la sección delgada MC-001.*

<b>MINERAL</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<b>OPACOS</b>	(56%)
<b>CORINDÓN</b>	(15%)
<b>AMESITA</b>	(12%)
<b>OXIDOS</b>	(17%)

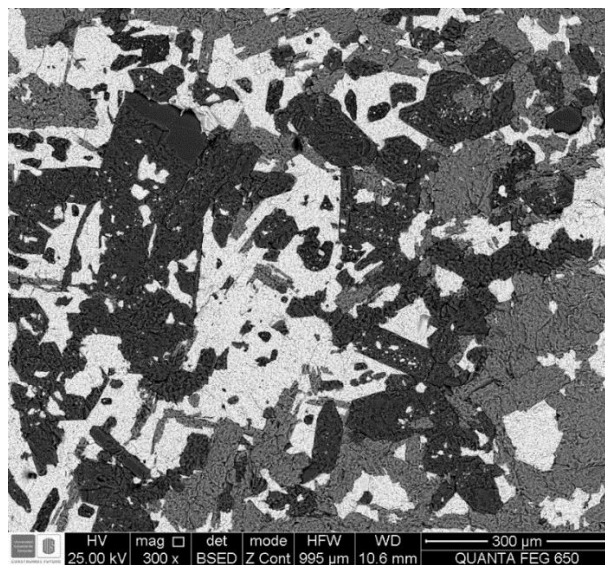
Dentro de los minerales identificados mediante petrografía de luz transmitida se presentan cristales de corindón subidioblásticos con colores de interferencia grises de primer orden, algunos de los cristales presentan maclas polisintéticas y particiones similares a planos de exfoliación, en nicols cruzados se observa un relieve muy alto e incoloro, con zonas sucias por la alteración del corindón a minerales arcillosos y fracturas con hidróxidos de hierro. En las muestras MC-001 se evidencia mayor alteración en la roca, es decir, diásporo y amesita, en texturas sinuosas y alargadas, así como la presencia de cristales de ferrohombomita como cristales tabulares alargados (Figura 10).

**Figura 10**

*Aspecto general de la muestra MC-001 vista en microscopía de luz transmitida en nicols cruzados y objetivo de 10X.*

**Figura 11**

*Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti.*



### 5.2.2 Muestra MC-002

De manera similar a la muestra MC-001, la MC-002 presenta un dominio de minerales opacos (magnetita, ilmenita, hematita) con cristales subidioblásticos de corindón, siendo

enmascarada con cristales subhedrales de ferrohobomita y agregados de filosilicatos finos pertenecientes a la amesita (Figura 12). Los resultados del conteo realizado se presentan en la siguiente tabla:

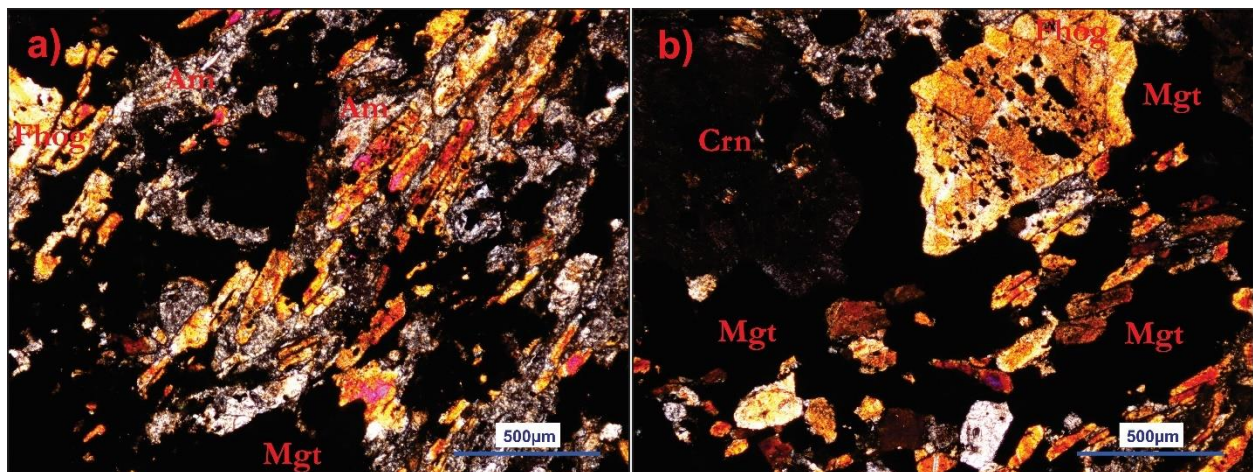
**Tabla 3**

*Composición mineralógica de la sección delgada MC-002.*

MINERAL	PORCENTAJE
OPACOS	(54%)
CORINDÓN	(16%)
AMESITA	(11%)
OXIDOS	(19%)

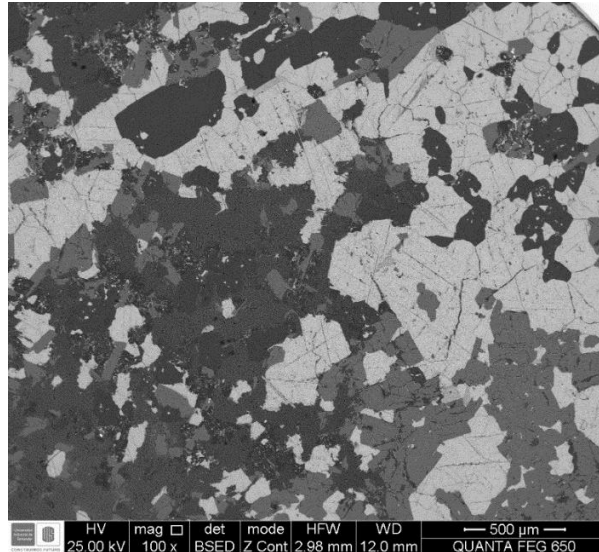
**Figura 12**

*Aspecto general de la muestra MC-002 vista en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 10X.*



**Figura 13**

*Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti.*



**5.2.3 Muestra MC-003**

**Tabla 4**

*Composición mineralógica de la sección delgada MC-003*

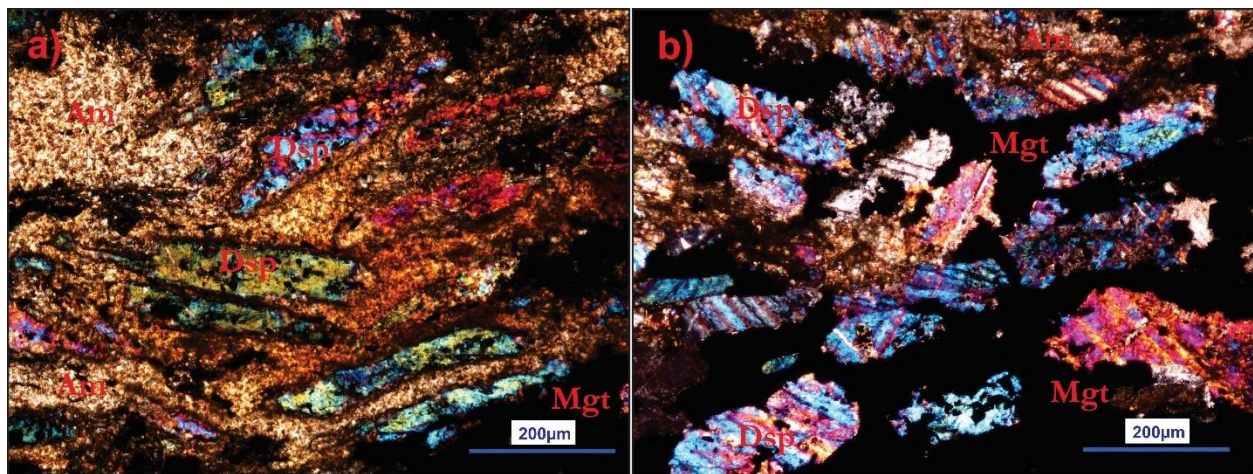
<b>MINERAL</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<b>OPACOS</b>	(50%)
<b>DIASPORO</b>	(19%)
<b>AMESITA</b>	(21%)
<b>OXIDOS</b>	(8%)

En la muestra MC-003 se presentan cristales de diásporo subhedrales con forma tabular a prismática, relieve alto en nicoles paralelos, colores de interferencia que varían hasta azules de tercer orden y extinción recta. Los cristales de diásporo se encuentran asociados con minerales opacos y amesita con relieve bajo, colores de inferencia mayoritariamente de primer orden, en forma de agregados escamosos irregulares. Los cristales de diásporo exhiben una orientación

preferencial que corresponde a la orientación preferencial que se presenta como una foliación espaciada en muestra de mano (Figura 8), donde alternan dominios de minerales opacos, silicatos y óxidos (Figura 14).

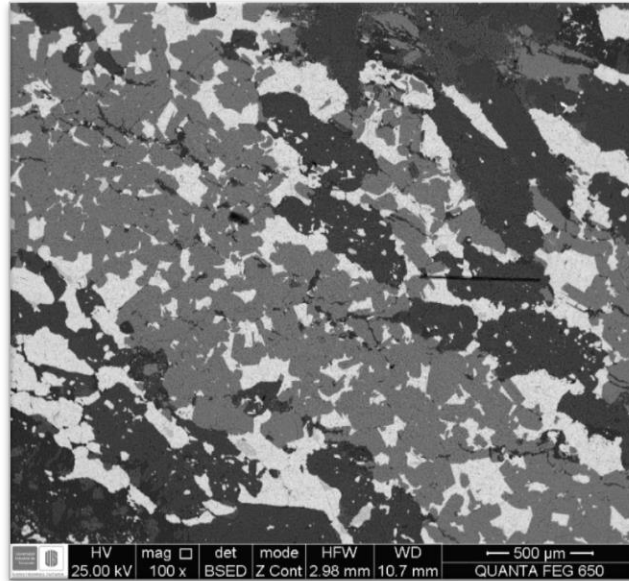
### Figura 14

*Aspecto general de la muestra MC-003 vista en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 20X.*



**Figura 15**

*Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti.*



#### 5.2.4 Muestra MC-004

**Tabla 5**

*Composición mineralógica de la sección delgada MC-004*

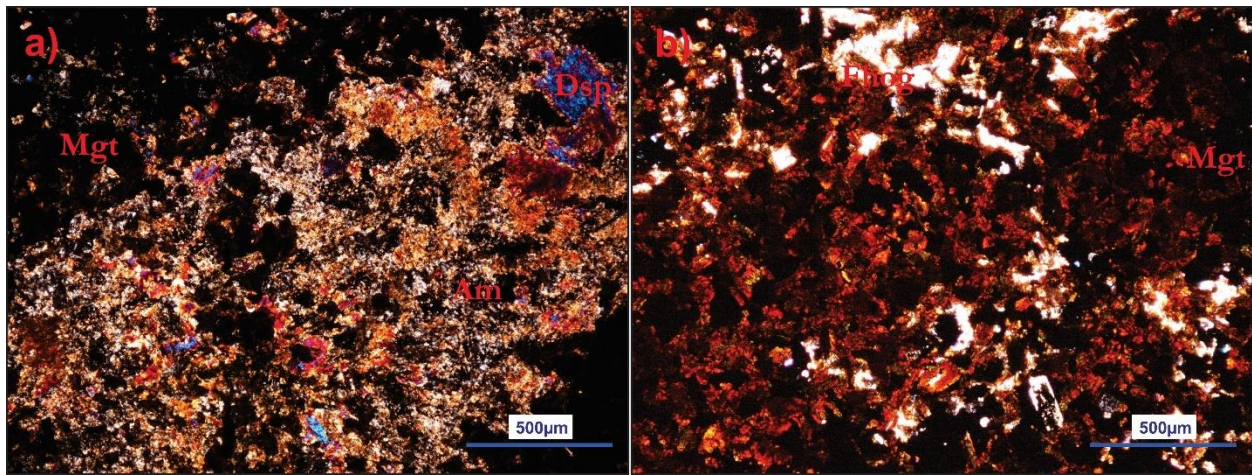
<b>MINERAL</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<b>OPACOS</b>	(58%)
<b>CORINDÓN</b>	(13%)
<b>AMESITA</b>	(9%)
<b>OXIDOS</b>	(20%)

La muestra MC-004 presenta una composición predominante de minerales opacos, en contacto con cristales de corindón rectangulares subidioblásticos, así como óxidos de hierro con una orientación preferencial e hidróxidos contextura masiva. En términos generales, la magnetita se encuentra en asociación con la hercinita y el corindón, también se observan cantidades

representativas de diásporo y amesita (Figura 16), así como ferrohombomita subhedral de color marrón-rojizo con un relieve muy alto.

**Figura 16**

*Aspecto general de la muestra MC-004 vista en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 10X.*



**5.2.5 Muestra MC-006**

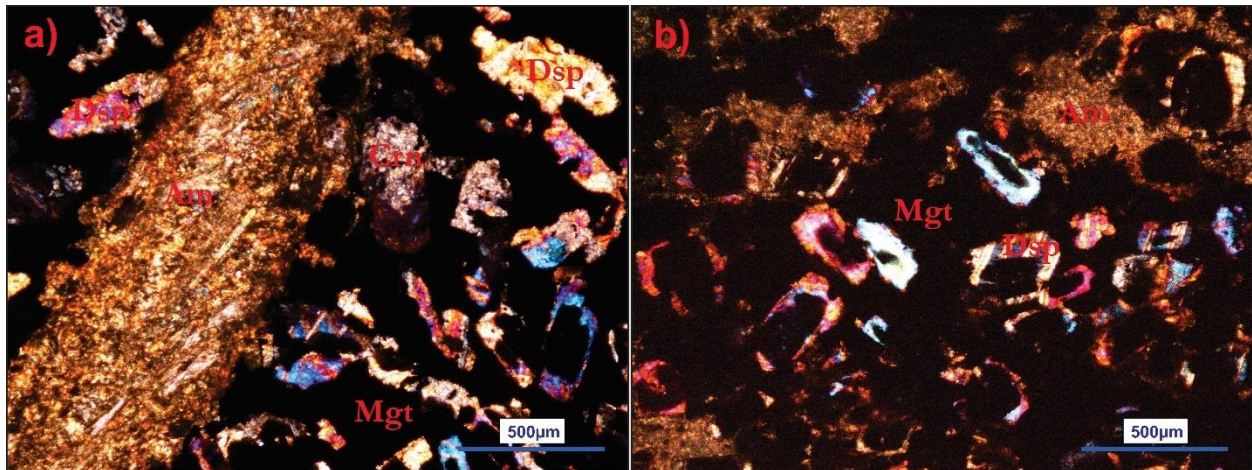
**Tabla 6**

*Composición mineralógica de la sección delgada MC-006.*

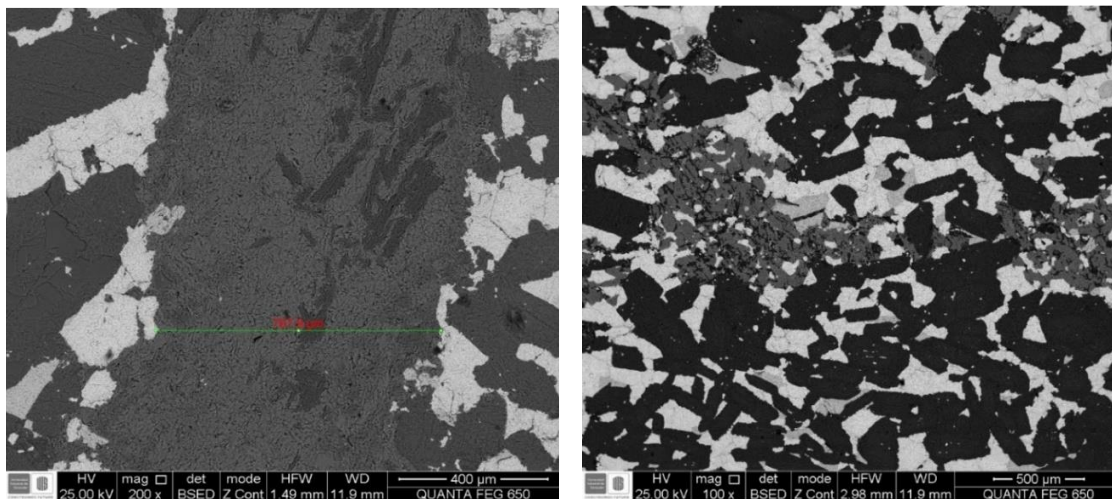
MINERAL	PORCENTAJE
OPACOS	(56%)
CORINDÓN	(15%)
AMESITA	(12%)
OXIDOS	(17%)

**Figura 17**

Aspecto general de la muestra MC-006 en microscopía de luz transmitida, en nicoles cruzados y objetivo de 10X.

