

# Evidencias mineralógicas y geoquímicas de las manifestaciones de hierro hospedadas en La Unidad Riodacita de los Tábanos sector de Corral de Piedras, San Juan del Cesar, La Guajira

## Mineralogical and geochemical evidence of the iron manifestations hosted in The Rhyodacite of Tabanos Unit, sector of Corral de Piedras, San Juan del Cesar, La Guajira

Yesica Paola Moscote Daza<sup>1</sup>, Jaime Alejandro Morón Robles<sup>2</sup>, Gian Carlo Madiedo Márquez<sup>3</sup>, Elías Ernesto Rojas Martínez<sup>4</sup>, Andrés José Córdoba Corzo<sup>5</sup>, Dino Carmelo Manco Jaraba<sup>6</sup>

<sup>1,2,3</sup> Estudiante Ingeniería Geológica, Fundación Universitaria del Área Andina, Semillero de Investigación Sigem. Valledupar, Colombia

<sup>4</sup> Geólogo, Esp. Minería a Cielo Abierto, Fundación Universitaria del Área Andina, Grupo de Investigación Gima. Valledupar, Colombia

<sup>5</sup> Ingeniero Geólogo, Fundación Universitaria del Área Andina, Semillero de Investigación Sigem. Valledupar, Colombia

<sup>6</sup> M.Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Fundación Universitaria del Área Andina, Sociedad Colombiana de Geología Bogotá, Colombia

E-mail: yemoscote@estudiantes.areandina.edu.co

Recibido: 2/04/17

Aceptado: 12/12/17

**Cite this article as:** Y. Moscote, J.A. Morón, G.C. Madiedo, E.E. Rojas, A.J. Córdoba, D.C. Manco, "Mineralogical and geochemical evidence of the iron manifestations hosted in The Rhyodacite of Tabanos Unit, sector of Corral de Piedras, San Juan del Cesar, La Guajira", *Prospectiva*, Vol 16, N° 1, 67-75, 2018.

### RESUMEN

En el corregimiento Corral de Piedras (San Juan de Cesar, La Guajira), existen importantes manifestaciones de hierro dentro de la Unidad Riodacita de los Tábanos sin referencias y clasificación geoquímica. Cuatro muestras fueron tomadas aleatoriamente en la mineralización con el propósito de identificar los minerales presentes, morfologías, microtexturas, concentración porcentual de los óxidos de hierro y determinar su posible origen. Las muestras se caracterizaron mediante tres ensayos de laboratorio, (1) el análisis de difracción de rayos X (DRX) corroboró la presencia de hematita, magnetita, cuarzo y actinolita calentada como cristales principales, los óxidos de hierro tienen una concentración en las rocas entre 72,7 y 58,1%, (2) las muestras fueron descritas microtextural y morfológicamente con la implementación del microscopio electrónico de barrido y espectroscopia por dispersión de energía (SEM/EDS), presentando una gran variedad de características microestructurales, morfológicas y texturales, la hematita se caracterizó por formas poliédricas de bordes bien definidos y textura ligeramente rugosa, la magnetita fue observada con una textura desquebrajada, rugosa y bordes sinuosos, el cuarzo y la actinolita presentaron una textura lisa, superficie compacta y densa, (3) la fluorescencia de rayos X (FRX) mostró concentraciones de  $Fe_2O_3$  entre 64,21 y 78,35%. Las manifestaciones de hierro están asociadas a la actividad volcánica que entre el Triásico y comienzos de Cretácico afectó la zona, fueron originadas como producto de la actividad hidrotermal y sustitución metasomática de los flujos de lava riodacíticas por disolución y precipitación de magnetita y fluidos a altas temperaturas.

**Palabra claves:** Óxidos de hierro; SEM/EDS; Fluorescencia de rayos X; Magnetita.

### ABSTRACT

In Corral de Piedras town, (San Juan de Cesar, La Guajira), there are important iron manifestations inside The Rhyodacite of Tabanos Unit, without references and geochemical classification. Four samples were randomly taken along the mineralization with the purpose of identifying the present minerals, morphologies, microtextures, percentage concentration of the iron oxides and to determine their possible origin. Samples were characterized by three laboratory tests, (1) X-ray diffraction (XRD) analysis corroborated the presence of hematite, magnetite, quartz and heated actinolite as major crystals; The iron oxides have a concentration in the rocks between 72,7 and 58,1%, (2) the samples were described microtextural and morphologically with the application of the scanning electron microscope and energy dispersion spectroscopy (SEM/EDS), presents a great variety of microstructural, morphological and textural characteristics, the hematite was characterized by well-defined polyhedral shapes with a slightly rough texture, the magnetite was observed with a rough texture and sinuous edges, the quartz and the actinolite presented a smooth texture, compact and dense surface, (3) X-ray fluorescence (XRF) for the chemical characterization of the minerals, the XRF showed concentrations of  $Fe_2O_3$  between 64,21 and 78,35%. The iron manifestations are associated to the volcanic activity that between the Triassic and early Cretaceous affected the zone, were originated as a product of the hydrothermal activity and metasomatic substitution of the flows of lava riodacíticas by dissolution and precipitation of fluid magnetite at high temperatures.

**Key words:** Iron oxides; SEM/EDS; X-ray fluorescence; Magnetite.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la tierra existe una infinita variedad de minerales y rocas que están formados por 118 elementos básicos, algunos minerales están compuestos por elementos puros y arreglos geoquímicos sencillos, mientras otros minerales son sumamente complejos ya que pueden agrupar muchísimos elementos, complicando su interpretación y descripción geoquímica [1].

