

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA**



**ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LAS FRACCIONES MAGNÉTICAS Y NO-MAGNÉTICAS  
DE LOS MINERALES PESADOS TRANSPORTADOS POR LOS RÍOS QUE DRENAN  
LAS PROVINCIAS DE CUCHIVERO Y RORAIMA, ESTADOS BOLÍVAR Y  
AMAZONAS, VENEZUELA.**

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela por la **Br. Ariana María Fermín Fernández** como requisito para aprobar la asignatura Proyecto Geoquímico II y optar al título de Licenciada en Geoquímica.

Caracas, Octubre de 2013

## ACTA

Aprobado en nombre de la Universidad Central de Venezuela por los miembros del Jurado Examinador.

---

Prof. Ramón Sifontes

Jurado

---

Prof. Ruthman Hurtado

Jurado

---

Prof. Williams Meléndez

Tutor

***A mi hermosa madre que me ha  
enseñado que en la vida todo es posible  
con esfuerzo, inteligencia y humildad.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente a Dios, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias e Instituto de Ciencias de la Tierra, por abrirme sus puertas y permitir mi formación tanto a nivel académico como personal.

Le doy gracias a mi madre y hermana por apoyarme en todo momento, por su amor, comprensión y valores inculcado. Sobre todo a mi madre por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mi tutor el Prof. Williams Meléndez por su confianza, paciencia, disposición e ir conmigo de la mano hacia el camino de la excelencia.

A mi jurado el Prof. Ruthman Hurtado por toda la ayuda y tiempo brindado para la realización de este trabajo.

A los profesores del ICT, que impartieron gran parte de los conocimientos adquiridos durante la licenciatura. A los técnicos del ICT, por su labor y excelente atención.

A mis queridos amigos y compañeros de Proyecto Geoquímico I y Geoquímica de Campo 2011 por confiar y creer en mí, por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias inolvidable.

Al Prof. Armando Ramírez aunque ya no se encuentre con nosotros físicamente, siempre estará presente en mi corazón, por ser un profesor ejemplar y excelente amigo.

A mi tía Yusmila y Loly, por haberme recibido en su casa, por ser mujeres valientes, dulces, alegres y por brindarme su apoyo y amor incondicional.

A todo aquellos que de una u otra manera formaron parte importante de esta meta. Muchísimas gracias.

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es estudiar las características geoquímicas de los minerales pesados en función del magnetismo, específicamente en los sedimentos presentes en los ríos Maniapure, Suapure, Simonera, Villacoa, Ore, Cuao, Autana y Sipapo ubicados en los estados Bolívar y Amazonas, con el fin de aportar información que pueda ayudar en futuros estudios de prospección geoquímica. Para llevar a cabo dicho estudio, fueron recolectadas ocho (8) muestras de preconcentrado de pesados en la parte baja de los ríos, que luego fueron separados por tamaño de grano y purificados con bromoformo para posteriormente separarlos por magnetismos, obteniendo así las (3) tres fracciones de interés: magnética (0,4 A), medianamente magnética (0,8 A) y no-magnética.

El análisis mineralógico de las muestras fue llevado a cabo mediante la técnica de DRX, obteniéndose que la fracción magnética esta constituida por ilmenita, la medianamente magnética por una variedad de minerales como ilmenorutilo, pseudorutilo y hematita (producto de la alteración de la ilmenita y magnetita), fosfatos de tierras raras (monacita y xenotima) y hastingsita, en cuanto a la fracción no-magnética, la misma se encuentra constituida principalmente por circón.

El análisis químico fue realizado mediante ICP-AES y AAS, determinando la concentración de cuatro (4) elementos (Fe, Mn, Ti y Nb) para las fracciones magnética y medianamente magnética y tres (3) elementos (Fe, Mn y Zr) para la fracción no-magnética. Los resultados obtenidos indican que la fracción magnética presenta altas concentraciones de hierro (Fe) las cuales oscilan entre 37,30 – 29,91% p/p, para titanio (Ti) 43,78-34,14% p/p, manganeso (Mn) 4,25 -1,73% p/p y niobio (Nb) 5488-2603 ppm, encontrándose dichos elementos en la fase mineral ilmenita. Además, fue establecida la relación Ti/Ti+Fe para clasificar el grado de alteración de las ilmenitas, encontrándose que la fracción de 0,4 A está caracterizada por una mezcla de ilmenita en varios grados

de alteración, específicamente ilmenita para la fracción de arena media e ilmenorutilo para la fracción de arena fina.

En cuanto a las concentraciones de Ti, las mismas son más elevadas para la fracción medianamente magnética que para la fracción magnética, a excepción de los ríos Maniapure, Suapure y Simonera en el Estado Bolívar, al igual que las concentraciones reportadas para Nb, las cuales oscilan entre 1561-6787 ppm, donde el río Ore presenta la mayor concentración de dicho elemento.

Finalmente, la fracción no-magnética el circonio (Zr) es el elemento mayoritario con concentraciones que oscilaron entre 35,45–51,30% p/p y dicho elemento está contenido en la fase mineral circón y este tiende a concentrarse en las fracciones de menor tamaño. Los valores más elevados de circonio fueron encontrado en los ríos Autana y Sipapo que puede ser atribuido aporte litológico del Grupo Roraima.

**Palabras claves:** *minerales pesados, fracción magnética, geoquímica, Provincia Cuchivero, Provincia Roraima.*

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
2.1.1. <i>Clasificación de los minerales pesados</i> .....	4
2.1.2. <i>Concentración de minerales pesados en rocas</i> .....	6
2.1.3. <i>Factores que afectan la abundancia relativa de los minerales pesados en los sedimentos</i> .....	7
2.1.4. <i>Estabilidad de los minerales pesados</i> .....	10
2.1.5. <i>Susceptibilidad magnética de los minerales pesados</i> .....	14
2.1.6. <i>Importancia del estudio de los minerales pesados</i> .....	16
2.1.7. <i>Separación de los minerales pesados</i> .....	18
2.2. ANTECEDENTES.....	21
2.2.1. <i>Antecedentes internacionales</i> .....	21
2.2.2. <i>Antecedentes nacionales</i> .....	23
2.3. MARCO GEOLÓGICO .....	28
2.3.1. <i>Provincia geológica de Cuchivero</i> .....	28
2.3.2. <i>Provincia geológica de Roraima</i> .....	32
2.1. ÁREA DE ESTUDIO .....	34

2.1.1. Ubicación.....	34
2.1.2. Geomorfología.....	34
2.1.1. Hidrografía.....	35
2.1.2. Suelo.....	35
2.1.3. Clima.....	35
2.1.4. Vegetación.....	35
<b>2. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>37</b>
2.2. ETAPA DE CAMPO.....	37
2.3. ETAPA DE LABORATORIO.....	39
2.3.1. Tratamiento físico.....	39
2.3.2. Análisis químico.....	40
2.3.3. Exactitud y precisión del método.....	43
2.3.4. Análisis mineralógico.....	43
2.3.5. Tratamiento estadístico.....	44
2.3.6. Elaboración de los mapas.....	44
<b>3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
3.1. ANÁLISIS MINERALÓGICO DE LOS MINERALES PESADOS.....	45
3.2. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MINERALES PESADOS.....	47
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>66</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>67</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Minerales pesados más comunes en base a su densidad.....	5
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de los minerales pesados según su diafanidad. ....	6
<b>Tabla 3.</b> Orden de persistencia y orden generalizado de la estabilidad química de los minerales pesados.....	12
<b>Tabla 4.</b> Estabilidad mecánica de minerales pesados. ....	13
<b>Tabla 5.</b> Minerales pesados separados por el frantz. ....	15
<b>Tabla 6.</b> Asociaciones de minerales pesados para el estudio de proveniencia.....	16
<b>Tabla 7.</b> Líquidos de alta densidad comúnmente usados para la separación y concentración de minerales pesados. ....	20
<b>Tabla 8.</b> Relación Ti/Ti+Fe en las diferentes fracciones granulométricas en función de del magnetismo (0,4 A).....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Procesos que influyen en la distribución y abundancia de los minerales pesados en los sedimentos. ....	9
<b>Figura 2.</b> Separación por gravedad. (a) Sistema hidrodinámico. (b) Montaje del equipo para la separación de minerales pesados por líquido de alta densidad.....	20
<b>Figura 3.</b> Provincia geológica del Escudo de Guayana Venezolano. ....	29
<b>Figura 4.</b> Mapa de localización de la zona de estudio. ....	35
<b>Figura 5.</b> Mapa de ubicación de los puntos de muestreo. ....	38
<b>Figura 6.</b> Perlas generadas por la fusión alcalina de las muestras no-magnéticas.....	42
<b>Figura 7.</b> Proceso de digestión ácida total para las muestras magnéticas y medianamente magnéticas.....	43
<b>Figura 8.</b> Variación de la concentración de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.....	48
<b>Figura 9.</b> Variación de la concentración de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ por tamaño de grano en función del magnetismo. ....	49
<b>Figura 10.</b> Variación de la concentración de $\text{MnO}$ por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.....	51
<b>Figura 11.</b> Variación de la concentración de $\text{MnO}$ por tamaño de grano en función del magnetismo. ....	52
<b>Figura 12.</b> Variación de la concentración de $\text{TiO}_2$ por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.....	55
<b>Figura 13.</b> Variación de la concentración de $\text{TiO}_2$ por tamaño de grano en función del magnetismo. ....	56
<b>Figura 14.</b> Gráfico de correlación $\text{Fe}_2\text{O}_3$ vs $\text{TiO}_2$ en la fracción magnética 0,4 A.....	58