**Figura 18**

Aspecto general SEM (en electrones secundarios) de la muestra de clastos con Fe-Ti, muestra MC-006



Entre el grupo resalta la muestra MC-006 (Figura 17) se observan zonas de alteración y presencia de cristales alargados paralelos entre sí, principalmente cristales de corindón

rectangulares subidioblásticos, rodeados de cristales ferromagnesianos dentro de una matriz predominante de minerales opacos. Se evidencia texturas esqueléticas en algunas zonas alteradas de la muestra y abundantes cristales de ferrohombomita (Figura 17 y Figura 18).

### **5.3 Microscopia electrónica de barrido**

Se realizó el análisis elemental semi-cuantitativo, utilizando el microscopio electrónico de barrido (SEM), para las secciones delgadas: MC-001, MC-002, MC-003 y MC-006. En las imágenes obtenidas se observa una relación entre la composición química y las características físicas de los minerales, de manera que los minerales que exhiben una tonalidad más blancuzca en las imágenes de electrones retrodispersados, corresponden preferencialmente a óxidos de hierro en oposición a los óxidos de aluminio que poseen unas tonalidades de grises más opacos. (En cuanto a los resultados se debe considerar que las muestras fueron recubiertas con grafito para facilitar su conductividad y poder realizar la técnica de una manera adecuada.).

Debido a problemas técnicos en el software EDX Genesis al momento de procesar la información y realizar el cálculo de valores semicuantitativos para minerales que presentan titanio (Ti) en su estructura cristalina, solo se pueden presentar los picos de titanio en el espectro de dispersión con un valor cercano a 4,5 KeV.

Cada análisis a continuación se presenta con sus respectivas microfotografías; en donde va indicado el punto realizado.

#### ***5.3.1 Analisis de SEM para la muestra MC-001***

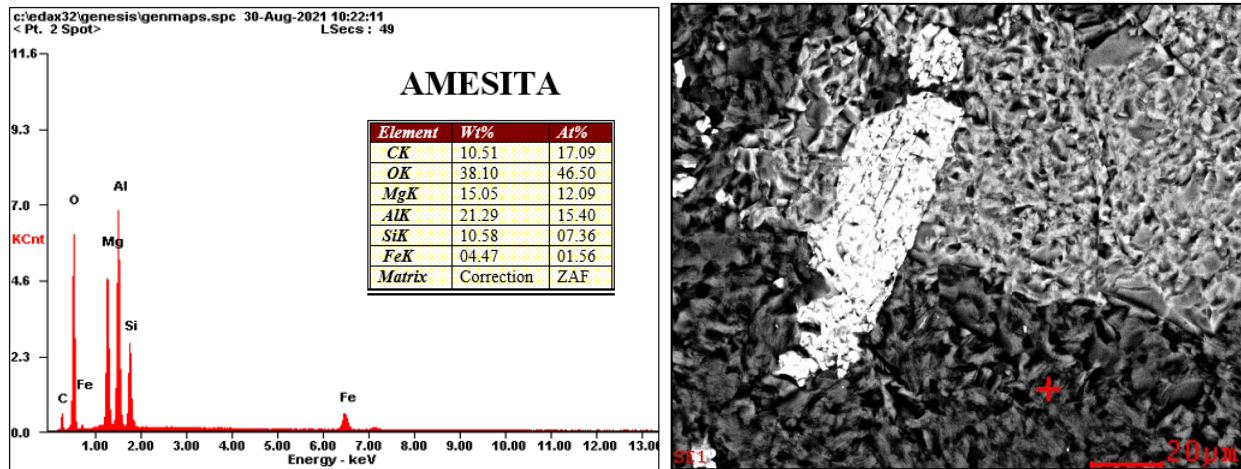
Para analizar la MC-001, se realizaron tres (3) pinchazos en la misma área y (2) por fuera de esta, los porcentajes de peso atómico de los elementos son: El primer punto corresponde a una composición de peso atómico de Aluminio en 21.29 %; 4.47% de Hierro; 38.1% de Oxígeno; 10.58% de Silicio; y 15.05 de Magnesio. Estos porcentajes corresponden a mineral de Amesita

(Figura 19). El segundo pinchazo presenta 62.28% de Hierro; 15.85 % de Oxígeno; 02.32% de Aluminio; 02.91% de Magnesio y 04.33% de manganeso lo cual corresponde a mineral de Ilmenita, se aclara que la ausencia de valores semicuantitativos para todos los minerales que presentan titanio como se había mencionado anteriormente es debido a una falla en el software del equipo (Figura 20). El tercer punto corresponde a una composición de Aluminio en 37.23%; 15.67% de Hierro; 33.31% de Oxígeno; y 06.27% de Magnesio. Estos porcentajes corresponden a mineral de Ferrohobomita (Figura 21). El cuarto punto presenta 37.77% de Oxígeno; 03.69% de Hierro; 21.25% de Aluminio; 16.14% de Magnesio; y 11.18% de silicio; lo cual corresponde a mineral de Amesita (Figura 22), El quinto punto presenta 32.41% de Oxígeno; 41.53% de Hierro; 02.67% de Aluminio; 15.81% de Carbono; 04.36% de Magnesio; 02.24% de Manganeso; 0.98% de Silicio, lo cual corresponde a mineral de Ilmenita (Figura 23).

Se obtuvieron resultados de medio a alto porcentaje de Oxígeno (O), Hierro (Fe) y Aluminio (Al) en contraste con los exclusivos valores de Silicio (Si) para los cristales de amesita.

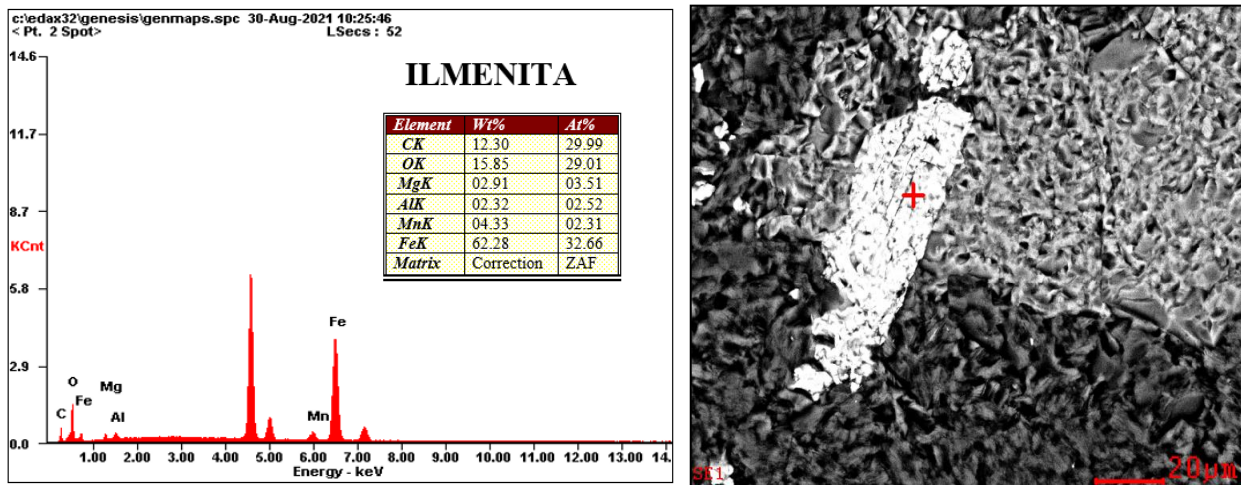
**Figura 19**

Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).



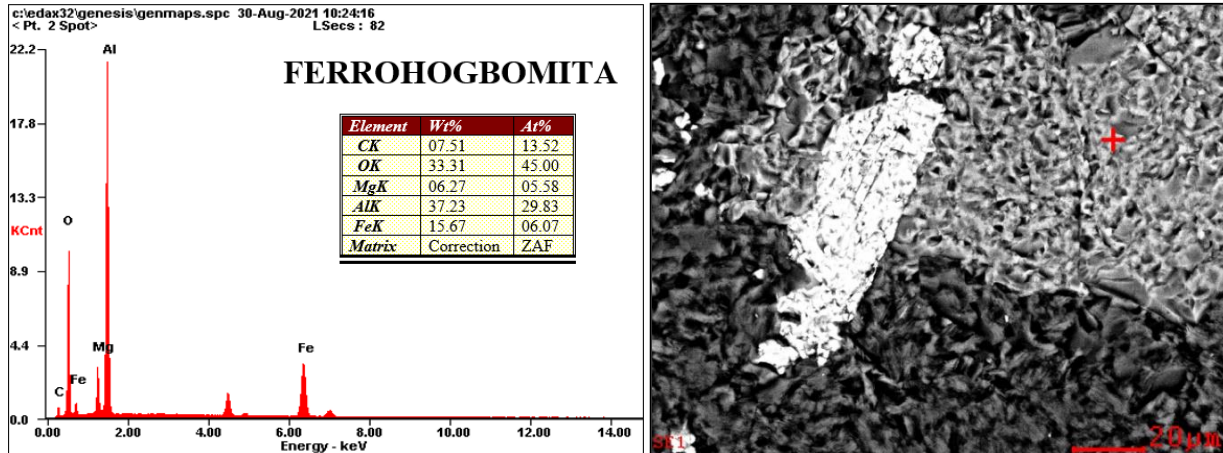
**Figura 20**

Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).



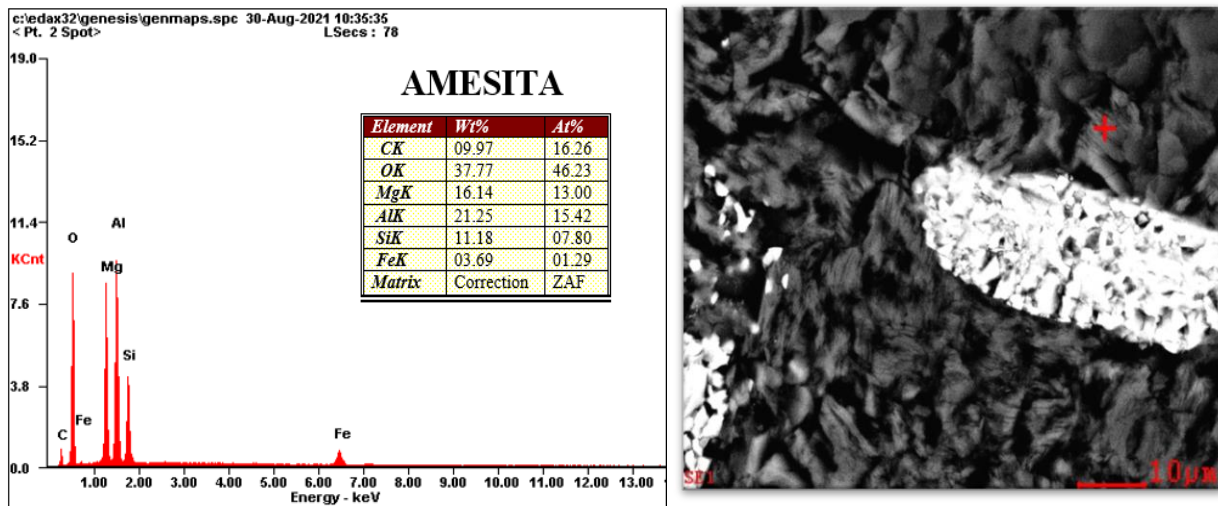
**Figura 21**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



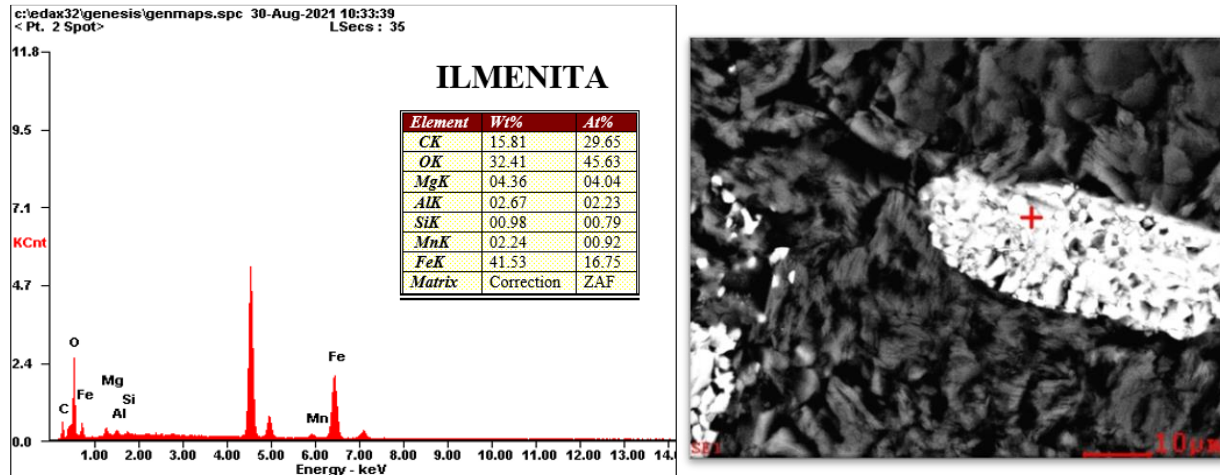
**Figura 22**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



**Figura 23**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



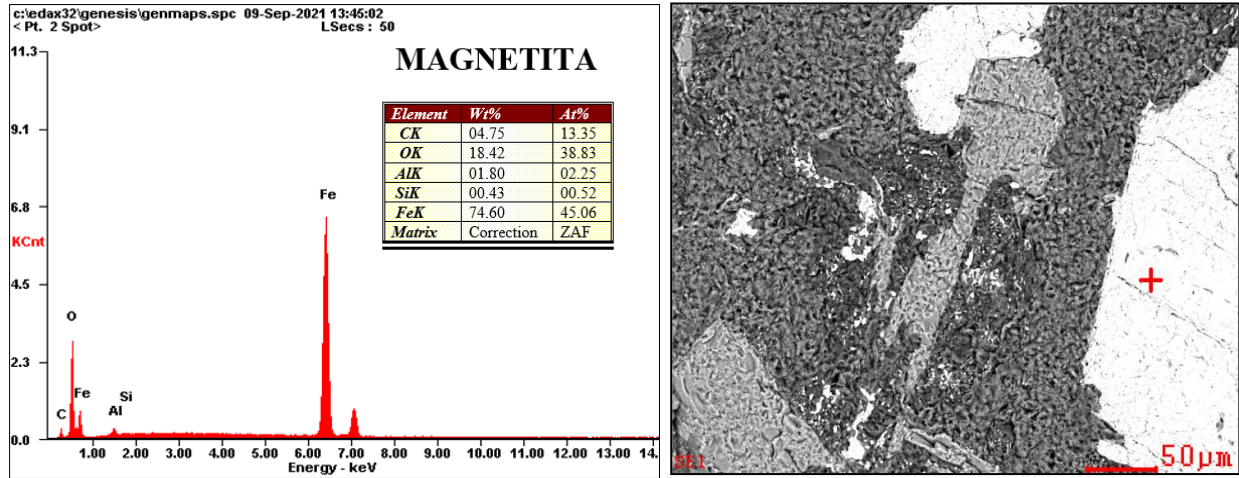
### 5.3.2 Análisis de SEM para la muestra MC-002

La cuña de roca MC-002, tiene una composición de porcentaje en peso atómico principalmente de Oxígeno (O), Silicio (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe) y Magnesio (Mg). Se realizaron varios pinchazos en la roca; los cuales se resumen en cinco (5) puntos seleccionados.