Goldschmidt estudió la distribución geoquímica de los minerales en la tierra, planteando hipótesis que pudieran explicar dicha distribución, partió de la idea de que la distribución inicial de los elementos en el planeta, probablemente tuvo lugar durante el Eón Hádico (4.600 ma) con la formación de la tierra primitiva, en este tiempo geológico la tierra estaba totalmente fundida, Goldschmidt comparó este estado inicial de la tierra con la composición de los meteoritos, postulando un grupo con tres elementos mayores tales como el hierro, níquel y silicatos; así Goldschmidt dedujo que el enfriamiento paulatino de la tierra ocurrió en fases separadas, a las que llamó fase de metales, fases de sulfuros y fases de silicatos [2]. Clasificando los elementos en función de su afinidad geoquímica en Siderófilos, Calcófilos, Litófilos y Atmófilo particularmente los Siderófilos presentan una afinidad por el hierro en esta clasificación se incluye el Au, Co, Fe, Ir, Mn, Mo, Ni, Os, Pd, Pt, Re, Rh y Ru [3].

Los silicatos, óxidos, sulfuros, carbonatos y sulfatos son los minerales más abundantes en la litosfera, estos minerales sufren procesos y condiciones complejas formando rocas con composiciones y características variables [4], a partir de los procesos y las condiciones geológicas que ambientan la formación de las rocas, clasificándolas en tres importantes grupos (Ígneas, Sedimentarias y Metamórficas) cada grupo cuenta con características similares en cuanto a su génesis, texturas, composición, etc.

El hierro está presente en casi todas las rocas sedimentarias en bajas concentraciones, su origen generalmente está asociado a meteorización y actividad volcánica [5].

Los óxidos de hierro específicamente en las rocas ígneas volcánicas félsicas tiene una concentración de 2,9 y 4,4% y en las rocas volcánicas de composición intermedias la concentración aumenta un poco de 6,3 a 6,9% [4]. Sin embargo, cuando la concentración de hierro es mayor o igual al 30% representan un interés industrial [6]. Debido a las raras concentraciones de los yacimientos de hierro no existe una única clasificación para estas anomalías geoquímicas, una forma para agrupar los yacimientos metálicos según el ambiente geológico de formación, edad, morfología, mineralogía, etc, es: Iron Formations, Ironstones y Bog Formations [6].

Existen evidencias de vulcanismo hacia el sur del departamento de La Guajira, este evento se desarrolló

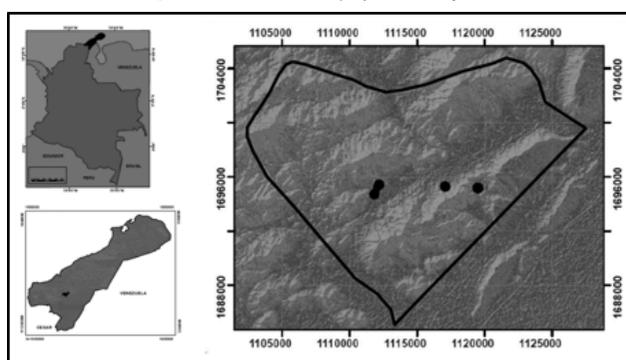
desde el triásico y finalizó a comienzos del cretácico, representado por La Unidad Riodacita de los Tábanos (Jt) [7] una secuencia félsica e intermedia de edad Jurásico superior [8] cuya composición varía desde algunas andesitas, dacitas, traquitas y riolitas [9].

En este artículo se realizó una caracterización de las manifestaciones de hierro aflorantes en el corregimiento de Corral de Piedras, municipio San Juan del Cesar (La Guajira), por medio de la implementación del microscopio electrónico de barrido con el microanálisis de espectroscopía por dispersión de energía (SEM/EDS), difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX). Existe información como tal de la descripción general de la Unidad Riodacita de los Tábanos, sin embargo, las manifestaciones de hierro que se hospedan en esta Unidad no presentan clasificación o referencia alguna; por lo tanto, este artículo está orientado a ser el cimiento en cuanto a la caracterización, descripción y concentración porcentual de los minerales presentes en las rocas, sirviendo como base de investigaciones que conlleven a mayores indagaciones, exploraciones y dado el caso la explotación del mineral.

### 1.1 Delimitación del área de estudio

Las manifestaciones de hierro tomadas para el desarrollo de este artículo están localizadas en las estribaciones del Complejo Montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) en el sector suroccidental del departamento de La Guajira, hacia el norte del municipio de San Juan del Cesar puntualmente en el corregimiento Corral de Piedras, sector conocido como finca El Consuelo (figura 1).

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.  
Figure 1. Location map of the study area.



Fuente: autores.

### 1.2 Marco geológico regional y local

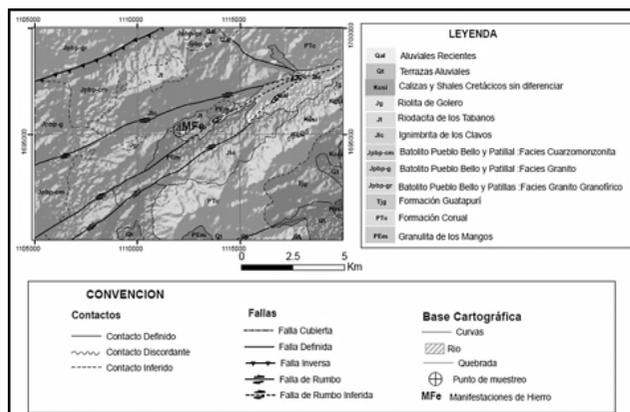
La SNSM se considera un sistema triangular aislado, por no presentar relación o una conexión geológica con respecto a la formación de la cordillera de los Andes [10]. Este macizo está localizado al NE de las llanuras costeras del Caribe, así mismo en el NE de la SNSM, la península de La Guajira está formada por dos regio-

nes una llanura plana y desérticas representada por la cuenca de Ranchería ubicada al pie de la SNSM área suroccidental del departamento y otra región con un relieve conformado por pequeñas elevaciones hacia el centro y norte [11].

La SNSM se subdivide en tres terrenos o provincias geotectónicas conocidas como Sierra Nevada, Sevilla y Santa Marta [8] compuestas principalmente por rocas cristalinas [10], particularmente el terreno de la Sierra Nevada cuenta con una amplia composición litológica desde rocas metamórficas, magmáticas, vulcanitas y sedimentarias con edades desde Precámbrico hasta el Carbonífero [12].