<b>Figura 15.</b> Variación de la concentración de Nb por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.....	60
<b>Figura 16.</b> Variación de la concentración de Nb por tamaño de grano en función del magnetismo. ....	61
<b>Figura 17.</b> Variación de la concentración de ZrO <sub>2</sub> por tamaño de grano en la fracción no-magnética.....	63

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ambientes fluviales constituyen uno de los medios continentales de mayor importancia estratigráfica, puesto que en ellos han acumulado una gran cantidad de sedimentos a lo largo de toda la historia de la Tierra (Méndez, 2007). Los sedimentos son partículas no consolidadas producto de la meteorización y erosión de las rocas preexistentes, además son formados por procesos químicos y bioquímico de soluciones ricas en determinadas especies químicas y por la acumulación de material esquelético o restos de organismos (Komar, 2007).

Los sedimentos están constituidos por una diversidad de minerales los cuales pueden ser clasificados de acuerdo a su resistencia a la meteorización, densidad, susceptibilidad magnética y composición química entre otras propiedades (Carver, 1971). Según su densidad los sedimentos contienen dos tipos de minerales; pesados y livianos (Mange y Maurer, 1992). Los minerales pesados han sido definidos operacionalmente como aquellos que poseen una gravedad específica mayor a 2,9 g/cm<sup>3</sup> (Pettijohn, 1972 y Boggs, 2006). En general son minerales accesorios de la roca parental, no obstante pueden ser el remanente de minerales primarios, tales como los componentes máficos más abundantes pero inestables de algunas rocas ígneas. El circón es un ejemplo de un mineral félsico accesorio y estable, por su parte la hornblenda es el representante de un mineral máfico inestable muy abundante en el material parental de origen ígneo (Pettijohn, 1975).

Los análisis mineralógicos, morfológicos y químicos de minerales pesados han sido herramientas de numerosas investigaciones, aplicadas en los estudios de roca, suelo y sedimento, con la finalidad de descifrar la información que acarrea estos minerales de alta densidad, sobre su origen y recorrido a través del ciclo geológico (Abreu, 2007). El estudio de los minerales pesados puede proveer valiosa información y en consecuencia, están considerados como indicadores susceptibles de fuente de

sedimentos (Rubey, 1933), debido a características tales como su composición química, (elementos mayoritarios y minoritarios) y en especial la concentración de los elementos traza, ya que dichos elementos son mejores discriminantes en los procesos petrológicos, por presentar mayor variabilidad en concentración y registrar procesos que no se observan con los elementos mayoritarios (Morton y Mange, 2007). Por otro lado, la correlación de algunos elementos mayoritarios y traza en función de la mineralogía y la susceptibilidad magnética, permite medir pérdidas y ganancias de materiales dentro de perfiles de meteorización (Lapointe et al. 1986). Además, existe una estrecha relación entre la susceptibilidad magnética y el grado de alteración que han sufrido las rocas en un área determinada debido a una gradual degradación de los óxidos de hierro y titanio, catalizada por la percolación de agua en el sistema (Harding et al. 1988). De igual forma, algunos estudios concluyen que las propiedades magnéticas de los minerales pesados están controladas por las condiciones petrogenéticas locales, además de la presión y la historia de calentamiento de la roca fuente (Hounslow y Morton, 2004).

Otros estudios han determinado la acción del régimen hidráulico y los procesos de concentración gobernantes en la proveniencia de sedimentos. En tal sentido, se ha identificado la litología origen del sedimento y elucidado los procesos geológicos de la zona en estudio, contribuyendo así en la determinación de probables provincias geológicas y la posible localización de depósitos minerales de interés económico (Yang et al. 2009).

Es por ello que la presente investigación busca realizar un estudio químico de las diferentes fracciones magnéticas de los minerales pesados presentes en los sedimentos de los ríos Autana, Maniapure, Suapure, Sipapo, Villacoa, Ore, Cuaoy y Simonera, que drenan las provincias geológicas de Chuchivero y Roraima, región donde se encuentran importantes recursos minerales como depósitos de placer (diamante y oro), depósitos de vetas (Au, U y Fe), depósitos pegmatíticos (Nb, Ta, y

Sn), skarn (Sn) y lateritas (Al, Fe, Mn, Mg, Nb, Pb, Zn y tierras raras) (Torres, 1989), con el fin de establecer las posibles unidades litológicas de procedencia, así como tratar de ubicar posibles anomalías de elementos de interés económicos.

De acuerdo a lo anteriormente indicado, se plantean los siguientes objetivos:

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

- Estudiar las características geoquímicas de las fracciones magnéticas y no-magnéticas de los minerales pesados transportados por los ríos Maniapure, Suapure, Simonera, Villacoa y Ore en el Edo. Bolívar y los ríos Cuao, Autana y Sipapo en el Edo. Amazonas que drenan las provincias de Cuchivero y Roraima.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la concentración de los elementos mayoritarios (Fe, Mn, Ti, Zr, Ca, Mg) y traza (Nb, Rb, Sr, Y, Pb, Cr, Zn, V, Hf, Th, La, Ce, Ta) en las diferentes fracciones magnéticas y no-magnéticas de los minerales pesados de los ríos indicados.
- Establecer correlaciones entre los elementos indicados y asociaciones con la litología presente en la región, buscando localizar posibles anomalías geoquímicas.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Los sistemas fluviales son cursos de agua que se mantienen, por lo general, en permanente movimiento y constituyen el principal agente de alteración del paisaje. Dentro de los sistemas fluviales las corrientes tienen la capacidad de erosionar sus cauces y también pueden transportar enormes cantidades de material de manera continua, el cual es producido por la meteorización y erosión de rocas preexistentes, que son químicamente alteradas o físicamente disgregadas en fragmentos, granos o partículas (Elosegi y Sabater, 2009). Este material suele incorporar una serie de minerales neoformados como arcillas y otros que son muy resistentes al proceso de meteorización y erosión como los resistatos pesados. Estos últimos han sido definidos operacionalmente, como los minerales que poseen una gravedad específica mayor a  $2,89 \text{ g/cm}^3$  (Boggs, 2006). Definición basada en la gravedad específica de los líquidos densos (altamente tóxicos) comunmente usados en la separación y concentración de los minerales, cuyo rango de densidad oscila entre  $2,89 \text{ g/cm}^3$  y  $2,96 \text{ g/cm}^3$  (Mange y Maurer, 1992). Los minerales pesados incluyen más de 500 especies (Tabla 1).

#### **2.1.1. Clasificación de los minerales pesados**

Los minerales pesados, pueden clasificarse de acuerdo a su origen, en alogénicos y autigénicos. Los alogénicos, o minerales detríticos, representan las acumulaciones derivadas de rocas fuentes y han sobrevivido a la alteración por meteorización y erosión. Por su parte, los autigénicos o minerales secundarios, han sido formados en el propio lugar donde se encuentran, producto de las diferentes reacciones (hidrólisis, oxido-reducción, solubilización, hidratación, etc.) con los agentes de meteorización química sobre los minerales originales de la roca (Feo-Codecido, 1956).