El primer punto corresponde a una composición de peso atómico de Aluminio en 1.80%; 74.6% de Hierro; 18.42% de Oxígeno; y 0,43% de Silicio. Estos porcentajes corresponden a mineral de Magnetita (Figura 24). El segundo pinchazo presenta 0.97% de Hierro; 26.11% de Oxígeno; 55.1% de Aluminio y 02.43% de Silicio, lo cual corresponde a mineral de Corindón (Figura 25). El tercer punto presenta 36.99% de Oxígeno; 8,23% de Hierro; 19,49 % de Aluminio; 15,8% de Magnesio y 13,63 de silicio, lo cual corresponde a mineral de Amesita (Figura 26). El cuarto punto presenta 17.99% de Oxígeno; 27.89% de Hierro; 35.93% de Aluminio; 06.16% de Magnesio; 0.44% de Manganeso y 0.29% de Zinc, lo cual corresponde a mineral de Hercinita (Figura 27). El Quinto punto presenta 36.02% de Oxígeno; 45.09% de Hierro; 04.27% de Aluminio; 03.96% de Silicio, lo cual corresponde a mineral de Hematita (Figura 28).

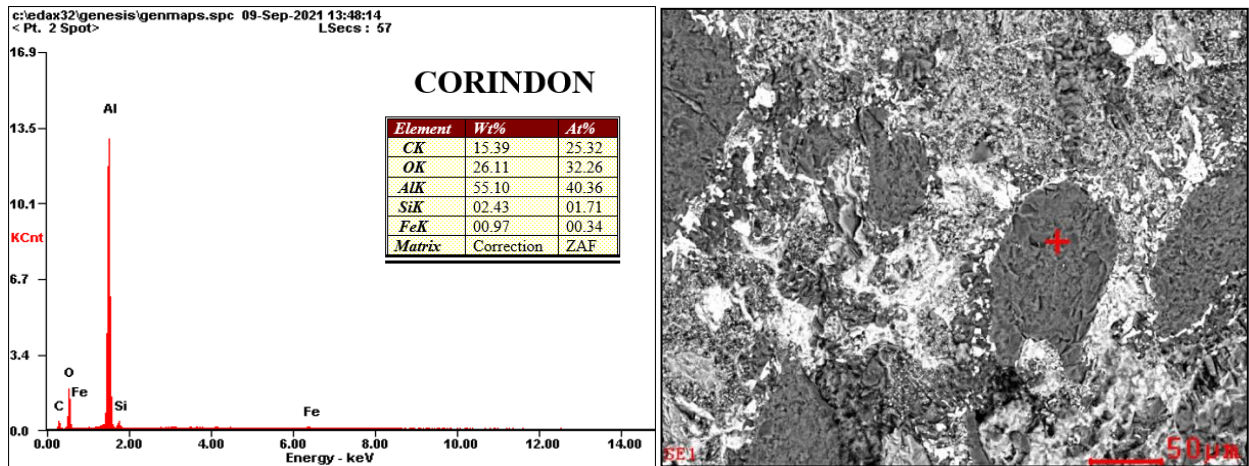
**Figura 24**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



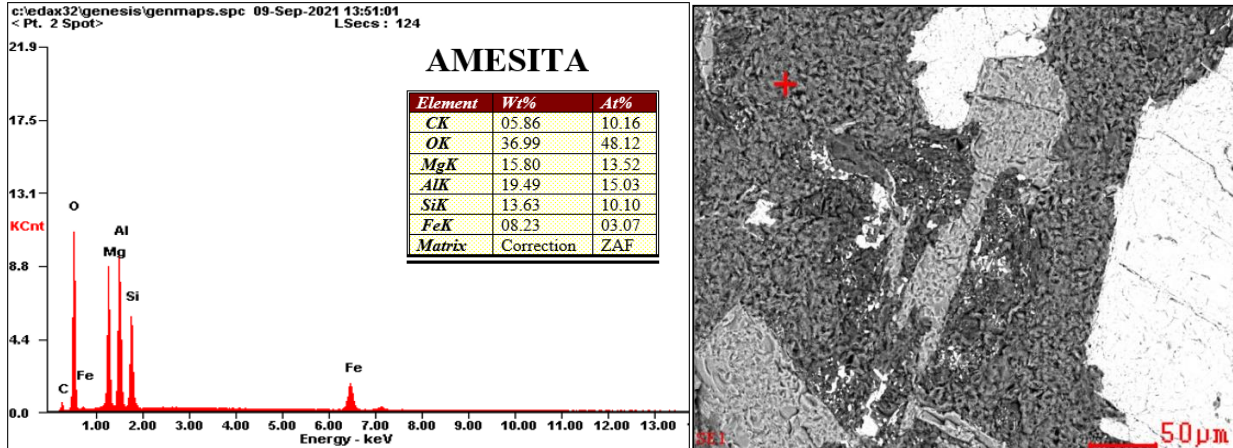
**Figura 25**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



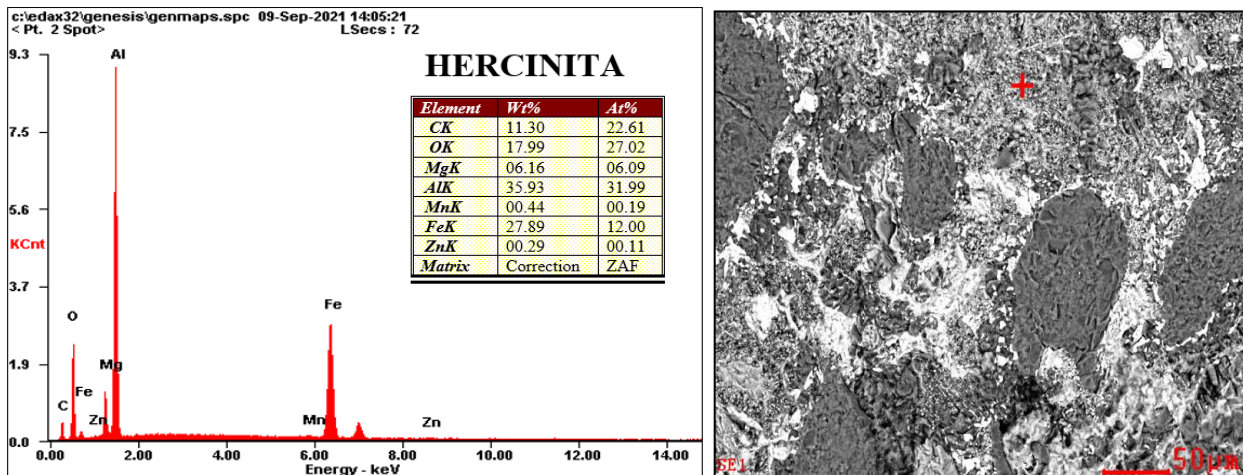
**Figura 26**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



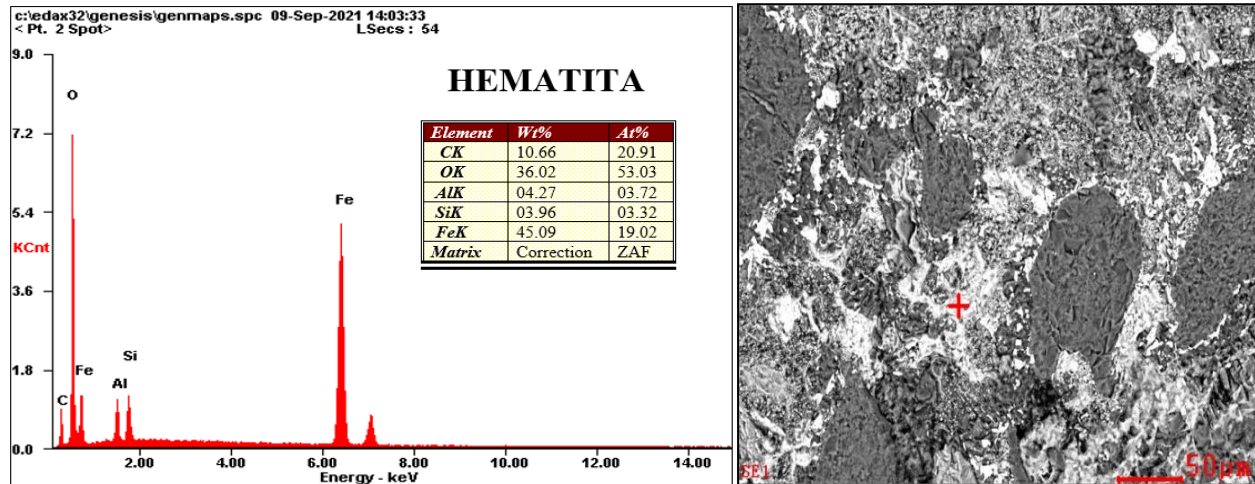
**Figura 27**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



**Figura 28**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



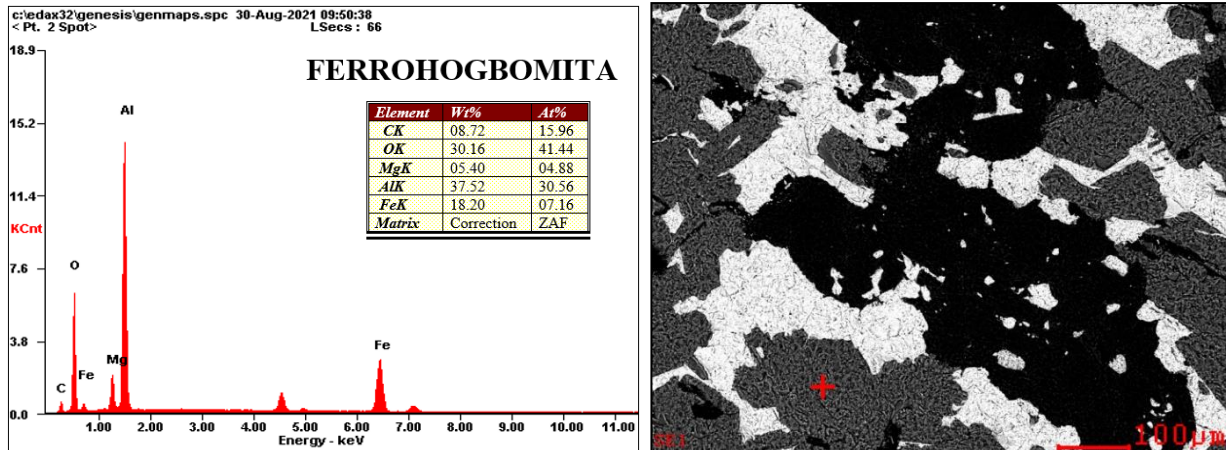
### 5.3.3 Análisis de SEM para la muestra MC-003

La MC-003 corresponde a una muestra bandeada, en el que se le realizaron seis (6) pinchazos, los cuales se concentran en dos áreas convenientes para la identificación:

El primer punto corresponde a una composición de Aluminio en 37.52%; 18.2% de Hierro; 30.16% de Oxígeno y 05.40 % de Magnesio; estos porcentajes corresponden a mineral de Ferrohobomita (Figura 29). El segundo pinchazo indica Aluminio en 8.9 %; 58.36% de Hierro y 22.16% de Oxígeno; estos porcentajes corresponden a mineral de Magnetita (Figura 30). El tercer pinchazo presenta 0.79% de Hierro; 36.4% de Oxígeno; y 54.45% de Aluminio; lo cual corresponde a mineral de Corindón (Figura 31). El cuarto punto presenta 36.74% de Oxígeno; 10.08% de Hierro; 19.86 % de Aluminio; 12.64% de Magnesio; y 10.91% de Silicio; lo cual corresponde a mineral de Amesita (Figura 32). El Quinto punto presenta 18.53% de Oxígeno; 55.95% de Hierro; 10.43% de Aluminio; y 03.35% de Manganeso; lo cual corresponde a mineral de Ilmenita (Figura 33). El Sexto punto presenta 42.35% de Oxígeno; 0.47% de Hierro; y 47.69% de Aluminio; lo cual corresponde a mineral de Corindón (Figura 34).

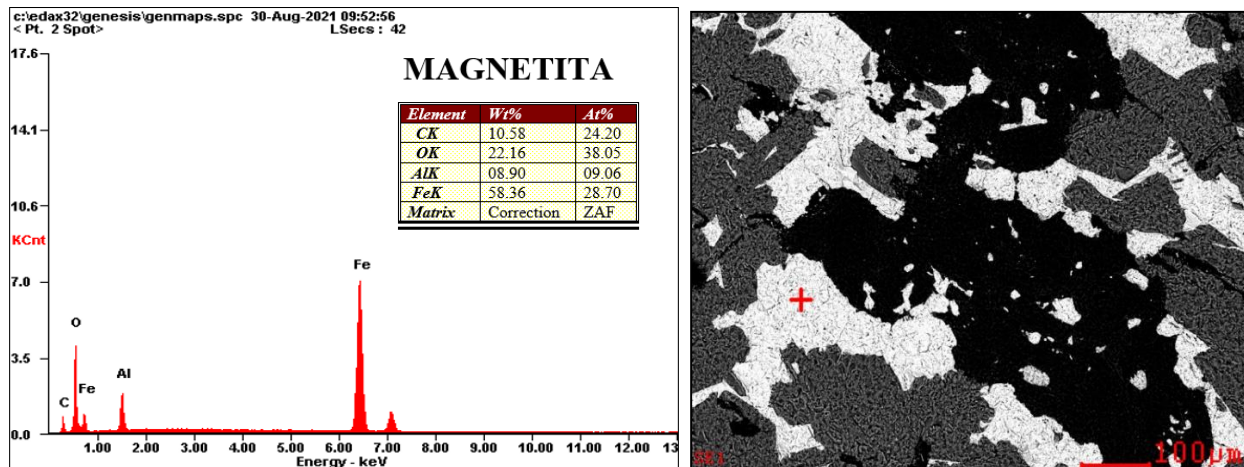
**Figura 29**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