El área de estudio cuenta con una amplia variedad litológica, figura 2, las unidades geológicas presentes en la zona son rocas ígneas volcánicas representada por las Riolitas de Golero (Jg), rocas ígneas plutónicas como el Batolito de Pueblo Bello y Patillal en sus tres fases, dos fases graníticas y una fase cuarzomonzonítica (Jpbb), rocas sedimentarias están representadas por calizas y shales del Cretácico, La Formación Guatapurí y La Formación Corual (Kcsi, Tjg, Pfc), las rocas vulcano – sedimentarias son representadas por La Riodacita de los Tábanos y La Ignimbrita de los Clavos (Jt y Jlc), y se cuenta con una sola unidad de rocas metamórficas como la Granulita de los Mangos (PEm). Las rocas vulcano-sedimentarias en la Unidad Riodacita de los Tábanos comprenden riolitas de afinidad alcalina y calcoalcalina con alto potasio, así como traquitas alcalinas y algunas dacitas.

Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio.  
Figure 2. Geological map of the study area.



Fuente: Ingeominas 2007.

### 1.3 Manifestaciones de hierro

Las manifestaciones de hierro se encuentran dentro de la Unidad Riodacita de los Tábanos, corresponde a cuerpos vulcano-sedimentarios extrusivos con textura porfirítica y composición ácida a intermedia, desde tobas andesíticas, dacíticas hasta tobas traquíticas y líticas con fragmentos vulcano-sedimentarios tamaño bloques. Las rocas lávicas asociadas a la Unidad Riodacita

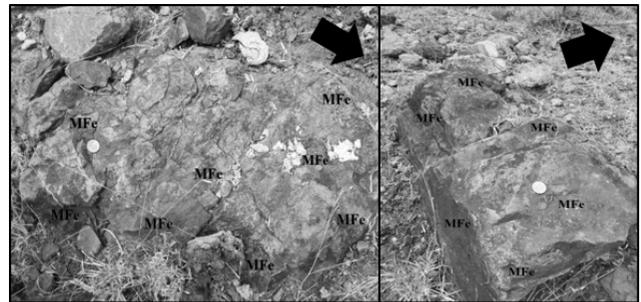
de Los Tábanos se clasifican como riolitas y traquitas altamente fracturadas, con tonalidades de colores que varían de rosado y amarillo a negro verdoso [3], se le asignan una edad de Jurásico superior  $142 \pm 6$  a la Riodacita de los Tábanos. Con base en dataciones de K-Ar en cristales de sanidina y obsidiana.

La roca huésped de las mineralizaciones (riodacita) es holocristalina con cristales inequigranular, índice de color de 35%, cuarzo 25%, plagioclasas 50% y feldespato 25%, como minerales secundarios en la roca se tiene hematita y magnetita.

No se evidenció una clara continuidad de la mineralización, afloran en sectores alternada en su mayoría por riolitas de alto contenido potásico. La mineralización se observa diseminada en la roca, con una visible diferenciación de los minerales ferrosos, sin embargo, la corrosión y la oxidación de los minerales constituyente ante la exposición de los agentes atmosféricos, le ha dado a la roca colores, rojizos, negro y verdosos (figura 3).

Figura 3. Manifestaciones de hierro (MFe) en la Unidad Riodacita de Los Tábanos, Corral de Piedras (San Juan del Cesar), La Guajira.

Figure 3. Manifestations of iron (MFe) in the Riodacite de Los Tabano Unit, Corral de Piedras (San Juan del Cesar), La Guajira.



Fuente: autores.

## 2. METODOLOGÍA

Las muestras fueron sometidas a varios ensayos de laboratorio, con la implementación del microscopio electrónico de barrido y espectroscopía por dispersión de energía (SEM/EDS) detallando las características mineralógicas y aspectos microestructurales; mediante el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) se realizó la caracterización química de los minerales y la difracción de rayos X (DRX) proporcionó información cualitativa sobre la composición elemental, mediante la comparación de los perfiles de difracción y cuantitativa, mediante el cálculo de la concentración porcentual de las fases cristalinas presentes.

### Fase de campo

Se realizó un reconocimiento general en campo de las unidades aflorantes, localizando puntualmente las manifestaciones de hierro, en la Unidad de Riodacita de los Tábanos, efectuándose el respectivo muestreo en los sectores de la finca El Consuelo (San Juan del Cesar, La Guajira).

### Fase de muestreo

El método para la recolección de las muestras fue aleatorio, se rotularon y geo referenciaron como: YJ-01 en las coordenadas E: 1112033 N: 1695216, YJ-02 (E: 1119512 y N: 1695190), YJ-03 (E: 1112005 y N: 1695080) y YJ-05 (E: 1112065 y N: 1695205).

### Fase de análisis químico

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de rayos X de la Universidad Industrial de Santander – Parque tecnológico de Guatiguará, inicialmente para el estudio morfológico y estructural de las muestras mineralógicas, se empleó el microscopio electrónico de barrido (SEM) con el microanálisis de rayos X de espectroscopia de energía dispersiva (EDS), cuyo funcionamiento se basa en barrer un haz de electrones sobre la muestra mientras en una pantalla visualiza la información, con el objetivo de observar una imagen mucho más ampliada de la superficie de la muestra.

En el microscopio electrónico de barrido se produce un campo magnético permitiendo enfocar los rayos de electrones lo que proporciona una imagen tridimensional, el haz de electrones es generado a partir de un cañón electrónico y es enfocado a través de las lentes condensadoras disminuyendo el diámetro del haz, donde posteriormente una bobina deflectora barre el haz de electrones sobre cada punto de la muestra. Las imágenes pueden ser obtenidas con electrones secundarios los cuales proporcionan la textura y morfología de la superficie de las muestras, o por los electrones retrodispersados los cuales suministran información de las variaciones en la composición de la muestra [13].

La fluorescencia de rayos X (FRX) identifica las longitudes de ondas, proporcionado información cualitativa sobre la composición química de los elementos de la muestra y midiendo las intensidades de las radiaciones se obtiene la información cuantitativa, con el cálculo porcentual de los elementos.