**Tabla 1.** Minerales pesados más comunes en base a su densidad.

Nombre	Formula química	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Dureza
Turmalina	Na(Fe, Mg, Al, Li) <sub>3</sub> Al <sub>6</sub> (BO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> (OH) <sub>4</sub>	3,0-3,25	7-7,5
Apatito	Ca(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F, Cl, OH)	3,15-3,20	5
Espodunema	LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3,15-3,20	6,5-7
Andalucita	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	3,16-3,20	7,5
Hornblenda	Si <sub>6</sub> O <sub>22</sub> (Al,Fe,Ti) <sub>3</sub> Ca <sub>2</sub> Na(Mg,Fe) <sub>4</sub> (O,OH) <sub>2</sub>	3,2	5-6
Sillimanita	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	3,23	6-7
Diópsido	Ca(Mg,Fe)Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3,2-3,3	5,5-6,5
Olivino	(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	3,27-4,37	6,5-7
Enstatita	MgSiO <sub>3</sub>	3,2-3,5	5,5
Epidota	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (OH) <sub>2</sub>	3,35-3,45	6,5
Esfena	CaTiSiO <sub>5</sub>	3,4-3,55	5-5,5
Topacio	Al <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (F, OH) <sub>2</sub>	3,4-3,6	8
Diamante	C	3,5	10
Granate	(Mg,Fe,Mn,Ca) <sub>3</sub> (Al,Fe,Cr) <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	3,5-4,3	6-7,5
Espinela	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	3,6-4,0	8
Cianita	Al <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	3,56-3,66	5-7
Estaurolita	FeAl <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	3,65-3,75	7-7,5
Anatasa	TiO <sub>2</sub>	3,9	5,5-6
Rutilo	TiO <sub>2</sub>	4,18-4,25	6-6,5
Gahnita	ZnAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4,55	7,5-8
Cromita	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5,85	5,5
Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	4,7	5,5-6
Circón	ZrSiO <sub>4</sub>	4,68	7,5
Monacita	(Ce,La,Y,Th)PO <sub>4</sub>	5,0-5,3	5-5,5
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5,18	6
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,26	5-6
Casiterita	SnO <sub>2</sub>	6,8-7,1	6-7
Oro	Au	19,3-19,3	2,5-3
Platino	Pt	21,4-21,9	4-4,5

Datos tomados del manual de mineralogía de Klein y Hurlbult (2002).



Otra clasificación de estos minerales viene dada por la diafanidad, el cual es una propiedad óptica que presentan y está referida a poder transmitir o no la luz cuando se examinan en láminas delgadas, separándolos en minerales opacos y no opacos (Perkins, 2010). Las diferencias en la resistencia a la meteorización química y erosión mecánica, subdividen a las asociaciones de minerales opacos y no opacos en dos grupos, estables y metaestables (Tabla 2) (Boog, 2006).

**Tabla 2.** Clasificación de los minerales pesados según su diafanidad.

	<b>ESTABLES</b>	<b>METAESTABLES</b>
<b>OPACOS</b>	Hematita, ilmenita	Leucoxeno, magnetita
<b>NO OPACOS</b>	Circón, turmalina, rutilo, anatasa, corindón	Anfíboles, piroxenos, granate, clorita, apatito, epidota, olivino, sillimanita, esfena, estaurolita, topacio, monacita, zoisita, clinzoisita y además de unos 100 a otros de menor importancia volumétricamente

Datos tomados del Boog (2006).

### **2.1.2. Concentración de minerales pesados en rocas**

Las rocas presentan una concentración de minerales pesados que puede ir desde 0 a 100%, ya que en la roca parental estos minerales pueden estar presentes, ya sea como minerales esenciales o formadores de roca (ej: anfíboles, piroxenos y micas) o minerales accesorios como circón, turmalina, monacita y apatito (Mange y Mauner, 1992). Las rocas ígneas félsicas, contienen pocos minerales pesados esenciales (a excepción de las micas); sin embargo presentan una serie de minerales accesorios los cuales ocurren en menos de 1%, pero son de gran importancia (ej.: circón, monacita, rutilo, etc.) (Meléndez, 2006).

Las rocas ígneas intermedias (dioritas, andesitas, traquitas) usualmente contienen minerales pesados esenciales ferromagnesianos, tales como hornblenda, augita y

biotita y como accesorios apatito, circón y óxidos de hierro. Por su parte las rocas ígneas máficas (gabros, basaltos), presentan anfíboles, olivinos y piroxenos como esenciales, mientras que la magnetita, ilmenita, espinela y apatito están como minerales accesorios. De igual forma las rocas ultramáficas contienen olivinos y piroxenos como minerales esenciales, además de cromita, magnetita e ilmenita como minerales accesorios (Mitchel, 1975).

En cuanto a las rocas metamórficas, éstas tienen la particularidad de haber sido afectadas por variables temperaturas y presiones, además de tensiones mecánicas, por lo que el cambio en la mineralogía depende de la intensidad del metamorfismo. De acuerdo a éstos, pueden aparecer minerales como clorita, granate, sillimanita, cianita y estaurólita. Por último, las rocas sedimentarias son un caso particular, ya que éstas pueden contener minerales pesados entre (0 – 10%), sin embargo las fases minerales y las proporciones presentes dependen de la naturaleza de la roca de la cual los sedimentos fueron derivados y de la capacidad de estos minerales para resistir los procesos de meteorización, erosión, transporte, depositación, diagénesis y tectonismo (Meléndez, 2006).

### **2.1.3. Factores que afectan la abundancia relativa de los minerales pesados en los sedimentos.**

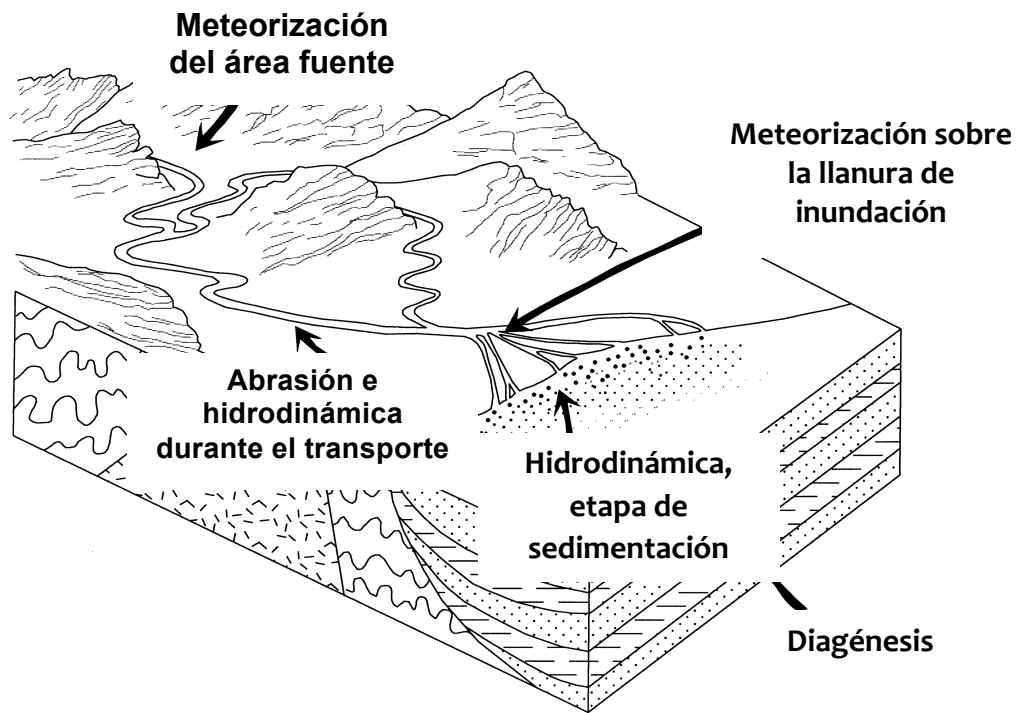
Desde el momento en que los minerales pesados son liberados de la roca fuente, opera una serie de factores, que determinan su composición y abundancia en los sedimentos. Esto a su vez son una función de la cantidad de minerales en las rocas fuentes y de su estabilidad frente a los procesos de meteorización y erosión (Figura 1). Entre estos factores se tienen:

- a) Concentración de los minerales pesados en la roca fuente: dependiendo de éste, existirá una mayor o menor disponibilidad de los minerales pesados en los

sedimentos generados por los procesos de meteorización y transporte (Morton y Hallosworth, 1999).