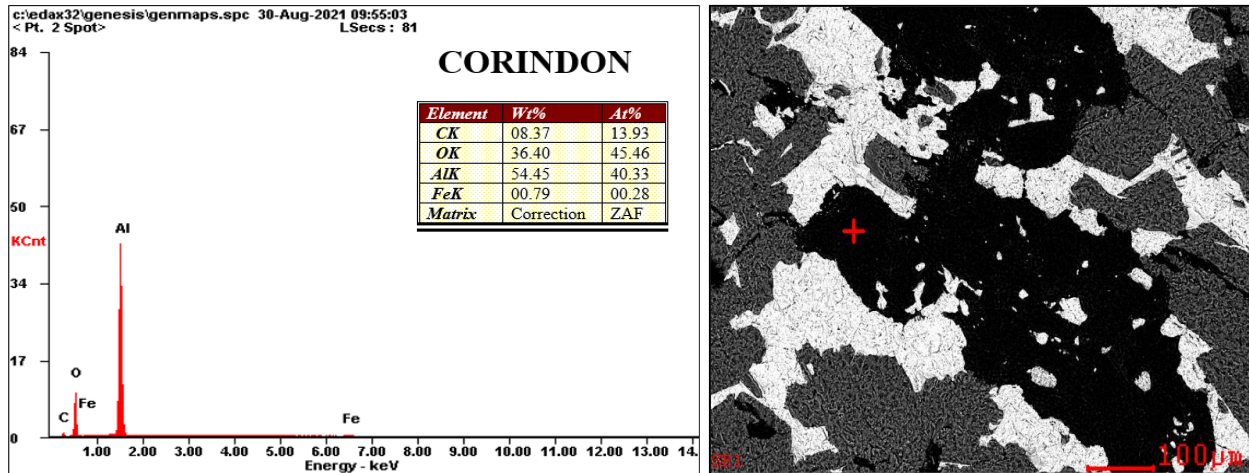
**Figura 30**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



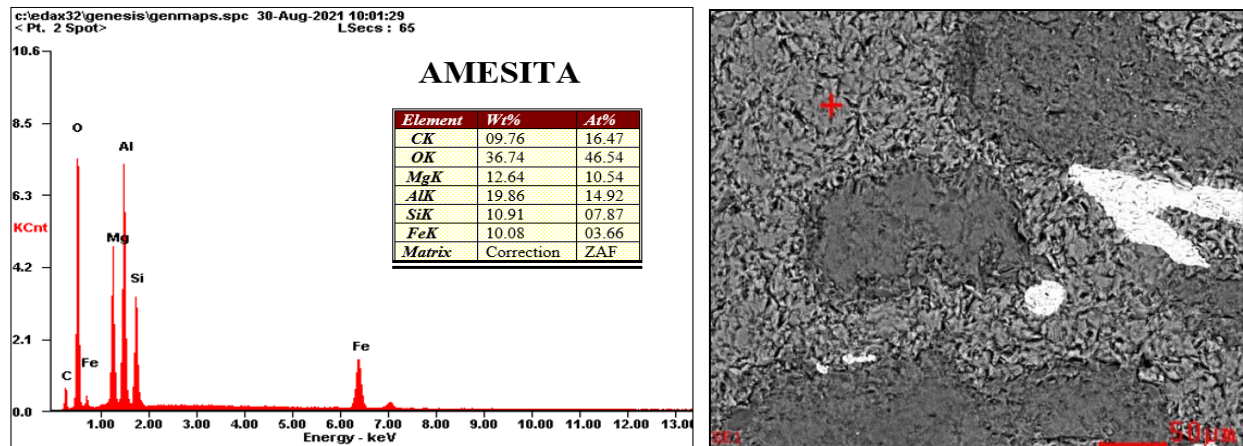
**Figura 31**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



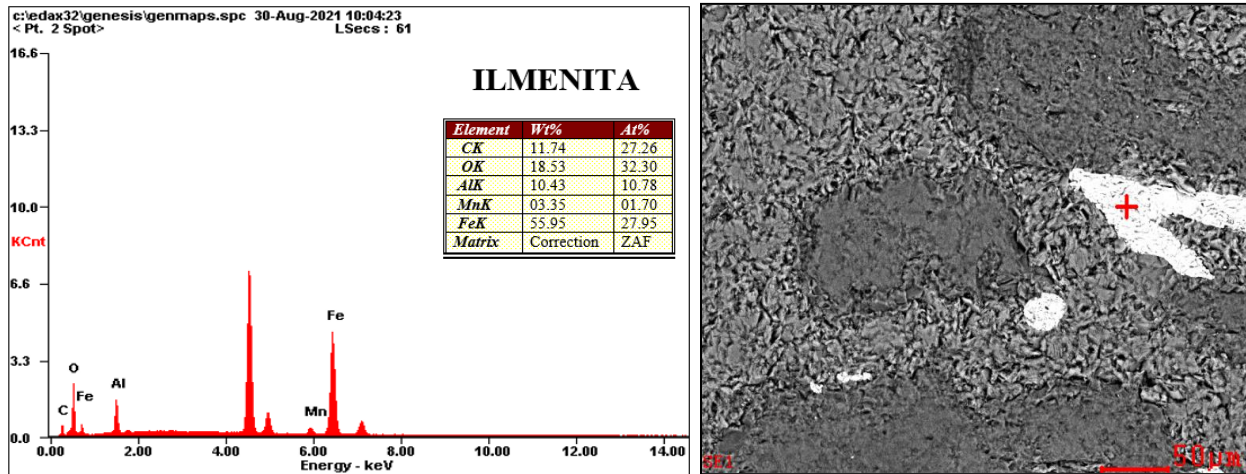
**Figura 32**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



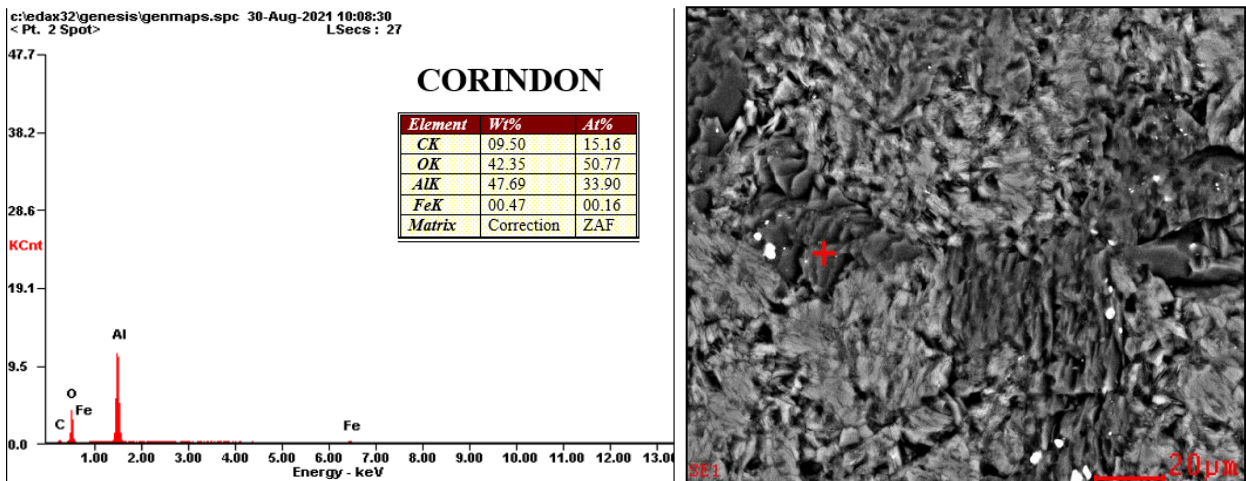
**Figura 33**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



**Figura 34**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



**5.3.4 Análisis de SEM para la muestra MC-006**

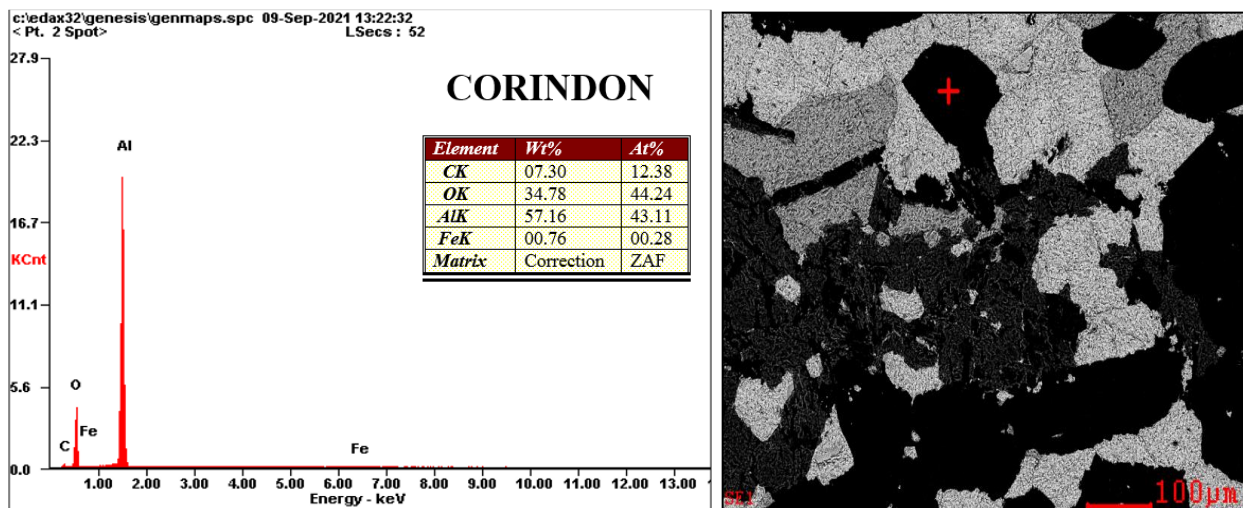
Se realizaron varios pinchazos en la roca, los cuales se resumen en cinco (5) puntos seleccionados. Es importante recordar que esta muestra se encuentra ubicada en un punto

geográficamente distinto (Cantera Cemex), con respecto a las demás recolectadas y analizadas anteriormente (Figura 9).

El primer punto corresponde a una composición de peso atómico de Aluminio en 57.16%; Oxígeno 34.78% y >1% de Hierro; estos porcentajes corresponden a mineral de Corindón (Figura 35). El segundo pinchazo presenta 70.94% de Hierro; 21,73% de Oxígeno y 1,59% de Aluminio; lo cual corresponde a mineral de Magnetita (Figura 36). El tercer punto presenta 12.15% de Oxígeno; 39,59% de Hierro; 34,41 % de Aluminio; 1,31% de Zinc; 3,65 de Magnesio; 0,86 de Manganeso; lo cual corresponde a mineral de Hercinita (Figura 37), El cuarto punto presenta 15,37% de Oxígeno; 68,2% de Hierro; 1,32% de Aluminio; 1.3% de Magnesio; 03.15% de Manganeso y 0.99% de Silicio; lo cual corresponde a mineral de Ilmenita (Figura 38). El Quinto punto presenta 40.24% de Oxígeno; 9.8% de Hierro; 17.77% de Aluminio; 12.44% de Magnesio y 12.46% de Silicio; lo cual corresponde a mineral de Amesita (Figura 39).

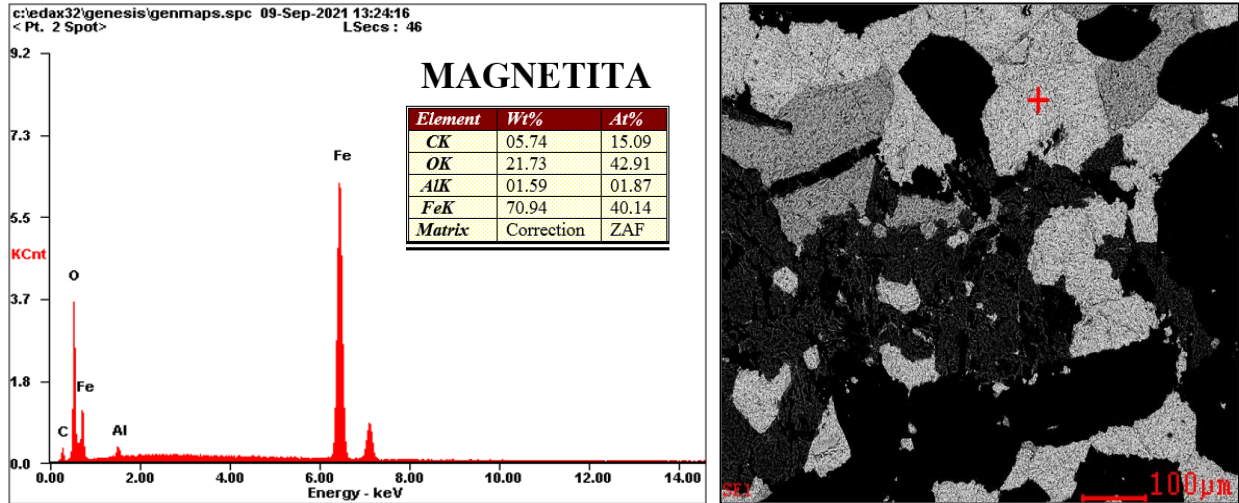
**Figura 35**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



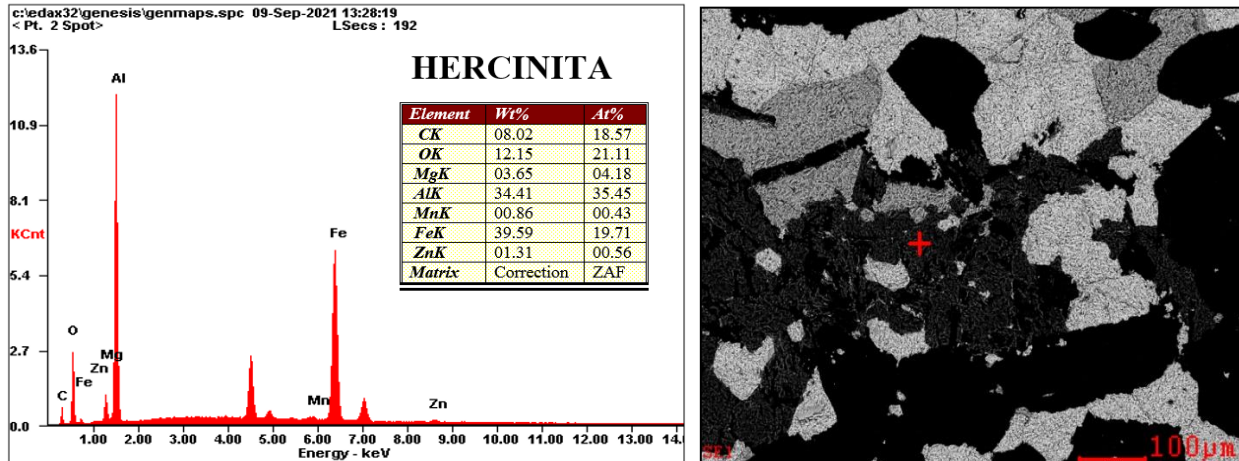
**Figura 36**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



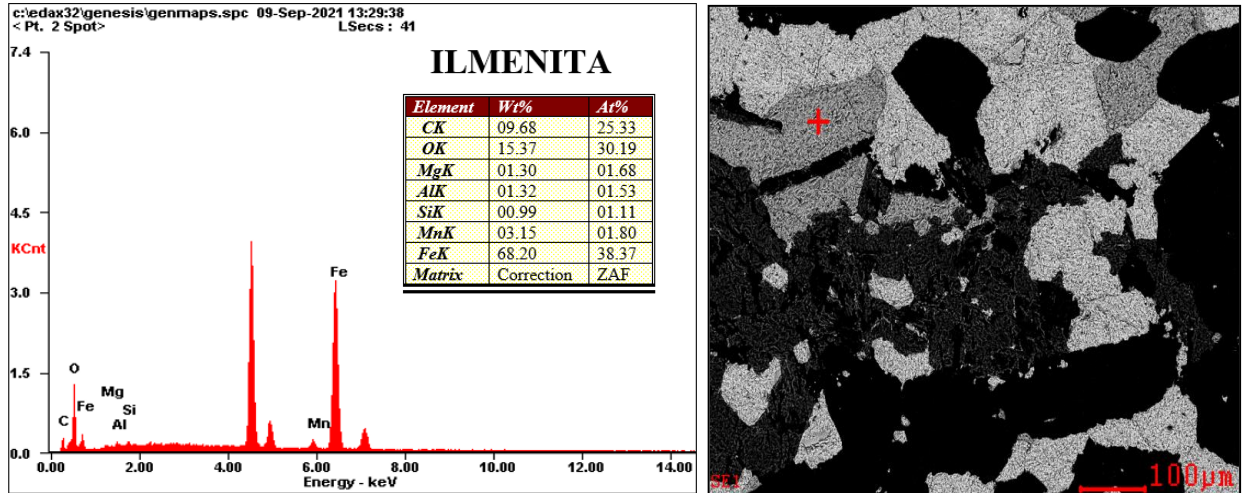
**Figura 37**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