El análisis de fluorescencia de rayos X, se realizó mediante el método QUANT – EXPRESS en el rango de sodio (Na) a uranio (U), con un espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos X de longitud de onda dispersiva de 4kW marca Bruker modelo S8 Tiger, el equipo emplea dos detectores uno de elementos pesados (centello) y otro de elementos livianos (flujo), La fuente de emisión de los rayos X fue a partir de un tubo de rodio (Rh). Para el tratamiento de las muestras se empleó el método de tamizado, los análisis de los especímenes seleccionados de las muestras fueron realizados bajo una matriz totalmente oxidada debido a la ganancia de oxígeno (generada por el alto contenido de óxidos de hierro observados por dirección de rayos X) y a la pérdida de elementos livianos no controlado durante el proceso de calcinación.

La preparación de las muestras para la difracción de rayos X, consistió en homogenizar la muestra en un mortero de ágata dejándola en un tamaño menos a 38  $\mu\text{m}$  (400 mesh), luego los especímenes seleccionados fueron montados en un portamuestra de polimetilmetacrilato mediante la técnica de llenado frontal. La medición se realizó en un difractómetro de polvo marca Bruker modelo D8 Advance con geometría DaVinci. Se describieron cada una de las fases cristalinas presentes en los especímenes seleccionados de las muestras con códigos E1ZZ (YJ – 01), E2AA (YJ – 02), E2AB (YJ – 03) y E2AC (YJ – 05). Estas fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Los perfiles de difracción obtenidos con los análisis comparativos de las fases encontradas se realizaron mediante el refinamiento por el Método de Rietveld de los perfiles observados habiéndole agregado a los especímenes seleccionados de las muestras una cantidad conocida de un estándar interno (*Aluminum oxide, Corundum,  $\alpha$ -phase*) correspondiente al 20,16 (YJ – 01); 20,01 (YJ – 02), 20,25 (YJ – 03) y 19,94% (YJ – 05).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuatro muestras fueron utilizadas para este estudio, tomadas de varios afloramientos y preparadas para los análisis de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido y espectroscopía por dispersión de energía (SEM/EDS), y fluorescencia de rayos X (FRX).

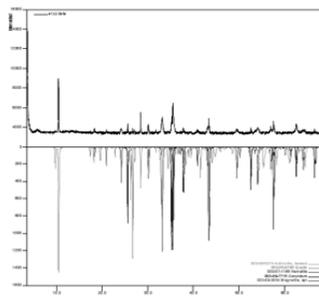
### 3.1 Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX), fue empleada para la determinación de los cristales principales y constituyentes en las muestras, así como la concentración porcentual de estas mismas, confirmando la presencia de hematita, magnetita, cuarzo y actinolita calentada como cristalinicos principales.

El análisis cuantitativo para la muestra YJ-01 presentó la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en un 24,8%, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) con 20,8%, el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) en 1,6% y actinolita calentada [ $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ] en un 13,1% (figura 4).

Figura 4. Difractograma de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra YJ-01.

Figure 4. Difractogram of the phases identified in the selected specimen of sample YJ-01.

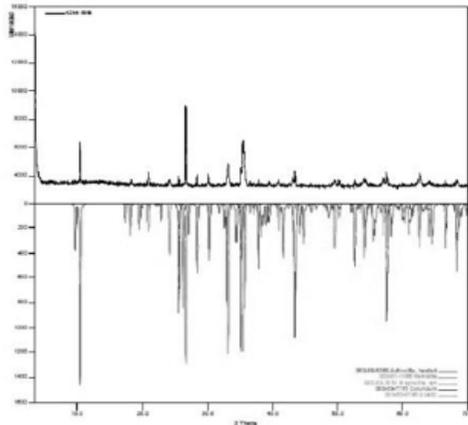


Fuente: autores.

La muestra YJ-02 reflejó en el análisis cuantitativo de la fase cristalina una concentración de hematita y magnetita similar a la muestra YJ-01, ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en un 24,2%, magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) con 21,2%, en cuanto el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) 18,7% y actinolita [ $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ] en 8,6%, aumentaron notablemente (figura 5).

Figura 5. Difractograma de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra YJ-02.

Figure 5. Difractogram of the phases identified in the selected specimen of sample YJ-02.

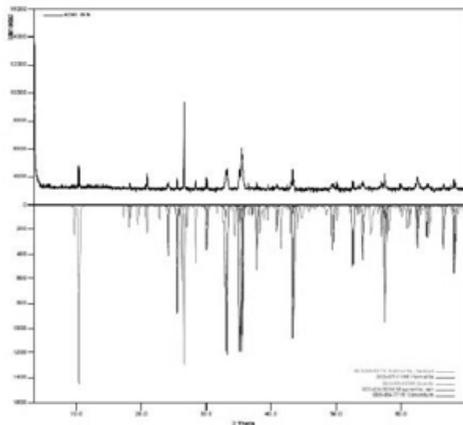


Fuente: autores.

Las fases cristalinas para la muestra YJ-03 disminuyeron, la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) presentó una concentración de 21,7%, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) de 18,9%, cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) 18,4% y actinolita calentada [ $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ] en 6,4% (figura 6).

Figura 6. Difractograma de las fases identificadas en el espécimen seleccionado de la muestra YJ-03.

Figure 6. Difractogram of the phases identified in the selected specimen of sample YJ-03.



Fuente: autores.

La muestra YJ-05 alcanzó fases cristalinas similares a la anterior, la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en un 21.6%, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) con 19.7%, cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) 9.4% y actinolita calentada [ $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ] en 7.4%.