- b) Patrones fisiográficos y climáticos del área fuente:** controlan grandemente la preselección de los granos minerales durante la meteorización y erosión de la roca fuente, determinando la entrada de minerales pesados en el sistema sedimentario (Morton y Hallosworth, 1999).
- c) Factor hidráulico:** ocurre durante el proceso de transporte y depositación. Sus efectos resultan en la selectividad de los granos en función del tamaño, forma (hábito y clivaje) y densidad de los granos. La forma controla la abundancia relativa de los minerales pesados con diferentes hábitos, ya que los minerales de hábito esferoidal o prismático se comportan de manera diferente de aquellos con hábito hojoso o laminar (Morton y Hallosworth, 1999).
- d) Abrasión y destrucción mecánica:** ocurre una vez que los minerales son liberados de la roca fuente e incorporados al sistema de transporte, allí experimentan alteración física debida a la erosión, reflejándose en el tamaño, la fractura y redondez del grano (Morton y Hallosworth, 1999).
- e) Post-depositacional, diagenéticos:** los efectos de alteración ocurren una vez los minerales han sido depositados, provocando la corrosión y descomposición química de los mismo. Como respuesta a los cambios de temperatura, contacto con fluidos, como aguas meteóricas que percolan en el ambiente de depositación, o el agua expulsada de los poros del sedimento durante la compactación del mismo (Morton y Hallosworth, 1999).
- f) Meteorización química:** la incidencia de este factor sobre la abundancia relativa de los minerales pesados en los sedimentos, depende del tiempo que tardan éstos en ser transportados, es decir, en el caso en que el proceso de transporte ocurra antes de que la alteración afecte considerablemente la estabilidad química de los minerales, se mantendrán los mismos minerales en los

sedimentos que los que están presentes en la roca fuente. Por el contrario, si los sedimentos son transportados después de que la alteración afecte de forma considerable la estabilidad química de los minerales pesados, la relación entre éstos, con lo que están presentes en la roca fuente, será distinta (Morton y Hallosworth, 1999).



**Figura 1.** Procesos que influyen en la distribución y abundancia de los minerales pesados en los sedimentos. Tomado y modificado de Morton y Hallosworth (1999).

#### **2.1.4. ESTABILIDAD DE LOS MINERALES PESADOS**

La estabilidad de un mineral puede definirse como la resistencia a la alteración. Esta puede dividirse en: estabilidad mecánica (resistencia a la abrasión) y estabilidad química, que indica resistencia frente a los procesos de descomposición y disolución (Pettijohn, 1975).

- **Estabilidad química de los minerales pesados**

La resistencia de los minerales a la meteorización química depende del tamaño de la partícula, estructura cristalina y composición química, además influye en su estabilidad la composición química y el movimiento de las soluciones acuosa en contacto con ellos (Mange y Maurer, 1992). Los diferentes agentes de meteorización causan la pérdida parcial o completa de los minerales pesados en diferentes condiciones geoquímicas durante las etapas del ciclo de sedimentación, que va desde la meteorización de la roca fuente, la exposición subaérea en ambientes depositacionales y durante la diagénesis (Morton y Hallsworth, 1999).

La estabilidad de un mineral pesado puede estar determinada por el pH y Eh del ambiente geoquímico y la composición iónica del fluido de poro. La estabilidad relativa parece variar en los ambientes ácidos extremos, en relación con los ambientes alcalinos. Esta diferencia en el comportamiento es ilustrada por la respuesta del apatito y el granate bajo condiciones ácidas. Durante la meteorización a pH ácidos el apatito es altamente inestable, de la misma forma el granate, pero la estabilidad de este último varia de acuerdo al tipo de granate. De allí que los granates que tienen una alta concentración de Fe y Mn tienden a ser los más inestables (Mange y Maurer, 1992). La mayoría de los minerales pesados son muy estables a los procesos de meteorización y erosión, por lo que la ausencia de minerales inestables en ciertos casos puede ser atribuido a:

- Litología del área fuente (terrenos metamórficos de bajo grado, rocas carbonáticas, sedimentos policíclicos maduros, ninguno de los cuales contiene concentraciones representativas de minerales inestables) (Mange y Maurer, 1992).
- Pérdida pre-soterramiento (meteorización química intensa en la región, bajo relieve, baja tasa de depositación, pedogénesis avanzada, aguas subterráneas corrosivas; cualquiera de estos factores podría resultar en la ausencia de minerales inestables antes de llegar al lugar de sedimentación) (Mange y Maurer, 1992).
- Disolución post-soterramiento que podría resultar en la pérdida diagenética de minerales inestables (Mange y Maurer, 1992).

(Morton, 1985, en Mange y Maurer, 1992), resumió los trabajos previos de estabilidad química de los minerales pesados, basado en estudios de secuencias sedimentarias del Mar de Norte, estableciendo un orden de estabilidad de los minerales pesados en los ambientes geoquímicos ácidos y básicos. De igual manera (Pettijohn, 1941 en Mange y Maurer, 1992), consideró que la inexistencia de muchas especies de minerales pesados en sedimentos antiguos puede atribuirse a la remoción de minerales inestables por solución en los estratos. El autor considera el tiempo como un factor dominante en la supervivencia de los minerales en los sedimentos y fue expresado como el orden de persistencia de los minerales pesados (Tabla 3).

- **Estabilidad mecánica de los minerales pesados**

Los procesos de abrasión tienen lugar durante el transporte y estos causan una disminución del tamaño de los minerales, debido a una combinación del fracturamiento y del aumento de la redondez de los granos (Morton y Hallsworth, 1999).


**Tabla 3.** Orden de persistencia y orden generalizado de la estabilidad química de los minerales pesados.

Orden de persistencia modificado de Pettijohn (1941)	Orden generalizado de estabilidad química		
	Pettijohn et al. (1973)	Lixiviación ácida (Morton, 1985)	Profundidad de soterramiento, fluido de poro alcalino o salino (Morton, 1985)
Olivino	<b>Muy inestables:</b>	Olivino,	Olivino, piroxenos
Sillimanita	Olivino	piroxenos	Andalucita, sillimanita
Piroxenos	<b>Inestables:</b>	Anfíbol	Anfíbol
Esfena	Hornblenda	Esfena	Epidota
Andalucita	Actinolita	Apatito	Esfena
Anfíboles-Ca	Augita	Epidota, granate	Cianita
Serie glaucofano	Diópsido	Cloritoide,	Estaurolita
Riebequita	Hiperstena	espinela	Granate*
Epidota	Andalucita	Estaurolita	Apatito*, cloritoide,
Cianita	<b>Moderadamente</b>	Cianita	espinela
Estaurolita	<b>estables:</b>	Andalucita,	Turmalina, rutilo,
Monacita	Epidota	sillimanita,	circón
Xenotima	Cianita	turmalina, rutilo,	
Apatito	Granate (ricos Fe)	circón	
Granate	Sillimanita		
Circón	Esfena		
Turmalina	Zoisita		
Rutilo	<b>Estables:</b>		
	Apatito		
	Granate(pobre Fe)		
	Estaurolita		
	Monacita		
	<b>Muy estables:</b>		
	Rutilo		
	Circón		
	Turmalina		
	Anatasa		

Tomado de Mange y Maurer (1992).

Morton y Hallsworth (1999) establecen mediante la recopilación de los trabajos de Freise (1931), Thiel (1940 y 1945) y Dietz (1973), la estabilidad mecánica de algunos minerales pesados (Tabla 4). Las discrepancias en los estudios puede deberse probablemente porque Dietz determina forma y redondez como guía de resistencia a la abrasión, mientras que Freise y Thiel consideran además, la pérdida de peso del mineral durante los experimentos. Aunque ha habido un considerable esfuerzo para determinar la estabilidad mecánica de los minerales pesados, no existen evidencias de que los mismos desaparezcan a través de este proceso.