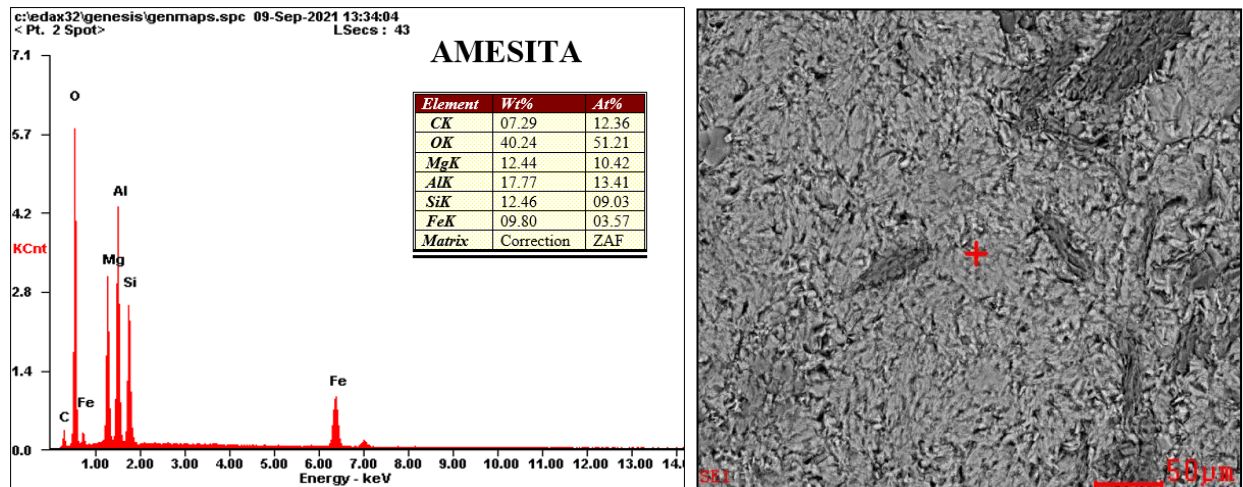
**Figura 38**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



**Figura 39**

*Gráfico de análisis y aspecto del mineral SEM (en electrones secundarios).*



#### 5.4 Difracción de Rayos X (DRX)

Se realizó los análisis de Difracción de Rayos X (DRX), en el laboratorio 104 de Rayos-X, del Edificio de Investigaciones, Parque Tecnológico Guatiguará (PTG), de la Universidad Industrial de Santander. La metodología de los análisis se realizó inicialmente en la preparación de 3 muestras.

La primera muestra es sólida, inicialmente marcada como MC 003, a la cual se le realizó análisis cualitativo de difracción de rayos X, de acuerdo con las características observadas en las muestras, seccionando en 3 partes la muestra bandeada (MC-003); las cuales se pulverizaron en un mortero de ágata, para identificar las respectivas especies minerales: la primera (003A) corresponde a una banda sencilla, la región 2 (003B) un bandeamiento más intenso y más delgado “doble”, la región 3 (003C) es la parte oscura de la muestra y ausente de bandeamiento. Dado que el material ha sufrido los procesos de alteración, es probable que se presenten algunos óxidos acompañando a los minerales “originales”. Para las muestras pulverizadas con código MC-004 y MC-006, igualmente se realizó en un Difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE, con Geometría DaVinci bajo unas condiciones determinadas (Ver Anexo DRX).

El análisis cualitativo de las fases presentes en las muestras se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos del *International Centre for Diffraction Data (ICDD)*.

5.4.1 Muestra 003A

Figura 40

Difractograma Muestra 003A

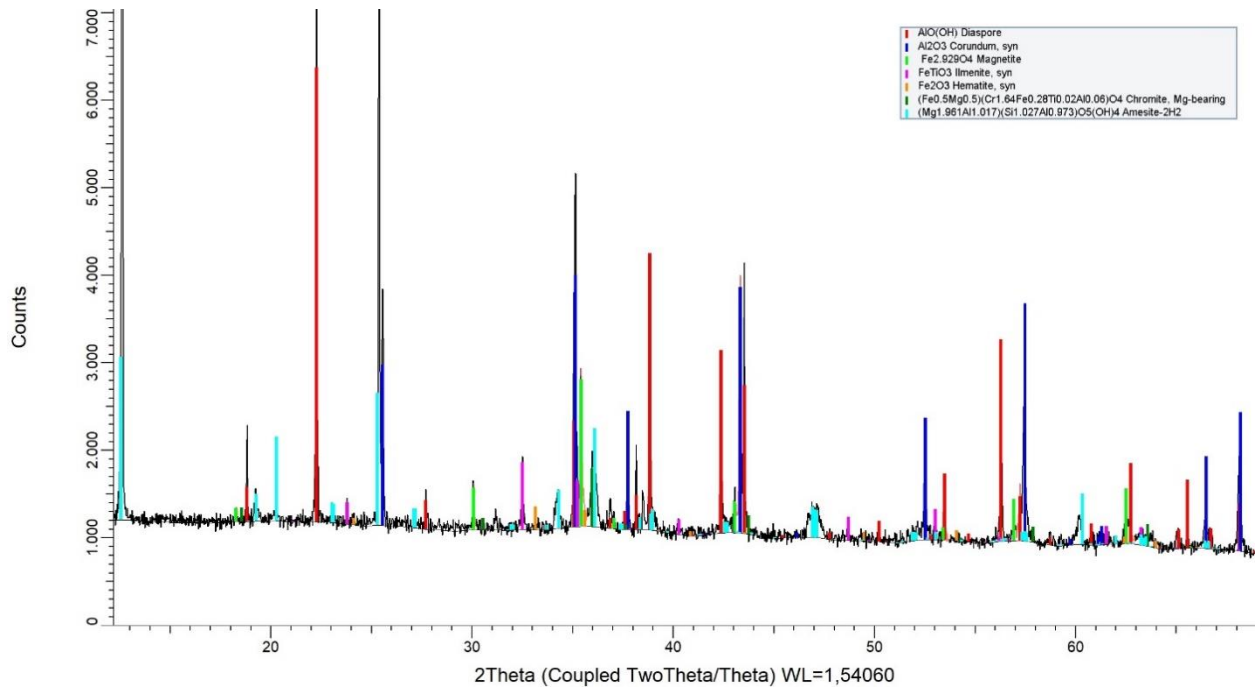


Tabla 7

Resultados DRX muestra 003A

MINERAL	FASE CRISTALINA
Diásporo	AlO(OH)
Corindón	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnetita	Fe <sub>2.929</sub> O <sub>4</sub>
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Amesita-2H <sub>2</sub>	(Mg <sub>2</sub> Al)(SiAlO <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>
Cromita	(FeMg)(Cr <sub>2</sub> FeTiAl)O <sub>4</sub>

5.4.2 Muestra 003B

Figura 41

Difractograma Muestra 003B

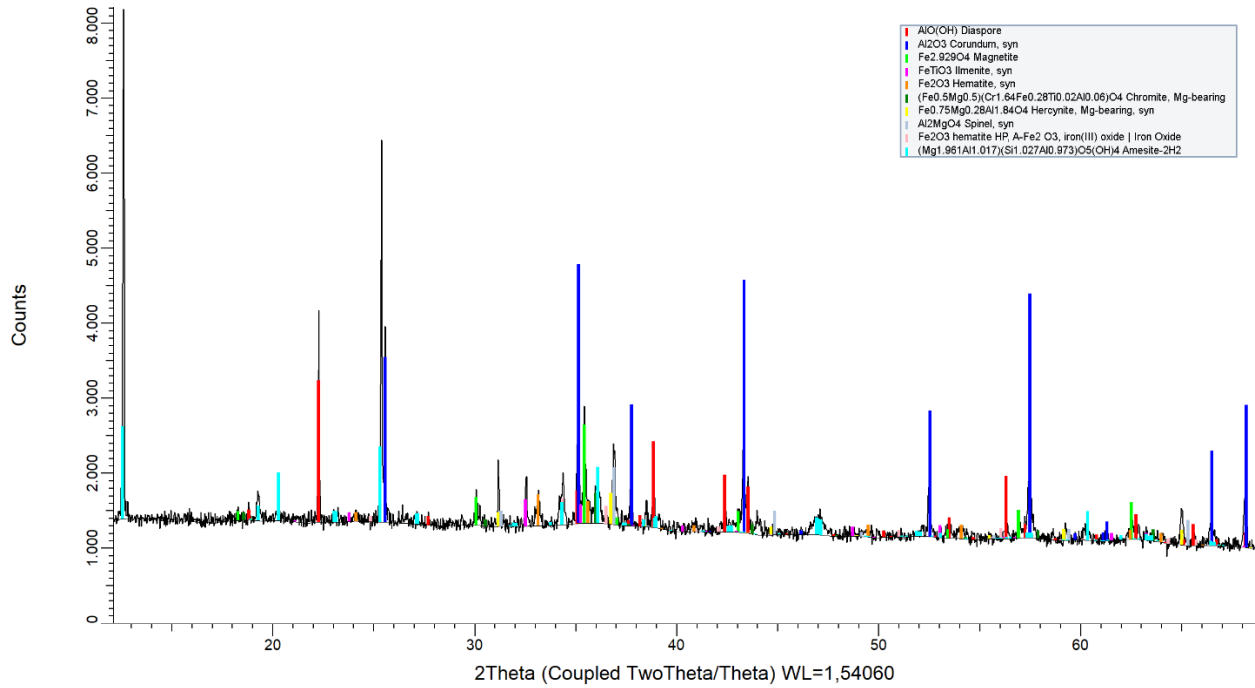


Tabla 8

Resultados DRX muestra 003B

MINERAL	FASE CRISTALINA
<b>Diásporo</b>	AlO(OH)
<b>Corindón</b>	AL2O3
<b>Magnetita</b>	Fe2.929O4
<b>Ilmenita</b>	FeTiO3
<b>Hematita</b>	Fe2O3
<b>Hercinita</b>	FeMgAl2O4
<b>Amesita-2H2</b>	(Mg2Al)(SiAlO5)(OH)4
<b>Cromita</b>	(FeMg)(Cr2FeTiAl)O4

5.4.3 Muestra 003C Negro

Figura 42

Difractograma muestra 003C

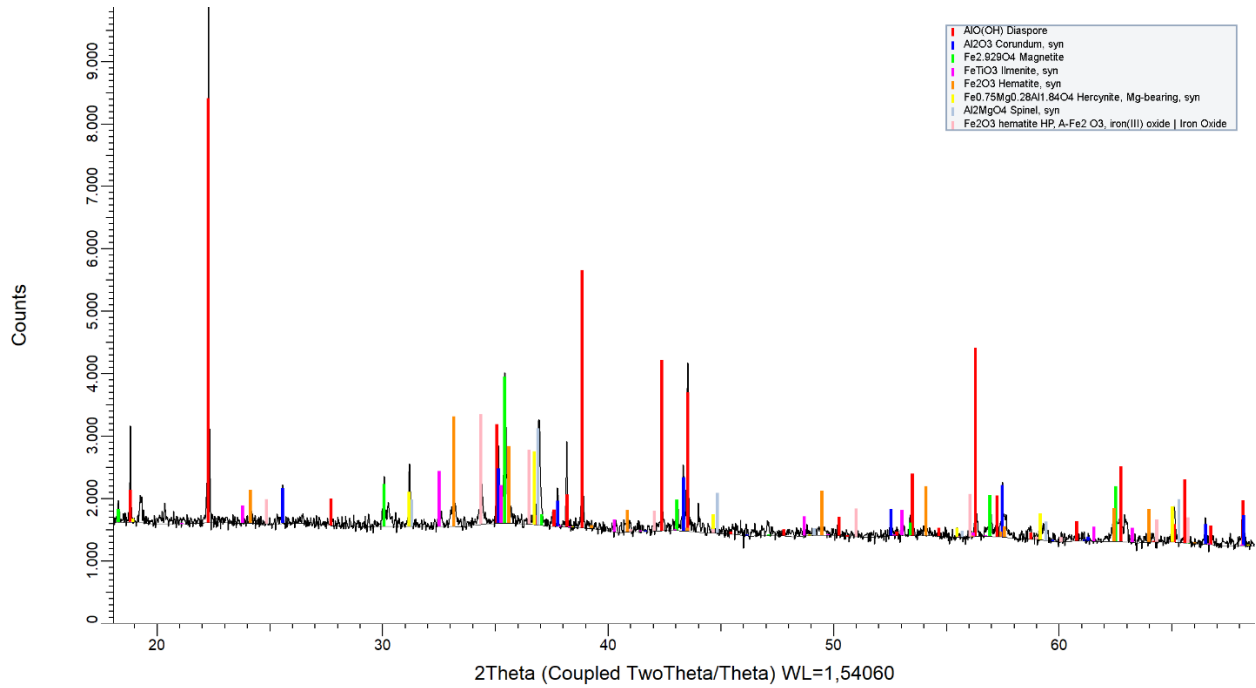


Tabla 9

Resultados DRX muestra 003C

MINERAL	FASE CRISTALINA
<b>Diásporo</b>	AlO(OH)
<b>Corindón</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Magnetita</b>	Fe <sub>2.929</sub> O <sub>4</sub>
<b>Ilmenita</b>	FeTiO <sub>3</sub>
<b>Hematita</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Hercinita</b>	FeMgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
<b>Espinela</b>	Al <sub>2</sub> MgO <sub>4</sub>