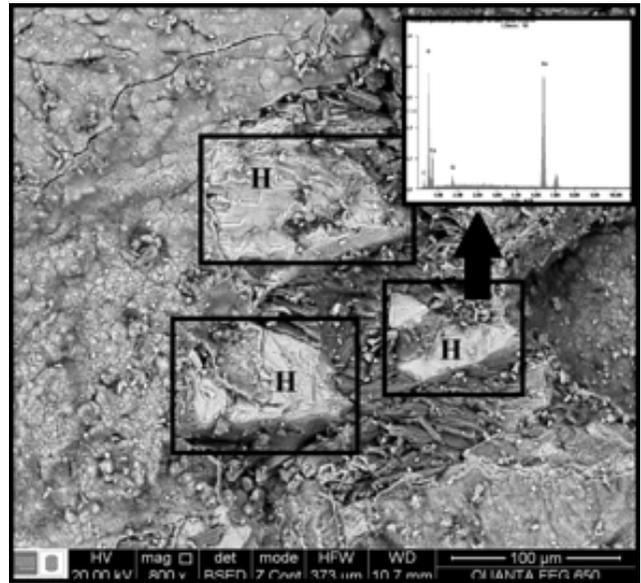
Los análisis de DRX permitieron la corroboración de la presencia de minerales de óxidos de hierro, los espectros DRX mostraron presencias de altas concentraciones de Fe (64,35-70,80 wt%) y O (21,84-29,19 wt %). Los picos de carbono se atribuyen a el recubrimiento de carbono empleado en la prueba, lo picos de Si, Mg, Al, Ca y Mn con contribución del cuarzo y la actinolita presente en la composición de la roca huésped (riodacita).

### 3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS)

Las características mineralógicas y aspectos morfológicos de la superficie de las muestras fueron detalladas con el microscopio electrónico de barrido y espectroscopia por dispersión de energía (SEM/EDS), donde se obtuvo imágenes a gran detalle de los minerales cristalinos, por su parte la hematita (figura 7) se observó en la muestra YJ-01 cómo cristales poliédricos de caras definidas y morfología piramidal u octaédrica, estas caras triangulares están superpuestas una con respecto a la otra, dando una apariencia de terrazas, así mismo, se observó con una textura semirugosa [14].

Figura 7. SEM/EDS, de la muestra YJ-01, el espectrograma muestra la fuerte incidencia del Fe y O, en los recuadros es apreciada la hematita (H).

Figure 7. SEM / EDS, from the sample YJ-01, the spectrogram shows the strong incidence of Fe and O, in the boxes is hematite (H).

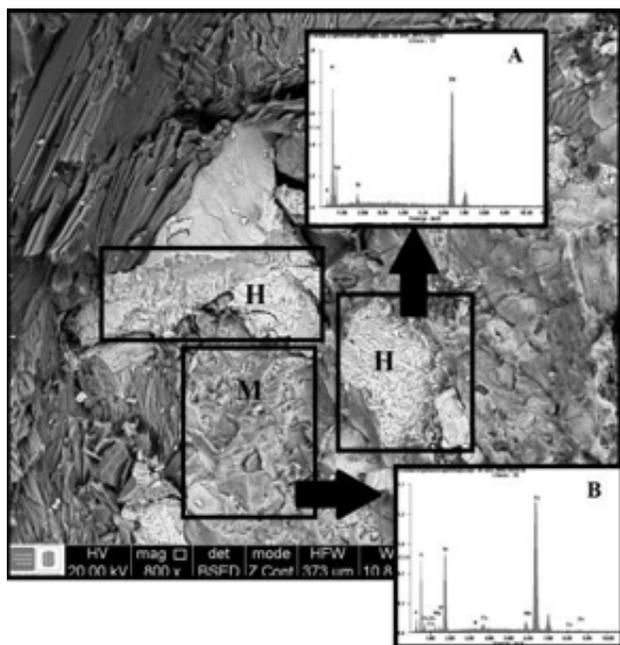


Fuente: autores.

La hematita no siempre presentó la misma morfología, sin embargo, en la figura 8 (A-B) se puede observar con bordes definidos y una superficie de textura rugosa [14]. La magnetita (M) (figura 8 A), presenta una superficie con textura compacta, los bordes son más sinuosos mientras que la hematita (H) los presenta definidos y muy marcados.

**Figura 8 (A).** SEM/EDS de la muestra YJ-05 donde se señaló la hematita (H) y magnetita (M).

**Figure 8 (A).** SEM / EDS of sample YJ-05 where hematite (H) and magnetite (M) were noted.

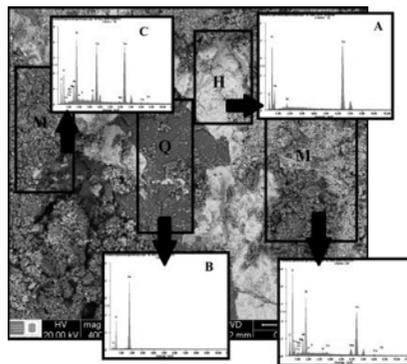


Fuente: autores.

En el SEM/EDS de la muestra YJ-03 se pudo observar nuevamente la hematita (H) figura 9 A-B de color gris claro y aristas definidas, la superficie muestra una textura relativamente rugosa, el cuarzo (Q) figura 9 A-B se observó de color gris oscuro y textura ligeramente lisa. La magnetita (M) figura 9 A-B mostró una superficie rugosa, con una apariencia espumosa, la textura de la superficie se muestra desquebrajada de color gris más oscuro que la hematita. La microestructura que se le observa a la magnetita tiene la apariencia de una gran cantidad de partículas aglomeradas [15], con formas irregulares y de variados tamaños, estas partículas fueron observadas en esta muestra poco compacta y sin bordes definidos [16].

**Figura 9 (A-B).** SEM/EDS de la muestra YJ-03, señalando la hematita (H), magnetita (M) y cuarzo (Q) con sus respectivos espectrogramas.

**Figure 9 (A-B).** SEM / EDS of sample YJ-03, indicating hematite (H), magnetite (M) and quartz (Q) with their respective spectrograms.