**Tabla 4.** Estabilidad mecánica de minerales pesados.

Freise (1931)	Thiel (1945)	Dietz (1973)	
Turmalina	Turmalina		Disminuye Estabilidad 
Corindón			
Cr-espinela			
Espinela			
Rutilo			
Estaurolita	Estaurolita		
Augita		Circón Cianita	
	Titanita		
Topacio		Granate	
Granate	Granate		
Epidota	Epidota		
Apatito			
Circón	Circón		
	Anfíbol-Ca		
	Rutilo	Rutilo	
		Estaurolita	
		Turmalina	
	Ortopiroxeno		
	Apatito		
Cianita	Cianita		
Olivino		Olivino	
Andalucita		Andalucita	
Diópsido			
Monacita			

Tomado y modificado de Morton y Hallsworth (1999).



### 2.1.5. Susceptibilidad magnética de los minerales pesados

La susceptibilidad magnética es una medida que relaciona la facilidad con la que algunos minerales en particular, se magnetizan al someterse a un campo magnético. Este parámetro puede expresarse como la razón entre la magnetización inducida del material y la intensidad del campo magnético, de allí que los minerales pueden clasificarse según el valor de su susceptibilidad magnética en tres grupos principales: Diamagnéticos ( $\chi < 0$ ), Paramagnéticos ( $\chi > 0$ ) y Ferrimagnéticos ( $X \rightarrow \infty$ ).

Estas propiedades magnéticas son el resultado de propiedades atómicas que son específicas de cierto número de elementos. Un electrón girando se comporta como un pequeño imán y producirá un campo magnético mientras rota alrededor de su orbita. El espín del electrón es el principal responsable de las propiedades magnéticas de átomos y moléculas. Cuando dos electrones situados en el mismo orbital tienen espines opuestos, uno se orienta hacia arriba y otro hacia abajo, el momento magnético neto tiende a cero. Estos materiales son denominados *diamagnéticos* porque no son atraídos por un imán, muchos minerales comunes no tienen respuesta magnética, tales como la calcita, albita, cuarzo y apatito (Klein y Hurlbult, 2002).

Los elementos mas importantes que producen momentos magnéticos son los que poseen electrones no compartidos en los orbitales *3d* de la primera serie de transición, que incluyen el Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni y Cu. Los momentos magnéticos de estos elementos de transición son el resultado del espín de electrones solitarios, no apareados y es proporcional al número existente de estos electrones. Por lo tanto, si una estructura cristalina tiene una distribución aleatoria de dipolos magnéticos causados por cationes con espines no apareados, es *paramagnética*. Un ejemplo de minerales que muestran este comportamiento son el olivino y la augita (Klein y Hurlbult, 2002).

Otro tipo de magnetismo es el *ferrimagnetismo*, en el cual los momentos de espín iónicos, son antiparalelos y por tanto, existen dominios magnéticos permanentes. Ejemplo de minerales ferrimagnéticos son los miembros de la serie magnetita-ulvöespinela, los miembros de la solución sólida hematita-ilmenita y la pirrotina (Klein y Hurlbult, 2002).

Debido a sus diferentes susceptibilidades magnéticas, los minerales pueden separarse unos de otro mediante un electroimán (Tabla 5). Un método común es mediante el separador isodinámico de Frantz. Este equipo está constituido por un canal vibratorio, por donde se desplaza la muestra, el cual está centrado entre los polos de un electroimán. La inclinación del canal es determinada por la pendiente lateral y frontal del electroimán y la separación magnética es controlada por la corriente aplicada al electroimán y la pendiente lateral del canal (Hutchinson, 1974 citado en Bermúdez y Anaya, 2007).

**Tabla 5.** Minerales pesados separados por el Frantz , Hess (1959).

Pendiente del equipo 20°				Pendiente del equipo 5°	
A	B	C	D	E	F
<b>Magnéticos (Amperaje)</b>					
<b>Altamente magnéticos</b>	<b>0,4 A</b>	<b>0,8 A</b>	<b>1,2 A</b>	<b>1,2 A</b>	<b>No-magnéticos</b>
Magnetita	Ilmenita	Horblenda	Diópsido	Esfena	Circón
Pirrotita	Granate	Hiperstena	Tremolita	Leucoxeno	Rutilo
	Olivino	Augita	Enstantita	Apatito	Anatasa
	Cromita	Actinolita	Espinela	Andalucita	Brookita
	cloritoide	Estaurolita	Estaurolita	Monacita	Pirita
		Epidota	(clara)	Xenotima	Corindón
		Biotita	Moscovita		Topacio
		Clorita	Zoisita		Fluorita
		Turmalina	Clinozoisita		Cianita Sillimanita
		(oscura)	Turmalina		Anhidrita
			(clara)		Berilo

Tomado de Bermúdez y Anaya (2007).

### 2.1.6. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS MINERALES PESADOS

Las descripciones e interpretaciones de los minerales pesados representa una herramienta de investigación invaluable, es por ello que numerosos investigadores los utilizan con diferentes propósitos, entre ellos la determinación de proveniencia asociando minerales específicos que permiten indicar la litología de origen (Feo-Codecido, 1956), como puede observarse en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Asociaciones de minerales pesados para el estudio de proveniencia.

<b>Asociación</b>	<b>Fuente</b>
Apatito, biotita, brookita, circón, hornablenda, monacita, moscovita, rutilo, titanita, turmalina (variedad rosada).	Rocas ígneas félsicas
Casiterita, fluorita, granate, monacita, moscovita, topacio, turmalina (variedad azul), wolframita, dumortierita, xenotima.	Pegmatitas graníticas
Augita, cromita, diópsido, hiperstena, ilmenita, magnetita, olivino, cromita.	Rocas ígneas máficas
Andalucita, condrodita, corindón, granate, estaurolita, flogopita, topacio, vesuvianita, wollastonita, zoisita.	Rocas producto de metamorfismo de contacto
Andalucita, cianita, cloritoide, epidota, estaurolita, glaucofana, granate, sillimanita, titanita, zoisita-clinozoisita.	Rocas producto de metamorfismo dinamotermal
Barita, circón (fragmentos redondeados), leucoxeno, minerales de hierro, rutilo, turmalina (fragmentos redondeados).	Rocas sedimentarias
Diamante, picroilmenita, magnetita, piropo, Cr-diópsido, Cr-espínela, circón, flogopita.	Kimberlitas

Tomado y modificado de Carver (1971).

Además de utilizar fases cristalinas de minerales pesados en la determinación de proveniencia, existe como alternativa el uso de asociaciones geoquímicas elementales en especies individuales de minerales pesados. El desarrollo tecnológico en el área de análisis instrumental, hace posible realizar análisis químico de alta resolución y obtener

las concentraciones de elementos mayoritarios, minoritario y en especial la de elementos traza, las cuales permiten inferir la proveniencia de los sedimentos, así como su uso en la prospección geoquímica, para la búsqueda de depósitos minerales de gran importancia económica (Hernández, 2009).

La ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) ha sido el foco de numerosos análisis geoquímico debido a que es uno de los constituyentes mas importante de depósitos minerales económicamente rentables. La química de la ilmenita y su composición de elementos traza ha sido utilizada para caracterizar procesos petrogenéticos, en ciertos ambientes tectónicos y como marcador de procedencia. Basu y Molinaroli (1991) en Morton y Mange (2007), encontraron que la ilmenita proveniente de fuente metamórfica está enriquecida en  $\text{TiO}_2$  en comparación con la ilmenita proveniente de fuente ígnea. Además, las correlaciones entre la ilmenita-piroxenos sumado a la determinación de la concentración y distribución de elementos traza en fases secundarias como la anatasa, goethita y hematita provenientes de la alteración de la ilmenita, pueden ayudar a establecer procedencia, trazadores paleoclimático y en la prospección y exploración de diamantes.

El rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) es un mineral muy estable y por lo tanto es común en sedimentos antiguos y recientes. Se encuentra como mineral accesorio en rocas ígneas y metamórficas. Zack *et al.* (2004) indican que el estudio de la concentración de elementos traza en granos de rutilo, es una herramienta poderosa para el estudio de procedencia y prospección, en especial con la correlación entre  $\text{Nb/TiO}_2$  y  $\text{Cr/TiO}_2$ . Por lo que puede ayudar a distinguir entre varias fuentes: rocas metamórficas de alto grado, eclogitas, granulitas, metapelitas y metabasitas.