5.4.4 Muestra MC-004

Figura 43

Difractograma muestra MC-004

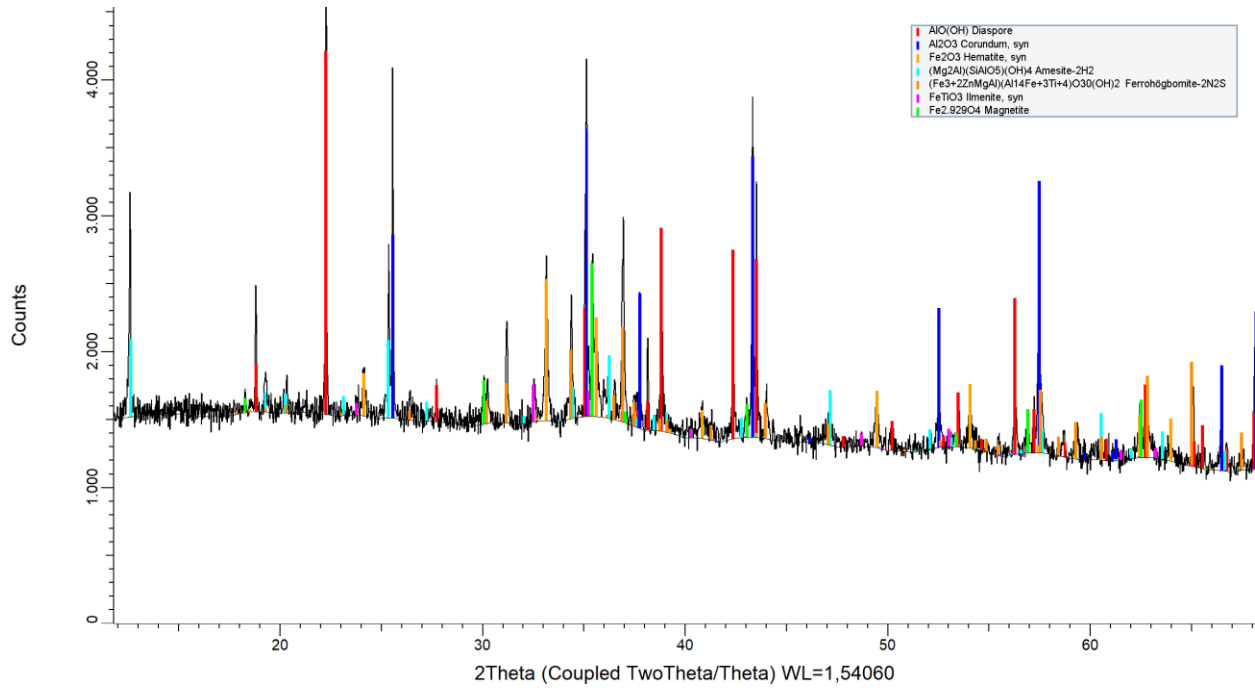


Tabla 10

Resultados DRX muestra MC-004

MINERAL	FASE CRISTALINA
Diasporo	AlO(OH)
Corindón	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Magnetita	Fe <sub>2.929</sub> O <sub>4</sub>
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ferrohombomita-2N2S	(Fe <sup>2+</sup> ,Mg,Zn,Al) <sub>3</sub> (Al,Ti,Fe <sup>3+</sup> ) <sub>8</sub> O <sub>15</sub> (OH) <sub>2</sub>
Amesita-2H2	(Mg <sub>2</sub> Al)(SiAlO <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>

5.4.5 Muestra MC-006

Figura 44

Difractograma muestra MC-006

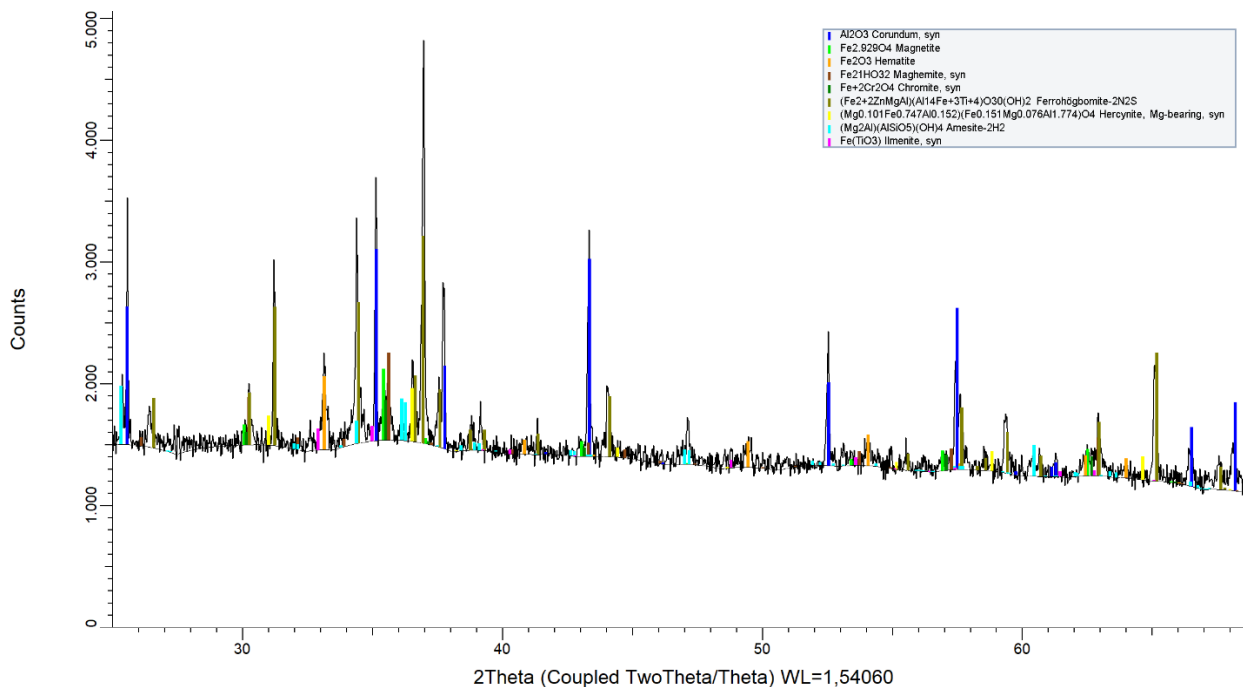


Tabla 11

Resultados DRX muestra MC – 006

<b>MINERAL</b>	<b>FASE CRISTALINA</b>
<b>Corindón</b>	AL2O3
<b>Magnetita</b>	Fe2.929O4
<b>Ilmenita</b>	FeTiO3
<b>Hematita</b>	Fe2O3
<b>Ferrohögbonite-2N2S</b>	(Fe <sub>2+</sub> ,Mg,Zn,Al) <sub>3</sub> (Al,Ti,Fe <sub>3+</sub> ) <sub>8</sub> O <sub>15</sub> (OH) <sub>2</sub>
<b>Amesita-2H2</b>	(Mg <sub>2</sub> Al)(SiAlO <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>
<b>Cromita</b>	(FeMg)(Cr <sub>2</sub> FeTiAl)O <sub>4</sub>
<b>Hercynita</b>	FeMgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
<b>Maghemita</b>	Fe <sub>3+</sub> 2O <sub>3</sub>

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la técnica de difracción de rayos X permitió identificar de una manera acertada los minerales presentes en las muestras y de esta

manera corroborar las observaciones realizadas mediante petrografía de luz transmitida, así como identificar especies minerales de los cuales no fue posible mediante otras técnicas usadas.

### 5.5 Análisis Geoquímico

Los análisis de química total de roca fueron procesados por el laboratorio ALS Colombia (Ver anexo 1), donde se realizó la geoquímica de roca total y se obtuvieron los elementos mayores para dos muestras de roca, una con nomenclatura MC-003 que corresponde al clasto que presenta bandeamiento y la otra con nomenclatura MC-004 que corresponde al clasto negro de textura masiva. (Figura 8).

**Tabla 12**

*Elementos mayores Análisis Geoquímica roca total.*

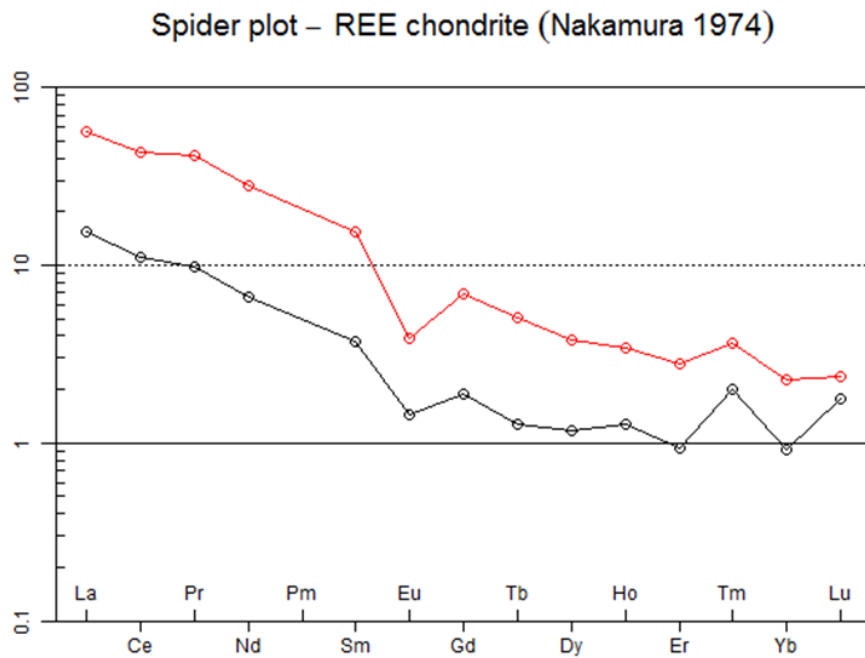
MUESTRA	Au	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	BaO	Total	LOI
	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MC-004	0,001	1,28	49,8	37,9	0,02	6,13	<0,01	<0,01	0,057	3,49	0,13	0,01	<0,01	<0,01	99,7	0,9
MC-003	<0,001	3,18	55,8	28,5	0,02	4,53	<0,01	0,01	0,046	2,15	0,13	0,02	<0,01	<0,01	99	4,61

En base a los resultados reportados en la Tabla 12 se nota una diferencia en la composición química de las dos muestras, en las cuales la MC-003 que presenta foliación gneílica arroja un mayor contenido de SiO<sub>2</sub> (3,18 % en peso), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (55,8 % en peso) y reduce el contenido de otros componentes como el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO y el TiO<sub>2</sub> (con valores para MC-003 de 28,5%, 4,53% y 2,15% en peso respectivamente). Al comparar las dos muestras analizadas, se tiene una mayor cantidad de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO y de TiO<sub>2</sub> en la MC-004 por la mayor cantidad de minerales como magnetita, ferrohobomita, espinela e ilmenita respecto a la MC-003; en el caso de los mayores valores de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la MC-003 en comparación de la MC-004 se justifican por la mayor cantidad de amesita, diásporo y corindón.

A continuación, se grafican los patrones REE normalizados a diferentes valores de condrito y manto primitivo definido por diversos autores (La línea roja corresponde al MC-003 y la negra al MC-004):

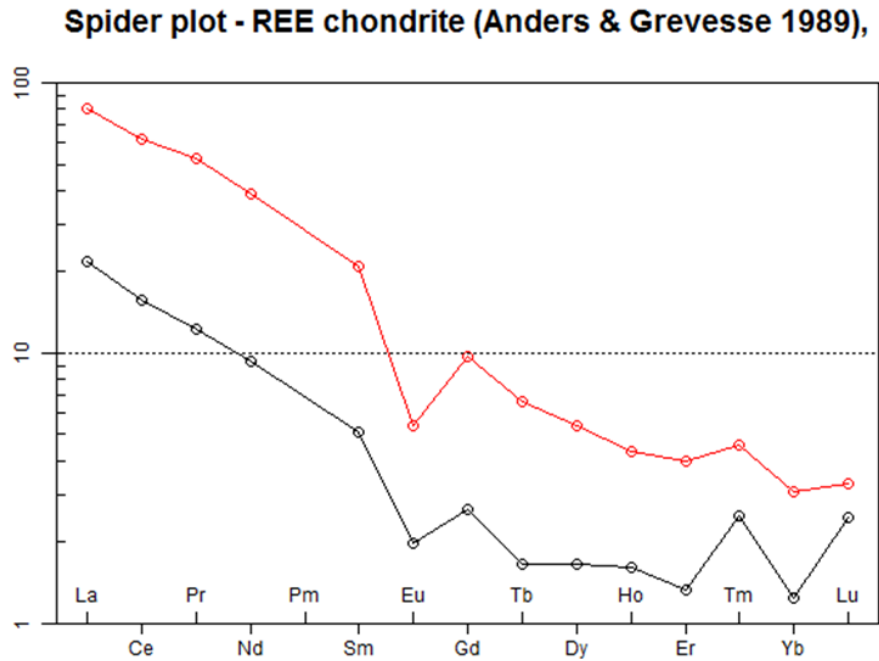
**Figura 45**

*Diagrama tierras raras comparado con condrito (Nakamura 1974).*



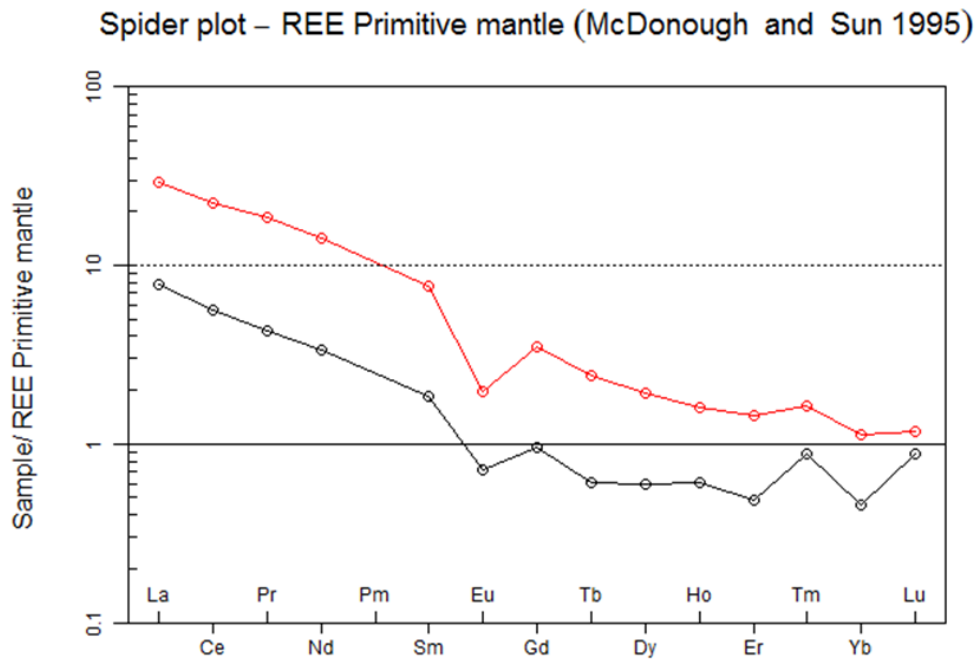
**Figura 46**

*Diagrama tierras raras comparado con condrito (Anders & Grevesse 1989).*



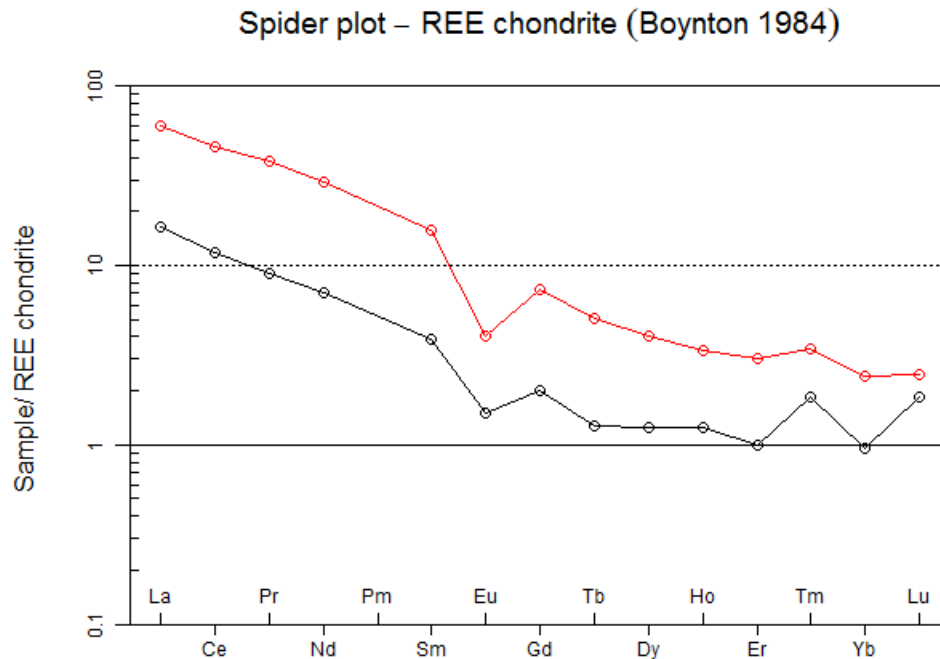
**Figura 47**

*Diagrama tierras raras comparado con el manto primitivo (McDonough & Sun 1995).*



**Figura 48**

*Diagrama tierras raras comparado con condrito (Boynton 1984).*



Los patrones REE para las dos muestras analizadas presentan una pendiente negativa, con anomalías negativas en Eu y un leve pico positivo de Tm. Al comparar los datos geoquímicos de las dos muestras gráficamente se puede notar que la MC-003 (de tonalidad roja en las gráficas) se encuentra levemente más enriquecido en REE que la MC-004, definido en igual medida por el fraccionamiento total de tierras raras de 25,41 y 17,23 (La/Yb normalizado) para las muestras MC-003 y MC-004 respectivamente.