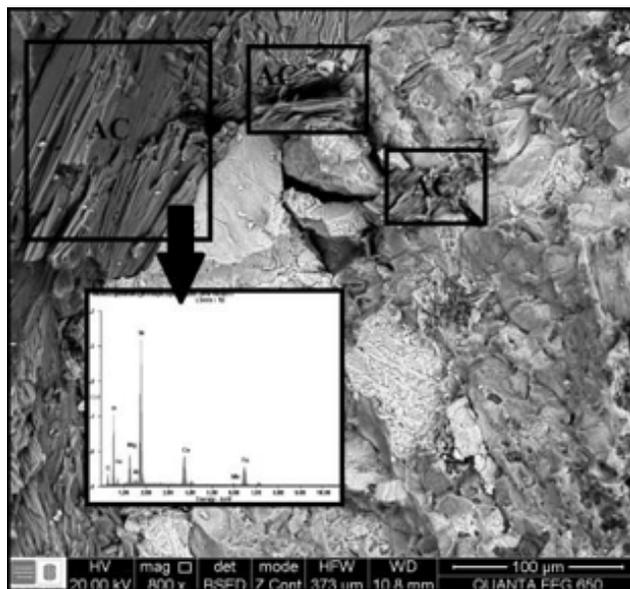


Fuente: autores.

Se observó en la muestra YJ-05 (figura 10) la actinolita con una estructura muy compacta y densa, de color gris oscuro, con bordes muy agudos, definidos y rectilíneos de apariencia laminar [17].

**Figura 10.** SEM/EDS de la muestra YJ-05, donde se señaló la actinolita calentada (AC) y su respectivo espectrograma.

**Figure 10.** SEM/EDS of sample YJ-05, where heated actinolite (AC) and its respective spectrogram were reported.



Fuente: autores.

La magnetita es un indicador petrogenético muy reconocido, las condiciones de su formación se reflejan en la composición de la respectiva magnetita, la temperatura, composición del fluido, cantidad de oxígeno y azufre, silicatos. Procesos de reequilibrio y controles cristalográficos intrínsecos [18]. La variada morfología de la magnetita sugiere el desarrollo de varias etapas, de la primera etapa (1) no se tiene rastro claro, pero la superficie semirugosa y aspecto poroso, y aglomeración de partículas irregulares observadas en la muestra YJ-03 proponen una segunda y tercera etapa producto de alteración hidrotermal y procesos metasomáticos a temperatura relativamente constante [19].

Las sustituciones pseudomorfas de magnetita por hematita debido a la oxidación se conocen como martitización. La reacción de oxidación sigue los planos de la magnetita primaria y la disposición resultante de la hematita recién formada es conocida como hematita de textura martita. La martitización incompleta de la magnetita conduce a la misma textura, pero la hematita recién formada contiene reliquias de magnetita. La martitización también se desarrolló a lo largo de los límites de los granos o, como en el interior, de la magnetita. La textura antes mencionada es a menudo obliterada, particularmente en formaciones de hierro, debido al metamorfismo posterior que provoca la recristalización de hematita martita, en hematita de

grano grueso o cristales de hematita alargados. Como una indicación de que se originaron de la magnetita temprana, la hematita de grano grueso y la especularita pueden contener reliquias de hematita de textura martita [20]. Los cristales subhedrales poliédricos de morfología piramidal u octaédrica observadas en los SEM/EDS en la muestra YJ-01 proponen una cuarta y última etapa donde la hematita fue formada por reequilibrio y procesos hidrotermales de temperatura más baja.

Las formas poliédricas de la hematita implican que los sistemas de reacción transformaron rápidamente el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  o  $\text{FeOOH}$  a  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  como placas hexagonales en las condiciones hidrotermales, luego la  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  de placas hexagonales se disolvieron gradualmente, posteriormente el proceso de reducción hizo la transición de valencia de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  dejando como producto el  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , formando partículas que comenzaron a crecer en partículas poliédricas [21].

Adicionalmente la magnetita magmática también podría separarse de la magnetita hidrotermal basada en evidencia textural, la magnetita proveniente de fuentes magmáticas normalmente desarrolla la oxidación-exsolución de la ilmenita y las laminillas de espinela las microtexturas van desde granos homogéneos a gránulos de enrejado de ilmenita. Las diferentes texturas dependen del grado variable de oxidación y difusión que tiene lugar en el mineral [22], estas microtexturas no son observadas en los SEM/EDS corroborando así que las manifestaciones de hierro en la localidad de corral de piedras provienen de orígenes hidrotermales.

### 3.3 Fluorescencia de rayos X (FRX)

Los resultados de los análisis de fluorescencia de rayos X de los minerales de óxidos se presentan en la tabla 1, cuyas concentraciones de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oscilan entre 64,21 y 78,35% en las muestras YJ-1 y YJ-3 siendo la concentración más alta (78,35%) y la más baja (64,21%) de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lo que se atribuye a la diseminación de los minerales de hierro en la roca, las concentraciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  es muy baja oscila entre (0,56-0,72%). El porcentaje de CaO y MgO varía entre 1,64-1,96% y 2,17-2,54%, respectivamente. El  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{TiO}_2$  muestran una concentración constante (0,02%). La concentración de MnO fluctúa entre 0,28 y 0,33, estos últimos elementos son litófilos y guardan una gran relación con la concentración de  $\text{SiO}_2$  (15,40-30,17%) lo que puede estar relacionado principalmente con la presencia de cuarzo y otros silicatos en la roca huésped, el Mn por su parte es un elemento siderófilo, su presencia estaría asociada a las mineralizaciones de hierro.

Tabla 1. FRX de las muestras analizadas.

Table 1. FRX of the analyzed samples.

	YJ-01	YJ-02	YJ-03	YJ-05
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	78,35	67,20	64,21	69,07
$\text{SiO}_2$	15,40	27,16	30,17	24,94
MgO	2,32	2,17	2,32	2,54
CaO	1,96	1,64	1,69	1,70
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,72	0,65	0,56	0,66
MnO	0,33	0,26	0,28	0,28
$\text{K}_2\text{O}$	0,02	0,02	0,02	0,02
$\text{TiO}_2$	0,02	0,02	0,02	0,02

Fuente: autores.