Otras aplicaciones importante del estudio de los minerales pesados, viene dado por su uso como trazadores, con el fin de reconstruir el camino de transporte sedimentario (especialmente útiles para complementar análisis de paleocorrientes), elucidar procesos diagenéticos y construir mapas de dispersión de los sedimentos (Mange y Maurer,

1992). Lapointe *et al.* (1986) realizaron un mapeo de zonas de alteración en rocas graníticas, usando valores obtenidos de susceptibilidad magnética de minerales pesados. Ellos establecieron una estrecha relación entre la susceptibilidad magnética y el grado de alteración que han sufrido las rocas y lo interpretan en función de una gradual degradación de los óxidos de hierro y titanio, así como también una progresiva transformación de la magnetita a hematita, catalizada por la percolación de agua en el sistema.

Meinhold *et al.* (2011) demuestran que los minerales pesados son de gran utilidad para correlacionar areniscas que carecen de fósiles, esencialmente secuencias no marinas y en los estudios sedimentarios relacionados con el levantamiento tectónico, así como la evolución de cinturones orogénicos.

Uno de los pasos importantes en el estudio de los minerales pesados, es su separación de la matriz de minerales livianos. De allí nace la importancia de indicar los diferentes métodos de uso común para realizar la separación de los mismos.

### **2.1.7. SEPARACIÓN DE LOS MINERALES PESADOS**

Existen varios métodos para concentrar y separar los minerales pesados, ya sea de acuerdo a su tamaño, gravedad y susceptibilidad magnética. Según su gravedad se pueden separar mediante:

- Método hidrodinámico

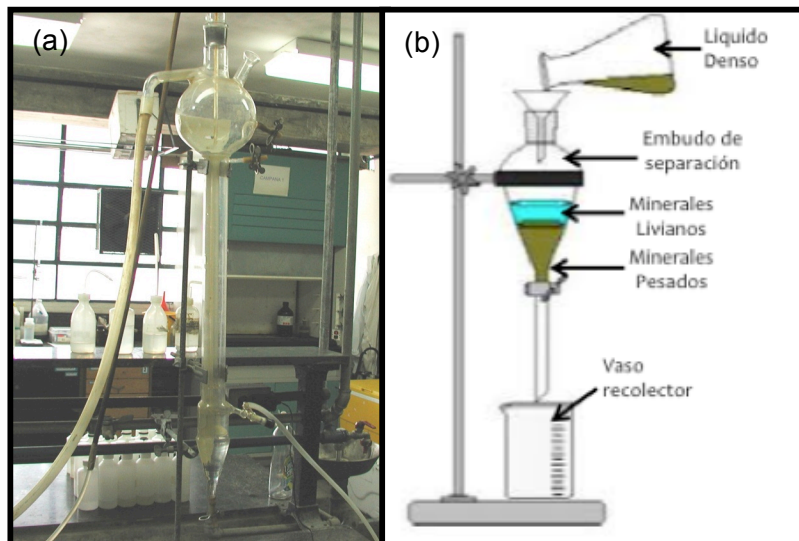
Este método permite separar los minerales pesados de los minerales livianos, en función de la densidad y forma, tendiendo a depositarse aquellos granos que sean más esféricos y elongados. La configuración del sistema para la separación con dicho método, consta de una esfera y columna de vidrio de un metro de longitud con abertura en la parte lateral del tubo que permita la entrada de agua y otra en la base central para

recolectar los minerales pesados. La esfera en la parte superior permite el reflujo de los granos de manera lenta y ésta tiene tres aperturas: una en la parte superior que contiene un agitador, otra que permite la salida del agua y la última, donde es agregada la muestra (Figura 2a). El flujo debe ser controlado de manera que los minerales descendan por su densidad a lo largo de la columna, el cual debe simular el efecto de un flujo laminar (Parales, 2009).

Este método tiene como ventajas: ser sencillo, práctico y bastante económico, pero tiene como desventajas: procesar sólo una muestra cada vez, separar en un tiempo considerablemente largo aquellas muestras que no han sido preconcentradas previamente (Parales, 2009).

- **Método de líquidos de alta densidad**

El método de líquidos de alta densidad es una técnica que permite separar los minerales pesados de los livianos y además puede separar los minerales pesados entre sí. Este método es llevado a cabo en una campana extractora y consiste en sumergir los minerales en un líquido de alta densidad (Tabla 7) contenido en un embudo de separación. Los minerales de baja densidad flotan y estos corresponden a la fracción liviana, por su parte en el fondo del embudo se acumulan los minerales de alta densidad o fracción pesada (Figura 2b). Posteriormente es abierta la llave del embudo permitiendo que la fracción pesada salga y es recogida, para luego ser lavada con reactivos como tetracloruro de carbono, benceno, alcohol etílico o acetona para remover los líquidos de alta densidad (Mange y Maurer, 1992).



**Figura 2.** Separación por gravedad. (a) Sistema hidrodinámico. (b) Montaje del equipo para la separación de minerales pesados por líquido de alta densidad.

La separación de minerales pesados a través del uso de bromoformo, es sencilla, rápida y permite el procesamiento de varias muestras de forma simultánea. Sin embargo tiene como desventajas, ser muy costoso, poco práctico debido a las prevenciones que se requieren por el riesgo de contaminación del reactivo y las necesarias por quien opera el sistema, ya que el bromoformo es una sustancia muy tóxica (Parales, 2009).

**Tabla 7.** Líquidos de alta densidad comúnmente usados para la separación y concentración de minerales pesados.

Líquidos de alta densidad	Densidad a 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )
Bromoformo	2,89
Tetrabrometano (tetrabromuro de acetileno)	2,96
Ioduro de metileno (diiodometano)	3,32
Solución de Clerici (malonato de talio con formiato)	4,24

Tomado de Mange y Maurer (1992)

## 2.2. ANTECEDENTES

A continuación se presenta una compilación de estudios realizados tanto al nivel nacional como internacional, relacionados con el proyecto de investigación los cuales aportan valiosa información para el fundamento y justificación del presente trabajo.

### 2.2.1. Antecedentes internacionales

**Bernstein *et al.* (2007)** estudiaron los depósitos de ilmenitas ricas en titanio (Ti), en las arenas de playa alrededor de la ciudad de Chavara, al suroeste de la India, con el fin de determinar el origen de estos depósitos, ya que los autores señalan que el porcentaje en peso de  $TiO_2$  de las ilmenitas de esta localidad a menudo están por encima del 60%. Fueron analizadas 22 muestras tomadas a lo largo de 800 Km de línea de costa y los minerales pesados fueron separados mediante bromoformo, estos posteriormente fueron analizados con microscopía electrónica de barrido (MEB). Los resultados indican que la fracción de minerales pesados tienen un porcentaje entre 1 y 38% en el sedimento y que está dominada por ilmenita, seguida de sillimanita y cianita. La ilmenita tiene una alta concentración de MgO y baja de MnO. Finalmente, los autores concluyen que las ilmenitas ricas en Ti provienen de un cinturón de codalita de alto grado.

**Ergin *et al.* (2007)** estudiaron la distribución granulométrica de sedimentos provenientes de 22 playas, así como la composición mineralógica y química de la fracción de minerales pesados, en los Golfos de Antalya y Finike, al este del Mar Mediterráneo. Los datos obtenidos sugieren que la fracción de arena media es dominante en la mayoría de las playas; además, esta fracción fue utilizada para la separación de minerales livianos y pesados mediante el uso de bromoformo. Los minerales pesados translúcidos fueron montados en secciones finas y observados con microscopio de luz polarizada, mientras que los minerales pesados opacos en secciones pulidas. Los análisis químicos fueron realizados mediante espectrometría de masa con plasma generado por inducción, además los análisis de (Ca, Fe, Cr, Ni, Zn,



Ba y Co) por la técnica de activación de neutrones en ocho (8) muestras con diferentes concentraciones de minerales pesados. Los autores concluyen que el contenido de minerales pesados en el sedimento varía entre 0,1 y 86%, siendo esta fracción dominada por minerales opacos (14-58% magnetita, cromita y hematita), piroxenos (8-65% augita), anfíboles (3-15% tremolita-actinolita), epidota (3-25%), granates (2-9% piropero y almandino) y micas (3-20% biotita, moscovita y clorita), que en conjunto con las concentraciones significativas de elementos como Fe (18,40%), Cr (10,00%) y Ti (1,32%) y sus correlaciones, indican un origen ultramáfico, posiblemente derivada de las napas ofiolíticas Tekirova-Antalya.