Los patrones de Tierras Raras de las dos muestras analizadas en el marco del presente estudio muestran un enriquecimiento de las Tierras Raras Ligeras y un empobrecimiento progresivo de las Tierras Raras Pesadas. Para el caso de la muestra MC-003, es posible derivar que ese patrón de Tierras Raras es prácticamente similar al patrón medio de las Tierras Raras de la Corteza Continental, por lo que se deduce que esos clastos presentan una impronta de corteza

continental evolucionada (>30 km de espesor). La anomalía negativa en Eu se interpreta como asociada a fraccionamiento de plagioclasa en profundidad.

En lo referente a la muestra MC-004, se observa nuevamente el fraccionamiento de plagioclasa (debido a la anomalía negativa de Eu), pero el patrón de las Tierras Raras en general presenta contenidos más bajos (normalizados al condrito C1), por lo que se concluye que esos clastos podrían representar una procedencia diferente, es decir, derivan de niveles diferentes de la unidad Gneis de Bucaramanga, con protolitos de afinidad cortical algo más primitiva.

## **6. Consideraciones preliminares sobre la génesis de las mineralizaciones Fe – Ti**

Los clastos de rocas metamórficas ricas en Fe-Ti encontradas en depósitos cuaternarios aluviales aflorantes al norte de la Ciudad de Bucaramanga, se caracterizan por presentar minerales tales como magnetita, ilmenita, corindón y diásporo, entre otros.

El corindón en la titanomagnetita se presenta como intercrecimientos complejos con hercinita y magnetita (intercrecimientos HCM). Su origen se puede atribuir a la oxidación de la hercinita expresada en el equilibrio  $6 \text{FeAl}_2\text{O}_4 + \text{O}_2 = 2 \text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{Al}_2\text{O}_3$  (Arguin, 2018). Se cree que la exsolución preferencial de la antigua hercinita pobre en Zn de los márgenes de la solución sólida es el resultado del enriquecimiento de Al en relación con el Zn a través de la diferenciación del magma.

Arguin, (2018) sugiere que la migración de ilmenita hacia los límites de los granos es responsable del engrosamiento de los granos adyacentes de ilmenita primaria (es decir, que cristalizaron del magma) y la imposición de exsoluciones relativamente gruesas de hercinita, que posteriormente se oxidaron para formar intercrecimientos de hercinita – magnetita – corindón;

debido a la similitud mineralógica y textural se podría considerar como una posible explicación para las muestras caracterizadas en este estudio.

Adicionalmente se ha reportado una relación entre el enriquecimiento en Al, Fe, Ti, Mg con respecto a pérdidas de silicio estimadas en rocas con composiciones basálticas, que indican una relación positiva con la intensidad de procesos de intemperismo “Laterización” (Grapes, 2010). La hogbomita suele encontrarse también en rocas basálticas extremadamente alteradas hidrotermalmente, que luego fueron sujetas a un metamorfismo regional de alto grado, siendo rocas que estaban muy oxidadas desde el principio (Petersen, 1989).

Por consiguiente, probablemente la ferrohogbomita consistió en ilmenita y magnetita con contenido de aluminio u otra fase de espinela portadora de titanio. De tal forma que, durante un evento de oxidación, la ilmenita reaccionó con magnetita para formar ferrohögobomita, y la magnetita original se oxidó a hematita (Hejny, 2002).

## 7. Conclusiones

- Los clastos ricos en Fe-Ti se presentan en coluviones y aluviones cuaternarios aflorantes al norte de Bucaramanga, en el bloque inmediatamente descendente localizado al oeste de la falla de Bucaramanga. Los clastos presentan una foliación gnéisica, lo cual permite sugerir una relación con fuentes de rocas metamórficas (Gneis de Bucaramanga), de protolitos ígneos.
- Los análisis de microscopía óptica y electrónica de los clastos objeto de estudio, permiten identificar las siguientes fases minerales: corindón, magnetita, ilmenita, titano-ilmenita, diásporo, cromita, ferrohobomita, amesita y hematita, estos últimos, formados por alteración hidrotermal y eventos supérgenos.
- La Difracción de Rayos X y la geoquímica de roca total confirman la presencia de corindón, magnetita e ilmenita como minerales de mena y ferrohobomita, hercinita y amesita como minerales de ganga. Los contenidos de Fe y Ti son de (28-38%) y (49-55%) respectivamente, lo cual está muy por encima del Clark de estos elementos (composición media de la corteza terrestre).
- El corindón que conforma una buena parte de los clastos exhibe macroscópicamente formas euhedrales, se presume que fue generado por procesos de exsolución. Los valores de Ti y Fe se relacionan principalmente con los minerales ilmenita y magnetita, además de la casi nula presencia de sílice en los materiales estudiados.
- Los patrones de REE permiten plantear la posibilidad que los protolitos de las rocas que conforman los clastos corresponden con rocas propias de la corteza, pero de dos tipos diferentes: una corteza continental más félsica y madura, y otra más básica e inmadura.

- A partir de lo anteriormente expuesto, se puede inferir de manera preliminar la posibilidad que las rocas in situ de las cuales provienen estos clastos corresponden con rocas metamórficas de protolito ígneo.
- Debido a la poca información se evita asignar una génesis específica a la procedencia de los clastos ricos Fe-Ti. Sin embargo, de manera preliminar se propone un desmantelamiento de masas anortosíticas con metamorfismo regional como las reportadas en la Sierra Nevada de edad Proterozoica, similares en mineralogía, pero con valores inferiores en el fraccionamiento de REE de los reportados por Betancur-Figueroa *et al.*, (2020). La correlación temporal de la sierra nevada de Santa Marta con el Macizo de Santander sugiere de manera preliminar que el macizo pudiera en algún sector del área de estudio presentar evidencias de estos cuerpos ricos Fe – Ti.

### 8. Recomendaciones

- Realizar estudios detallados de campo con el fin de plantear un modelo de proveniencia y obtener mediante datos geofísicos más indicios al respecto.
- Realizar una campaña de campo en los alrededores de la zona de estudio, con el fin de identificar in situ las rocas y demás evidencias de las relaciones geológicas que permitan establecer con certeza el origen de estos materiales.
- Teniendo en cuenta la evidencia geoquímica y la importancia que podría representar la presencia en metales del grupo del platino (PGE) y base, se sugiere realizar una caracterización detallada de más muestras y si es posible considerar la aplicación de técnicas de geoquímica complementarias, como análisis del contenido de elementos del grupo platino, así como geotermometría y geobarometría para definir condiciones genéticas.
- Realizar análisis de química mineral para determinar el comportamiento mineralógico de los minerales presentes en las rocas objeto de estudio, con el fin de determinar los cambios químicos durante la formación de las especies minerales y de esta manera definir los procesos que llevaron a su formación.
- Implementar un análisis detallado de petrografía de luz reflejada y microscopía electrónica de barrido, para definir de una manera más detallada la relación que presentan los minerales opacos entre sí y los demás minerales identificados en petrografía de luz transmitida.
- Realizar dataciones de este cuerpo cuando sea identificado in situ, para determinar de manera cuantitativa una edad promedio de formación y así proponer un modelo que explique la presencia de estos cuerpos (posiblemente anortosíticos con metamorfismo) en el Macizo de Santander, complementando el modelo evolutivo del macizo.

**Referencias bibliográficas**

- Ahmed, A. H., & Gharib, M. E. (2018). Formation of corundum and associated mineral zones in the hybrid ultramafic-pegmatite association of the Neoproterozoic Hafafit core complex, South-Eastern Desert, Egypt. *Ore Geology Reviews*, 96, 72–97. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.008>
- Arguin, J. P., Pagé, P., Barnes, S. J., Girard, R., & Duran, C. (2018). An integrated model for ilmenite, Al-spinel, and corundum exsolutions in titanomagnetite from oxide-rich layers of the Lac Doré complex (Québec, Canada). *Minerals*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/min8110476>
- Arias, A., Bernal, L., González, H., López, J., Primelles, R. F. L., Arenas, D. M. M., Moreno, G., Rodríguez, Á. M., & Melo, C. U. (2019). Recursos minerales de Colombia. In *Servicio Geológico Colombiano* (Vol. 2).
- Bachmann, K., Menzel, P., Tolosana-Delgado, R., Schmidt, C., Hill, M., & Gutzmer, J. (2019). Multivariate geochemical classification of chromitite layers in the Bushveld Complex, South Africa. *Applied Geochemistry*, 103(December 2018), 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.02.009>
- Baidada, B., Alansari, A., Zoheir, B., Ilmen, S., Soulaïmani, A., & Ikenne, M. (2018). Iron oxide copper-gold (IOCG) mineralization at the Imiter inlier, Eastern Anti-Atlas, Morocco. *Chemie Der Erde*, 78(4), 462–478. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2018.10.002>
- Beaudoin, G., Dupuis, C., Gosselin, P., & Jébrak, M. (2007). Mineral chemistry of iron oxides: application to mineral exploration. *Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting. SGA, January*, 497–500. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Mineral+chemistry+of+iron+oxides++application+to+mineral+exploration#6>

- Borisenko, L. F., Lebedeva, S. I., & Serdobova, L. I. (1969). Titanium magnetite and magnetite of iron ore deposits of different genesis. *International Geology Review*, *11*(12), 1408–1418. <https://doi.org/10.1080/00206816909475193>
- Bourdelle, F., Truche, L., Pignatelli, I., Mosser-Ruck, R., Lorgeoux, C., Roszypal, C., & Michau, N. (2014). Iron-clay interactions under hydrothermal conditions: Impact of specific surface area of metallic iron on reaction pathway. *Chemical Geology*, *381*, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.013>
- Boutroy, E., Dare, S. A. S., Beaudoin, G., Barnes, S. J., & Lightfoot, P. C. (2014). Magnetite composition in Ni-Cu-PGE deposits worldwide: Application to mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, *145*, 64–81. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.05.010>
- Brodbeck, M., Ubide, T., Kleinhamns, I. C., Schoenberg, R., & Kamber, B. S. (2019). Quantitative data extraction from orthopyroxene trace element maps and its potential to examine the formation of the UG2 unit, bushveld complex. *Minerals*, *9*(2). <https://doi.org/10.3390/min9020073>
- Brown, L. L., Mcenroe, S. A., & Peck, W. H. (2011). The Earth's Magnetic Interior. *The Earth's Magnetic Interior*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0323-0>
- Buddington, A. F., Fahey, J., & Vlisidis, A. (1963). Degree of oxidation of adirondack iron oxide and iron-titanium oxide minerals in relation to petrogeny. *Journal of Petrology*, *4*(1), 138–169. <https://doi.org/10.1093/petrology/4.1.138>
- Cameron, E. N., & Desborough, G. A. (1964). Origin of certain magnetite-bearing pegmatites in the eastern part of the Bushveld complex, South Africa. *Economic Geology*, *59*(2), 197–225. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.59.2.197>
- Charlier, B., Namur, O., Duchesne, J. C., Wiszniewska, J., Parecki, A., & Auwera, J. Vander. (2009). Cumulate origin and polybaric crystallization of Fe-Ti oxide ores in the Suwalki Anorthosite, Northeastern Poland. *Economic Geology*, *104*(2), 205–221. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.2.205>

- Charlier, B., Namur, O., Latypov, R., & Tegner, C. (2015). Layered intrusions. In *Layered Intrusions*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9652-1>
- Charlier, B., Namur, O., Malpas, S., de Marneffe, C., Duchesne, J. C., Auwera, J. Vander, & Bolle, O. (2010). Origin of the giant Allard Lake ilmenite ore deposit (Canada) by fractional crystallization, multiple magma pulses and mixing. *Lithos*, *117*(1–4), 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.02.009>
- Cisneros de León, A., Weber, B., Ortega-Gutiérrez, F., González-Guzmán, R., Maldonado, R., Solari, L., Schaaf, P., & Manjarrez-Juárez, R. (2017). Grenvillian massif-type anorthosite suite in Chiapas, Mexico: Magmatic to polymetamorphic evolution of anorthosites and their Ti-Fe ores. *Precambrian Research*, *295*, 203–226. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.028>
- Clavijo, J., Mantilla, L., Pinto, J., Bernal, L., & Pérez, A. (2008). Evolución Geológica De La Serranía De San Lucas, Norte Del Valle Medio Del Magdalena Y Noroeste De La Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, *30*.
- Dhurandhar, A. P., Pandey, U. K., & Raminaidu, C. (2019). Petrochemistry and Sr, Nd, Pb Isotopic Characteristics of Basic Dykes of Mikir Hills, Assam. *Journal of the Geological Society of India*, *94*(6), 559–572. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1361-z>
- Diederix, Hans & Hernandez-Moreno, Catalina & Torres Jaimes, Eliana & Osorio, Jairo & Botero, P. (2009). Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la falla de bucaramanga, colombia. *Geología Colombiana*, *9*(2), 18–23.
- Diener, J. F. A., & Powell, R. (2010). Influence of ferric iron on the stability of mineral assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, *28*(6), 599–613. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00880.x>
- Dong, H., Xing, C., & Wang, C. Y. (2013). Textures and mineral compositions of the Xinjie layered intrusion, SW China: Implications for the origin of magnetite and fractionation

- process of Fe-Ti-rich basaltic magmas. *Geoscience Frontiers*, 4(5), 503–515.  
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.01.011>
- Fedotov, Z. A. (2012). Mg-(Fe + Ti)-Al petrochemical diagram for the melting of mantle pyrolite: Implications for the derivation conditions of the parental magmas of major volcanic series. *Petrology*, 20(7), 640–657. <https://doi.org/10.1134/S0869591112070028>
- Fel'dman, V. I., Sazonova, L. V., & Kozlov, E. A. (2006). Shock metamorphism of some rock-forming minerals: Experimental results and natural observations. *Petrology*, 14(6), 540–566.  
<https://doi.org/10.1134/S0869591106060038>
- Fowler, A. P. G., Scheuermann, P., Tan, C., & Seyfried, W. (2019). Titanium reactors for redox-sensitive hydrothermal experiments: An assessment of dissolved salt on H<sub>2</sub> activity-concentration relations. *Chemical Geology*, 515(April), 87–93.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.04.008>
- Franceschelli, M., Carcangiu, G., Caredda, A. M., Cruciani, G., Memmi, I., & Zucca, M. (2002). Transformation of cumulate mafic rocks to granulite and re-equilibration in amphibolite and greenschist facies in NE Sardinia, Italy. *Lithos*, 63(1–2), 1–18.  
[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00121-4](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00121-4)
- Freer, R., & Hauptman, Z. (1978). An experimental study of magnetite-titanomagnetite interdiffusion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 16(3), 223–231.  
[https://doi.org/10.1016/0031-9201\(78\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(78)90015-8)
- Frost, B. R. (2019). Stability of oxide minerals in metamorphic rocks. *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*, 2, 469–488.
- Frost, C. D., Ronald Frost, B., Lindsley, D. H., Chamberlain, K. R., Swapp, S. M., & Scoates, J. S. (2010). Geochemical and isotopic evolution of the anorthositic plutons of the Laramie anorthosite complex: Explanations for variations in silica activity and oxygen fugacity of massif anorthosites. *Canadian Mineralogist*, 48(4), 925–946.  
<https://doi.org/10.3749/canmin.48.4.925>