Las concentraciones de óxidos de hierro reflejan un factor de enriquecimiento, este factor es considerado cuando la concentración sobrepasan la abundancia y distribución normal del mineral en la roca, para el caso del hierro el factor de enriquecimiento debe ser cuatro veces mayor con relación a su distribución normal, y teniendo en cuenta que la abundancia de hierro en las rocas volcánicas, oscila entre 9,64% y 8,60% [23], estas manifestaciones de hierro aflorantes en el corregimiento de Corral de Piedras pueden representar un interés industrial.

La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) son los principales minerales de hierro. La magnetita es negra o marrón-negra con un brillo metálico, la hematita es de color negro a acero o gris plata, marrón a marrón rojizo, o rojo. Las variedades incluyen la hematita reniforme, martita (pseudomorfo de la magnetita), hierro rosa y especularita (hematita especular). Mientras que las formas de hematites varían, todas tienen una raya de color rojo-óxido.

La magnetita ha sido importante en la comprensión de las condiciones bajo las cuales se formaron las rocas. Reacciona con el oxígeno para producir hematita, y ambos minerales generan un tapón para controlar la fugacidad de oxígeno. La hematita puede precipitar fuera del agua o acumularse en capas en los fondos de lagos, manantiales u otras aguas estancadas. También puede generarse sin presencia de agua, sin embargo, por lo general son resultado de actividad volcánica. Sugerimos que estos minerales de hierro en la Riodacita de los Tábanos son productos de procesos de alteración en rocas volcánico-sedimentarias. Probablemente precipitados a partir de fluidos hidrotermales que se movían través del macizo rocoso.

Las manifestaciones de hierro en la Unidad Riodacita Los Tábanos, en el sector de Corral de Piedras, San Juan del César (La Guajira), se encuentran constituida en más del 60% por magnetita y hematita, las cuales mostraron en campo estructuras notablemente simila-

res a los flujos de lavas máficas. Por lo tanto, se partió de la teoría de que estas manifestaciones podrían representar un ejemplo raro de un líquido efusivo de óxido de hierro. Sin embargo, las pruebas de campo y petrográficas sugieren que estos minerales de hierro representan la sustitución de los flujos de riodacita, con pseudomorfos de magnetita-hematita después de la formación de los minerales de la roca. La hipótesis es apoyada en que las condiciones bajo las cuales se forma la magnetita en estos supuestos flujos de lava de magnetita, los elementos trazas contenido en las muestras de magnetitas masivas son diferente a los de cualquier magnetita magmática conocida, incluyendo fenocristales primarios de magnetita procedentes de rocas huésped no alteradas [24].

En cambio la magnetita de las rocas tomadas de la Riodacita de los Tábanos, sugiere una similar composición a la magnetita hidrotermal, formada en ambientes de alta temperatura ( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), como los depósitos de óxido de hierro-cobre-oro (IOCG) y pórfidos cupríferos, los elementos trazas de la magnetita en la magnetita masiva se caracterizan por varias condiciones tales como: (1) agotamiento en elementos considerados relativamente inmóviles en fluidos hidrotermales (por ejemplo, Ti, Al, Cr, Zr, Hf y Sc); (2) enriquecimiento en elementos altamente incompatibles con magnetita magmática (elementos de tierras raras (ETR, Si, Ca, Na y P) y normalmente presentes en muy baja abundancia en magnetita magmática; (3) altas relaciones Ni/Cr que son típicas de la magnetita de ambientes hidrotermal y (4) zonación oscilatoria de Si, Ca, Mg, ETR, mayoría de elementos de alta resistencia, y truncamientos en la zonación que indican disolución, similares a los formados en depósitos hidrotermales de Fe en skarn [24]. Además, la magnetita secundaria en la roca huésped alterada y brechificada, que forma diseminaciones y venas, tiene la misma composición que la magnetita de lentes masivos.

La magnetita euédral que rellena venas y enrejados huecos en la roca huésped brechificada en los lentes de magnetita masivas también muestra zonación oscilatoria probablemente formada por composición fluctuante y/o por las condiciones fisicoquímicas del fluido [24].

Por lo tanto, la huella química de magnetita de los supuestos residuos de lava de magnetita en el sector de Corral de Piedras apoya el modelo hidrotermal de sustitución metasomática de los flujos de lava riodacíticos por disolución y precipitación de magnetita de fluidos a alta temperatura, en lugar de un origen magmático de un líquido efusivo de óxido de hierro.

#### 4. CONCLUSIONES

El análisis de difracción de rayos X (DRX) proporcionó información cualitativa y cuantitativa sobre la composición elemental, mediante la comparación de los perfiles de difracción y las fases cristalinas encontradas, determinando así que los constituyentes principales en las manifestaciones de hierro en Corral de Piedras son la hematita, magnetita, cuarzo y actinolita calentada.

Las muestras de minerales de hierro analizadas presentan una gran variedad de características microestructurales, morfológicas y texturales, por su parte la hematita se caracterizó por formas poliédricas de bordes bien definidos y textura ligeramente rugosa, la magnetita fue observada con una textura desquebrajada, rugosa y bordes sinuosos producto de alteración hidrotermal y procesos metasomáticos a temperatura relativamente constante, el cuarzo y la actinolita presentaron una textura lisa, superficie compacta y densa.

La fluorescencia de rayos X (FRX), mostró concentraciones de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que varían entre 64,21 y 78,35% reflejando un factor de enriquecimiento, dichas concentraciones sobrepasan cuatro veces, las concentraciones y distribuciones normales de hierro en rocas volcánoclasticas, representando estas manifestaciones de hierro Corral de Piedras un posible interés industrial.

Las manifestaciones de hierro en el corregimiento de Corral de Piedras son asociados a origen hidrotermal de sustitución metasomática de los flujos de lava riodacíticas por disolución y precipitación de magnetita, la magnetita experimentó oxidación secundaria en distintos grados, transformándola en hematita, otro mineral que sustenta esta hipótesis, es la presencia de la actinolita confirmado de las altas temperaturas que experimentó la roca.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Geólogo Ph.D. Carlos Alberto Ríos Reyes, director del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada y del Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander, por su apoyo en la realización e interpretación de los análisis realizados.