**Yang et al. (2009)** estudian la composición de los minerales pesados en 17 muestras de sedimentos del Changjiang (Río Yangtze) con el fin de establecer su procedencia. El tamaño de grano de los sedimentos indicó que la fracción de arena muy fina (63-125  $\mu\text{m}$ ) estaba enriquecida en minerales pesados y estos fueron identificados con un microscopio binocular con luz incidente. Por otro lado los granos de magnetita son separados de la fracción de minerales pesados utilizando una gran barra magnética para someterlos al análisis químico mediante microsonda electrónica. Los resultados obtenidos de los diferentes análisis indican que la fracción de minerales pesados se caracteriza por óxidos de Fe-Ti, anfíbol cálcico, epidota, granate, biotita, circón, andalucita, apatito, clorita, cianita y hiperstena, que presentan grandes variaciones entre los diferentes afluentes y la corriente principal. El análisis de la magnetita, indican que la mayoría de los granos son homogéneos y de composición química estequiométrica. Los diagramas de discriminación  $\text{TiO}_2 + \text{V}_2\text{O}_3$  contra  $\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)$  sugiere que la mayor parte de los granos de magnetita provienen de rocas félsicas plutónicas /volcánicas y metamórficas.

**Schmidt Mumm et al. (2013)** realizaron un estudio de los componentes de la fracción magnética (óxidos de Fe) en muestras de regolito, como posible medio de muestreo para la exploración geoquímica de mineralizaciones metálicas. Colectaron un total de

21 muestras en las laderas de Hillside al sur de Australia. Todas las muestras fueron secadas en un horno a 105 °C y luego fueron pasadas a través de un tamiz de nylon, para eliminar los componentes >2 mm. Finalmente la extracción de minerales magnéticos fue de manera manual utilizando un imán de tierras raras (Nd). Realizaron análisis mineralógicos mediante difracción de rayos X, morfológicos mediante microscopía electrónica de barrido y químicos (Si, Mg, Ca, Al, K, Fe, Ag, Cd, Sc, Cr, Ba, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Mo, Ta, V, Bi, As, Sb, In, Se, Te y tierras raras) mediante un espectrómetro de masas acoplado a plasma (ICP-MS). Los resultados obtenidos indican que la fracción magnética está constituida por maghemita (25-35%) y hematita (10-40%) con accesorio de rutilo (1-5%), illita (1-15%) y ankerita (<5%), que los granos en su mayoría tienen un diámetro menor a 1mm, cristales euhedrales de maghemita e identificación de cristales de cuarzo revestidos y cementados por maghemita. Los análisis químicos revelaron elevadas concentraciones de elementos traza (U, Ta, REE total, Ba, Cr, Mn, Cu, Bi, V, Sb, Zn). Como conclusión los autores establecen un elevado potencial a la fracción magnética como material de muestreo en la exploración geoquímica, por ser especialmente susceptibles a la acumulación de elementos de tierras raras.

### **2.2.2. Antecedentes nacionales**

**Figueredo (1984)** realizó un estudio sedimentológico y geoquímico de muestras de sedimentos fluviales (limos y resistatos), provenientes de las principales hoyas hidrográficas en la región septentrional del Estado Bolívar con fines de prospección geoquímica regional. El análisis textural se llevó a cabo mediante un estereomicroscopio, el mineralógico por difracción de rayos X y los análisis químicos por las técnicas de espectrometría de absorción atómica y fluorescencia de rayos X para (Si, Al, Fe, Mn, Ti, Na, K, Mg, Ca, Cu, Zn, Zr, Nb, Sr, Au, Hf). Los resultados indican que los minerales livianos se concentran en la fracción de arena media-fina mostrando cierto grado de inmadurez textural y la fase mineralógica en mayor

proporción es cuarzo. Por otra parte, los resistatos pesados se concentraron en la fracción de arena fina y muy fina, los granos presentan morfología subangulosa-angulosa y las fases mineralógicas predominantes son la ilmenita y el ilmenorutilo y en menor proporción circón. Además, identificó Fe, Ti, Mn y Zr como elementos mayoritarios y Hf, Zn, Cr y Nb como elementos trazas asociados.

**Torres (1984)** realizó un estudio granulométrico, textural, mineralógico y químico a muestras de preconcentrados de batea tomadas en la hoya hidrográfica del Río Paragua en el Estado Bolívar. Los resultados indican que los minerales livianos están presentes en mayor proporción en la fracción de arena media, están conformados principalmente por cuarzo anguloso a subanguloso y moderadamente escogidos. Por su parte los resistatos pesados corresponden a la fracción de arena fina y constituida por una ilmenita alterada (ilmenorutilo o pseudorutilo) de textura angulosa y subangulosa y además en menor proporción circón, rutilo y anatasa en los tramos medio y alto del río.

**Rodríguez (1984)** estudia las características mineralógica y química de los diferentes resistatos pesados presentes en la cuenca del río Paragua. El autor concluye que los minerales pesados están concentrados en las clases de arena fina y muy fina, donde pudieron identificar, en función de la separación magnética, los siguientes minerales: en la fracción 0,2 y 0,4 A, una variedad de ilmenorutilo con alto contenido de Fe, en la fracción ligeramente magnética a no magnética (0,8 y 1,2 A) contiene al mineral circón (mayoritario) con presencia de Hf y como accesorios rutilo, anatasa, gahnita y una variedad de ilmenita magnesiana.

**Cisneros et al. (1987)** realizaron la separación magnética de 14 muestras de concentrado de batea de los sedimentos de fondo del río Villacoa, Estado Bolívar. Sus resultados indican que la fracción magnética está constituida por ilmenita en mayor proporción, seguido por ilmenorutilo y pseudorutilo y en menor proporción hematita,

magnetita y anfíbol, por otra parte, la fracción no magnética está dominada por el circón en su mayoría y en menor proporción monacita. Además identifica la presencia de coltan.

**Menéndez (1992)** evalúa el uso de fracciones magnéticas y no magnéticas de minerales pesados recolectados entre los ríos Paragua, Carún y Antabará en el Estado Bolívar, estableciendo que estos minerales están constituido básicamente por ilmenita, ilmenorutilo y circón. Además realizó análisis químicos mediante fluorescencia de rayos X determinando la presencia de Ti, Fe, Zn, Zr, Y, Nb y Mn en las fracciones magnéticas, mientras la fracción no magnética contiene Sn, U, Th, La, Hf, Sb, P, Al y Pb. El autor concluye que el método de separación magnética en muestras de minerales pesados es útil para detectar anomalías, no detectables sin dicha separación.

**Moreno (1996)** determinó la granulometría y mineralogía de los minerales pesados presente en los sedimentos de los ríos que drenan las rocas del Complejo Cuchivero en los Estados Amazonas y Bolívar. Los resultados indican que la concentración de minerales pesados en el sedimento, oscila entre 0,60 y 6,41% y además que el 90% de los minerales pesados predominan en la fracción de arena fina a muy fina (0,250 - 0,125 mm). El análisis mineralógico mediante lupa estereoscópica y difracción de rayos X reveló que las fases mineralógicas presentes son las siguientes: magnetita, hematita, ilmenita, pseudorutilo, hastingsita, monacita, rutilo y circón siendo la ilmenita y el circón los constituyentes mayoritarios.