- Gahlan, H. A., Asimow, P. D., Azer, M. K., Ma, C., Al-Kahtany, K. M., & Hakeem, A. Y. (2021). Geochemistry and mineralogy of the Jebel Aja Igneous Intrusion and the associated exotic pegmatites, Arabian Shield, Saudi Arabia. *Lithos*, 400–401(May), 106395. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106395>
- Geológica, L., Cñ, M., Volador, E., Recuerdo, M., Victoria, L., Gloria, L., Giralda, L., Esmeralda, L., Aurora, L., Qal, L., Aurora, L., Victoria, L., & Coco, M. De. (1977). *Plancha 109 - rionegro*. 3215.
- Grant, F. S. (1985). Aeromagnetism, geology and ore environments, II. Magnetite and ore environments. *Geoexploration*, 23(3), 335–362. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(85\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0016-7142(85)90002-X)
- Grapes, R. (2010). Pyrometamorphism. In *Pyrometamorphism*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15588-8>
- Grew, E. S., Drugova, G. M., & Leskova, N. V. (1989). Högbomite from the Aldan Shield, Eastern Siberia, USSR. *Mineralogical Magazine*, 53(371), 376–379. <https://doi.org/10.1180/minmag.1989.053.371.14>
- Grigoriev, V. M. (1982). Precambrian Iron Ore Deposits of the Ussr. In *The Development Potential of Precambrian Mineral Deposits*. United Nations. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-027193-4.50011-5>
- Grobler, D. F., Brits, J. A. N., Maier, W. D., & Crossingham, A. (2019). Litho- and chemostratigraphy of the Flatreef PGE deposit, northern Bushveld Complex. *Mineralium Deposita*, 54(1), 3–28. <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0800-x>
- Grunsky, E., & Massey, N. (1995). Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. In *Computers & Geosciences* (Vol. 21, Issue 3, pp. 439–441). [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)90001-2)

- Hayes, B., Bybee, G. M., Mawela, M., Nex, P. A. M., & van Niekerk, D. (2018). Residual melt extraction and out-of-sequence differentiation in the Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Petrology*, 59(12), 2413–2434. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy101>
- He, H. L., Yu, S. Y., Song, X. Y., Du, Z. S., Dai, Z. H., Zhou, T., & Xie, W. (2016). Origin of nelsonite and Fe-Ti oxides ore of the Damiao anorthosite complex, NE China: Evidence from trace element geochemistry of apatite, plagioclase, magnetite and ilmenite. *Ore Geology Reviews*, 79, 367–381. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.028>
- Hébert, C., Cadieux, A. M., & van Breemen, O. (2005). Temporal evolution and nature of Ti-Fe-P mineralization in the anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) suites of the south-central Grenville Province, Saguenay - Lac St. Jean area, Quebec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42(10), 1865–1880. <https://doi.org/10.1139/e05-050>
- Hejny, C., Gnos, E., Grobety, B., & Armbruster, T. (2002). Crystal chemistry of the polysome ferrohobomite-2N2S, a long-known but newly defined mineral species. *European Journal of Mineralogy*, 14(5), 957–967. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2002/0014-0957>
- Ivanic, T. J., Nebel, O., Brett, J., & Murdie, R. E. (2018). The Windimurra Igneous Complex: An Archean Bushveld? *Geological Society Special Publication*, 453(1), 313–348. <https://doi.org/10.1144/SP453.1>
- Kalliokoski, J. (1965). The metamorphosed iron ore of El Pao, Venezuela. *Economic Geology*, 60(1), 100–116. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.60.1.100>
- Kaufmann, F. E. D., Vukmanovic, Z., Holness, M. B., & Hecht, L. (2018). Orthopyroxene oikocrysts in the MG1 chromitite layer of the Bushveld Complex: implications for cumulate formation and recrystallisation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(2), 0. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1441-x>
- Kitayama, Y. C., & Francis, D. (2014). Iron-rich alkaline magmatism in the Archean Wawa greenstone belts (Ontario, Canada). *Precambrian Research*, 252, 53–70. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.06.026>

- Knipping, J. L., Fiege, A., Simon, A. C., Oeser, M., Reich, M., & Bilenker, L. D. (2019). In-situ iron isotope analyses reveal igneous and magmatic-hydrothermal growth of magnetite at the Los Colorados Kiruna-type iron oxide-apatite deposit, Chile. *American Mineralogist*, *104*(4), 471–484. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6623>
- Kuepouo, G., Sato, H., Tchouankoue, J. P., & Murata, M. (2009). FeO\*-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>-Rich rocks of the tertiary bana igneous complex, West Cameroon. *Resource Geology*, *59*(1), 69–86. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00080.x>
- Lavina, B., Cesare, B., Alvarez-Valero, A. M., Uchida, H., Downs, R. T., Koneva, A., & Dera, P. (2009). Closure temperatures of intracrystalline ordering in anatectic and metamorphic hercynite, Fe<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *American Mineralogist*, *94*(5–6), 657–665. <https://doi.org/10.2138/am.2009.3031>
- Marsden, R. W. (1982). Iron-Bearing Rocks of the Precambrian and Their Mining Development. In *The Development Potential of Precambrian Mineral Deposits*. United Nations. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-027193-4.50010-3>
- Martinez, C. (2019). Cartografía Geológica a Escala 1:20000 en un Sector de la Vereda Angelinos, Zona rural al Sur de la cantera “La Cemento de la Compañía Cemex”, en el Norte de Bucaramanga (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- McDonough, W. F., & Sun, S. s. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, *120*(3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Mehdipour Ghazi, J., Harris, C., Rahgoshay, M., & Moazzen, M. (2019). Combined igneous and hydrothermal source for the Kiruna-type Bafq magnetite-apatite deposit in Central Iran; trace element and oxygen isotope studies of magnetite. *Ore Geology Reviews*, *105*(May 2018), 590–604. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.006>

- Mielke, H., & Schreyer, W. (1972). Magnetite-rutile-assemblages in metapelites of the Fichtelgebirge, Germany. *Earth and Planetary Science Letters*, 16(3), 423–428. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(72\)90162-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(72)90162-8)
- Mikhailova, Y. A., Konopleva, N. G., Yakovenchuk, V. N., Ivanyuk, G. Y., Men'shikov, Y. P., & Pakhomovsky, Y. A. (2007). Corundum-group minerals in rocks of the Khibiny alkaline pluton, Kola Peninsula. *Geology of Ore Deposits*, 49(7), 590–598. <https://doi.org/10.1134/S107570150707015X>
- Morisset, C. E., Scoates, J. S., Weis, D., Sauv e, M., & Stanaway, K. J. (2010). Rutile-bearing ilmenite deposits associated with the proterozoic saint-urbain and lac allard anorthosite massifs, grenville province, Quebec. *Canadian Mineralogist*, 48(4), 821–849. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.4.821>
- Naldrett, A. J., Cameron, G., Von Gruenewaldt, G., & Sharpe, M. R. (1986). The formation of stratiform PGE deposits in layered intrusions. *Origins of Igneous Layering*, 313–397. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2509-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2509-5_10)
- Oberth ur, T., Junge, M., Rudashevsky, N., de Meyer, E., & Gutter, P. (2016). Platinum-group minerals in the LG and MG chromitites of the eastern Bushveld Complex, South Africa. *Mineralium Deposita*, 51(1), 71–87. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0593-0>
- Ortega-Guti rrez, F., Martiny, B. M., Mor an-Zenteno, D. J., Reyes-Salas, A. M., & Sol e-Vi nas, J. (2011). Petrology of very high temperature crustal xenoliths in the Puente Negro intrusion: A sapphire-spinel-bearing Oligocene andesite, Mixteco terrane, southern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 28(3), 593–629.
- Oyarz un, J., Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Maturana, H., & Oyarz un, R. (2016). Distribution of chemical elements in calc-alkaline igneous rocks, soils, sediments and tailings deposits in northern central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 69, 25–42. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.03.004>

- Petersen, E. U., Essene, E. J., Peacor, D. R., & Marcotty, L. A. (1989). The occurrence of h gbomite in high-grade metamorphic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 101(3), 350–360. <https://doi.org/10.1007/BF00375319>
- Pownceby, M. I., & Fisher-White, M. J. (2006). Chemical variability in chrome spinel grains from magnetically fractionated ilmenite concentrates: Implications for processing. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 115(4), 213–223. <https://doi.org/10.1179/174328506X128841>
- Raith, M. M., Dobmeier, C., & Mouri, H. (2007). Origin and evolution of FeAl-granulite in the thermal aureole of the Chilka Lake anorthosite, Eastern Ghats Province, India. *Proceedings of the Geologists' Association*, 118(1), 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(07\)80050-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(07)80050-2)
- Razakamanana, T., Ackermann, D., & Windley, B. F. (2000). H gbomite in migmatitic paragneiss in the Betroka shear belt, Vohidava area, Precambrian of southern Madagascar. *Mineralogy and Petrology*, 68(4), 257–269. <https://doi.org/10.1007/s007100050012>
- Reynolds, I. M. (1985). The nature and origin of titaniferous magnetite-rich layers in the upper zone of the Bushveld complex: a review and synthesis. *Economic Geology*, 80(4), 1089–1108. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.4.1089>
- Rittmann, A. (1973). Igneous Rock Forming Minerals. *Stable Mineral Assemblages of Igneous Rocks*, 35–59. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-65482-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-65482-4_4)
- Robinson, P., Panish, P. T., & McEnroe, S. A. (2001). Minor element chemistry of hemo-ilmenite and magnetite in cumulate rocks from the Sokndal Region, South Rogaland, Norway. *American Mineralogist*, 86(11–12), 1469–1476. <https://doi.org/10.2138/am-2001-11-1214>
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). Memoria explicativa del mapa geol gico generalizado del departamento de Santander, escala 1:400.000. *Ingeominas*, 256.

- Sack, R. O., & Ghiorso, M. S. (1991). An internally consistent model for the thermodynamic properties of Fe-Mg-titanomagnetite-aluminate spinels. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(3), 415. <https://doi.org/10.1007/BF00325108>
- Scoon, R. N., & Eales, H. V. (2002). Unusual Fe-Ti-Cr spinels from discordant bodies of iron-rich ultramafic pegmatite at the Amandelbult Platinum mine, northwestern Bushveld Complex. *Mineralogical Magazine*, 66(6), 857–879. <https://doi.org/10.1180/0026461026660064>
- Silva, Z. C. G. (1990). Geochemistry of the Gabbro-Anorthosite complex of Southwest Angola. *Journal of African Earth Sciences*, 10(4), 683–692. [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(90\)90034-C](https://doi.org/10.1016/0899-5362(90)90034-C)
- Sluzhenikin, S. F., Yudovskaya, M. A., Barnes, S. J., Abramova, V. D., Le Vaillant, M., Petrenko, D. B., Grigor'eva, A. V., & Brovchenko, V. D. (2020). Low-Sulfide Platinum Group Element Ores of the Norilsk-Talnakh Camp. *Economic Geology*, 115(6), 1267–1303. <https://doi.org/10.5382/ECONGEO.4749>
- Smirnova, N. L. (2003). Cationic motifs in corundum, spinel, and amesite homologous structural classes. *Crystallography Reports*, 48(2), 171–179. <https://doi.org/10.1134/1.1564190>
- Smith, J. V. (2018). Rock structure characterization of a magnetite gneiss with foliation-parallel discontinuities for footwall slope design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 108(January), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.06.005>
- Speczik, S., Wiszniewska, J., & Diedel, R. (1988). Minerals, exsolution features and geochemistry of Fe-Ti ores of the Suwałki district (North-East Poland). *Mineralium Deposita*, 23(3), 200–210. <https://doi.org/10.1007/BF00204302>
- Taner, M. F., & Chemam, M. (2015). Algoma-type banded iron formation (BIF), Abitibi Greenstone belt, Quebec, Canada. *Ore Geology Reviews*, 70, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.016>

- Taylor, K. G., & Konhauser, K. O. (2011). Iron in Earth Surface Systems. In *Elements* (Vol. 7, Issue 2).
- Teixeira, A. S., Ferreira Filho, C. F., Giustina, M. E. S. Della, Araújo, S. M., & da Silva, H. H. A. B. (2015). Geology, petrology and geochronology of the Lago Grande layered complex: Evidence for a PGE-mineralized magmatic suite in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, *64*, 116–138. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.09.006>
- van Lamoen, H. (2017). Microtextures and microintergrowths of iron-titanium-aluminium oxide minerals in a magmatic titaniferous iron ore from Attu island, southwestern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, *49*(2), 89–104. <https://doi.org/10.17741/bgsf/49.2.004>
- Von Gruenewaldt, G., Klemm, D. D., Henckel, J., & Dehm, R. M. (1985). Exsolution features in titanomagnetites from massive magnetite layers and their host rocks of the upper zone, eastern Bushveld complex. *Economic Geology*, *80*(4), 1049–1061. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.4.1049>
- Wall, C. J., Scoates, J. S., Weis, D., Friedman, R. M., Amini, M., & Meurer, W. P. (2018). The stillwater complex: Integrating zircon geochronological and geochemical constraints on the age, emplacement history and crystallization of a large, open-system layered intrusion. *Journal of Petrology*, *59*(1), 153–190. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy024>
- Wasilewski, P., & Warner, R. D. (1988). Magnetic petrology of deep crustal rocks-Ivrea Zone, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, *87*(3), 347–361. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90022-2)
- Webb, A. D., Dickens, G. R., & Oliver, N. H. S. (2003). From banded iron-formation to iron ore: Geochemical and mineralogical constraints from across the Hamersley Province, Western Australia. *Chemical Geology*, *197*(1–4), 215–251. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00352-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00352-2)
- Welch, B. K. (1958). *The Occurrence and Paragenesis of the Ores of Titanium*. 297.

- Westhues, A., Hanchar, J. M., LeMessurier, M. J., & Whitehouse, M. J. (2017). Evidence for hydrothermal alteration and source regions for the Kiruna iron oxide-apatite ore (northern Sweden) from zircon Hf and O isotopes. *Geology*, 45(6), 571–574. <https://doi.org/10.1130/G38894.1>
- Xu, W., Liu, F., Santosh, M., Liu, P., Tian, Z., & Dong, Y. (2018). Constraints of mafic rocks on a Paleoproterozoic back-arc in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.016>
- Yuan, Q., Namur, O., Fischer, L. A., Roberts, R. J., Lü, X., & Charlier, B. (2017). Pulses of plagioclase-laden magmas and stratigraphic evolution in the Upper Zone of the Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Petrology*, 58(8), 1619–1644. <https://doi.org/10.1093/petrology/egx067>
- Yudovskaya, M., Kinnaird, J., Naldrett, A. J., Rodionov, N., Antonov, A., Simakin, S., & Kuzmin, D. (2013). Trace-element study and age dating of zircon from chromitites of the Bushveld Complex (South Africa). *Mineralogy and Petrology*, 107(6), 915–942. <https://doi.org/10.1007/s00710-013-0269-3>