#### REFERENCIAS

- [1] V.S. Venkata Varadan, "Variación de los elementos en la naturaleza", *OIEA boletín*, 19 (2), pp 50-58, 1977.
- [2] M. Orrillo, (2014), [Internet], Slideshare. Clasificación geoquímica de Goldschmidt. Cristalografía - ingeniería de minas. Universidad Nacional de Cajarma. LinkedIn Corporation. Disponible desde: <<https://es.slideshare.net/RCOrriilloMendoza/clasificacion-geoquimica-de-goldschmidt>> [Acceso 21 de mayo 2017].

- [3] V. Goldschmidt, "The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture delivered before the Chemical Society on March 17th, 1937". *Journal of the Chemical Society*, 74 (9), 655–673. 1937.
- [4] J. Montero, (1999), [Internet], *Minerales y Rocas*. Facultad de ingeniería. Disponible desde: < <http://www.docentes.unal.edu.co/jmonteroo/docs/4-5%20Minerales%20-Rocas.pdf> > [Acceso 13 de diciembre de 2017].
- [5] S. Manosalva, W. Naranjo, "Caracterización metalográfica de las manifestaciones de mineral de hierro, Paipa (Boyacá, Colombia)", *Boletín de ciencias de la tierra*, (20), 89–100, 2007.
- [6] R. Stanton. *Ore Petrology*. Ed McGraw Hill, New Cork. 1972, pp 558.
- [7] M. González, L. Guevara, R. Umaña, R. Pinto, et al. (2008). Evolución Térmica de la subcuenca de la baja Guajira, Contrato N° 56 UIS - ANH. Grupo de Investigaciones en Geología de Hidrocarburos y Carbones Universidad Industrial de Santander.
- [8] C. Tschanz, C. Jimeno, J. Cruz. (1969). Mapa geológico de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia, 1:200.000. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico - Mineras Bogotá, Colombia.
- [9] F. Colmenares, A. Mesa, J. Roncancio, E. Arciniega, P. Pedraza, A. Cardona, A. Romero, C. Silva, S. Alvarado, O. Romero, A. Vargas. (2007) *Geología De La Planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33 Y 34*. Proyecto: "Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta". Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- [10] O. Castellanos. C. Ríos, L. Mantilla, "Occurrence of a skarn-type mineralogy found in Ciénaga Marbles, located in the NW foothills of the Santa Marta Massif (Colombia)", *DYNA - Universidad Nacional de Colombia*, 83 (196), 69 – 79, 2016.
- [11] J. Toussaint, *Evolución geológica de Colombia*. Medellín, Ed: Universidad Nacional de Colombia, 1993, pp. 227, 229.
- [12] F. Etayo, F. Barrero, H. Lozano, A. Espinosa, H. González, A. Orrego, I. Ballesteros, H. Forero, C. Ramírez, F. Zambrano, H. Duque, R. Vargas, A. Núñez, J. Álvarez, C. Ropaín, E. Cardozo, N. Galvis, L. Sarmiento. *Mapa de Terrenos geológicos de Colombia*. Bogotá, Ed: Ingeominas, 1983, pp. 25, 100, 106.
- [13] M. Sánchez. (2016). Presentación Técnica del área de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) adjunta a la Coordinación de Servicio Técnico de Laboratorio de Exploración y Producción. Instituto Colombiano del Petróleo, Ecopetrol. Vicepresidencia de Innovación y Tecnología.
- [14] D. Jerez. Crecimiento y caracterización de micro y nanoestructuras de óxidos de hierro y estaño. Trabajo de Investigación del Máster de Física Aplicada. Universidad Complutense de Madrid, 29 – 31. 2012.
- [15] X. Blamey, E. Mosquera, F. Díaz, "Estudio Exploratorio II. Identificación de Nanopartículas en Procesos Industriales de Soldadura y de Minería", *Ciencia y Trabajo*, 18 (55), 28 – 36, 2016.
- [16] J. Galindo, J. Quintana, L. Flores, J. Cornejo, "Síntesis y caracterización de magnetita Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>", *Aristas: Investigación Básica y Aplicada*, 5 (9), 103 – 105, 2016.
- [17] W. Xiaoyuan, Z. Zhigang, Q. Haiyan, CH. Shuai, Y. Xuebo, Y. Baoju "Fe-Si-Mn-Oxyhydroxide Encrustations on Basalts at East Pacific Rise near 13°N: An SEM – EDS Study", *Oceanic and Coastal Sea Research*, 13 (6), 917-925, 2014.
- [18] P. Nadoll, T. Angerer, J. Mauk, D. French, J. Walshe, "The chemistry of hydrothermal magnetite: A review", *Ore Geology Reviews. Elsevier*, 61, 1 – 22, 2014.
- [19] S. Yin, M. Changqian, P. Robinson, "Textures and high field strength elements in hydrothermal magnetite from a skarn system: Implications for coupled dissolution-precipitation reactions", *American Mineralogist*, 102 (5), 1045 – 1065, 2017.
- [20] A. Mücke, A. Cabral, "Redox and nonredox reactions of magnetite and hematite in rocks", *Chemie der erde. Elsevier*, 65 (3), 271 – 278, 2005.
- [21] L. Jie-feng, T. Cho-Jen, "Hydrothermal phase transformation of hematite to magnetite", *Nanoscale*, 9 (1), 230, 2014.
- [22] P. Liu, M. Zhou, W. Chen, J. Gao, X. Huang, "In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: Fe-Ti-(V) oxide-bearing mafic-ultramafic layered intrusions of the Emeishan Large Igneous Province SW China", *Ore Geology Reviews*, 65 (4), 853 – 871, 2015.
- [23] G. Faure. Principles and applications of Geochemistry. New Jersey: Prentice Hall. Upper Saddle River, N. J. 1998.
- [24] S. Dare, Barnes, S. J. Beaudoin, G. Did, "The massive magnetite lava flows" of El Laco (Chile) formed by magmatic or hydrothermal processes? New constraints from magnetite composition by LA-ICP-MS", *Mineralium Deposita*, 50 (5), 607 – 677, 2015.