**Jacotte (1996)** llevó a cabo un estudio mineralógico mediante difracción de rayos X y análisis químico mediante espectrometría de emisión atómica, a muestras de sedimentos de fondo de los ríos Autana, Cataniapo, Maniapure, Suapure, Sipapo, Villacoa, Cuaó y Pavoni que drenan las rocas del Complejo Cuchivero y Provincia de Roraima. Los resultados revelaron que el cuarzo, circón, ilmenita, rutilo, gibbsita, caolinita, brookita, magnetita y diáspora, son los minerales más comunes en estos

sedimentos. El análisis químico para los elementos Si, Al, Fe, Zr, Ti, Th, Y, Nb indica que el silicio es el elemento en mayor concentración dentro de la zona estudiada y se debe a la gran abundancia de cuarzo, por otra parte. los elementos Ti y Fe están asociados a los minerales pesados presentes (ilmenita, hematita, magnetita y rutilo) y con respecto a los traza, las concentraciones de Nb e Y muestran una alta correlación positiva, mientras que el Th no presenta ninguna correlación con algunas de las especies estudiadas.

**Quevedo (2009)** estudió la composición mineralógica y química de minerales pesados provenientes de la cuenca del río Aro, con el fin de determinar las fases minerales que contengan concentraciones apreciables de uranio (U), torio (Th), lantano (La) y cerio (Ce), así como su distribución dentro de los granos minerales que lo contienen. El análisis de las muestras se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido con acoplamiento de un espectrómetro de dispersión de rayos X (MEB-EDX) y difracción de rayos X (DRX). De los resultados obtenidos concluye que el concentrado de minerales pesados está dominado por ilmenita, monacita, circón y hematita, así como la presencia de torita. La monacita es el mineral que aporta las altas concentraciones de Th, La y Ce, y los elementos están distribuidos de manera homogénea dentro los granos minerales. El U no fue detectado de manera directa en ninguna fase mineral, solo se detectó en inclusiones dentro de granos de circón.

**Gamero y Revertí (2011)** realizaron un estudio geoquímico y mineralógico de minerales pesados a muestras de concentrado de batea de los principales afluentes de la zona noroccidental del Estado Bolívar (río Aro, Pao, Cuchivero, Guaniamo, Suapure, Parguaza y Cataniapo) con el propósito de elaborar mapas geoquímicos. Los análisis químicos de las cuarenta y siete (47) muestras fueron mediante la técnica de espectrometría de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado, donde determinaron la concentración de elementos como (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Mn, Y, La, Ce, Nd, U, Th, Zr, Hf, Nb y Cr), además de la identificación de fases

mineralógicas mediante Difracción de Rayos X. En el estudio detectan la presencia de dos zonas anómalas [zona A y zona B (BI y BII)]. La zona B, esta ubicada desde la parte alta del río Guaniamo hasta la desembocadura del río Suapure en el río Orinoco y alcanza los ríos Parguaza-Cataniapo. La cuenca del río Suapure presentan anomalías de Zr, Hf, Th, Mn y altas concentraciones de Nb, Ti y Fe, compuesta por las fases minerales (ilmenita, circón, hematita y magnetita) e identificada como la zona BI. La cuenca alto Guaniamo que representa la zona BII muestra anomalías en Y, La, Ce, Nd, Th, U, P y altas concentraciones de Zr, Hf, Nb, Ti, y Fe, las fases minerales identificadas son monacita e ilmenita. Por último la cuenca del río Aro (zona A) contiene anomalías en los siguientes elementos Cr, Y, La, Ce, Nd, Th, U, P y altas concentraciones de Fe y Ti, donde los análisis mineralógicos arrojaron como posibles fases mineralógicas ilmenita, magnetita, cromita, hematita e ilmenorutilo. En general este estudio permitió establecer la presencia de dos posibles megaprovincias geoquímicas.

## **2.3. MARCO GEOLÓGICO**

El área de estudio está localizada dentro del Escudo de Guayana, específicamente en las Provincias de Cuchivero y Roraima. En esta sección se mencionan las características litológicas más relevantes del Escudo de Guayana y de las provincias geológicas que lo integran, a partir de información tomada del González de Juana et al. (1980) y del Léxico Estratigráfico de Venezuela (PDVSA-Intevep, 1997).

El Escudo de Guayana ubicado al sur del río Orinoco, forma parte del cratón Amazónico del Precámbrico de Sur-América, que se adentra en Colombia, Brasil, Guyana, Surinam y Guayana Francesa. En la parte venezolana ocupa alrededor del 50% de la superficie del territorio nacional, con rocas antiguas de hasta 3,41 Ga (granulitas y charnockitas del Complejo de Imataca) y tan jóvenes como 0,71 Ga (kimberlitas eclogitas de Guaniamo) de diversas litologías, alteradas en mayor o menor escala durante una serie de episodios geotectónicos mayores (González de Juana et al., 1980).

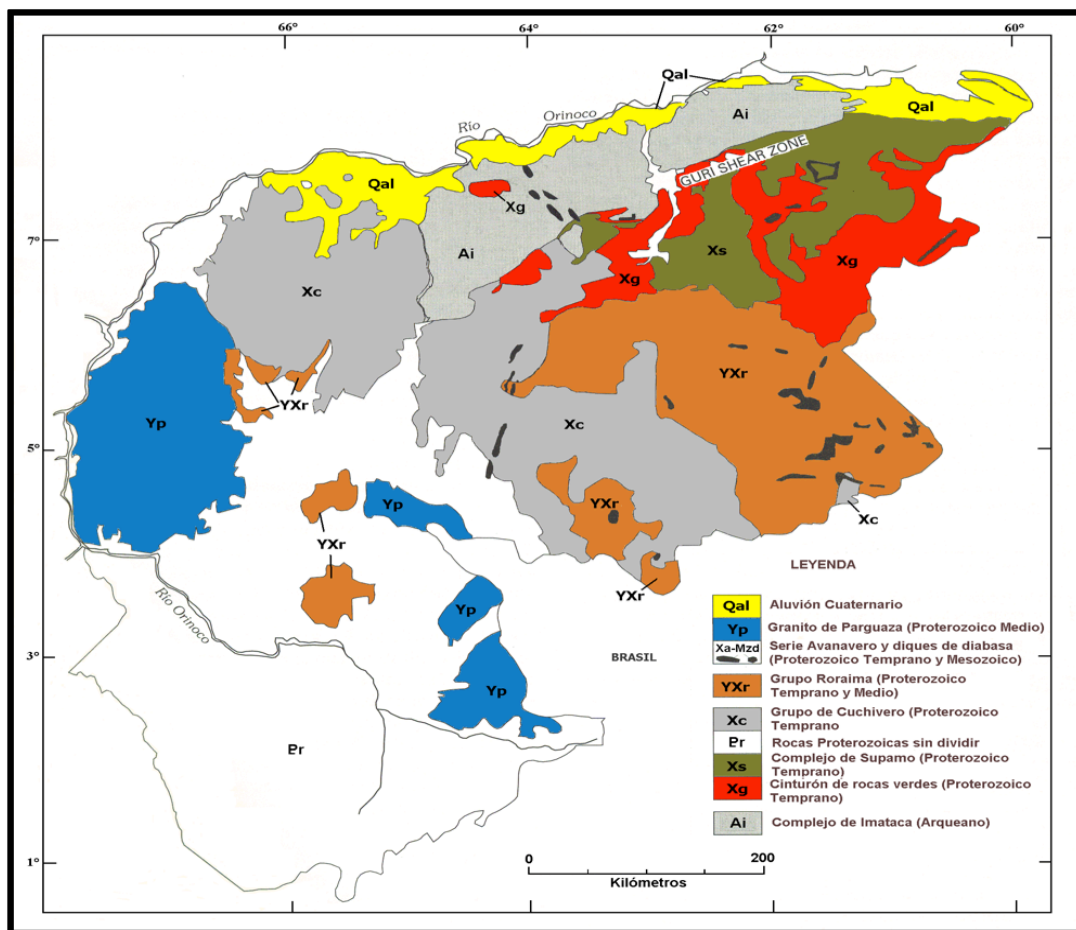
Sobre la base de caracteres petrológicos y tectónicos, el escudo ha sido dividido en Venezuela en cuatro (4) provincias geológicas (Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima) (Figura 3). Estas provincias se diferencian en sus direcciones estructurales, estilos de deformación tectónica, edades y asociaciones litológicas y metalogénicas (González de Juana et al., 1980).

### **2.3.1. Provincia geológica de Cuchivero**

Esta provincia geológica ocupa la parte occidental del Escudo de Guayana, tiene su mayor desarrollo específicamente en la parte occidental del Estado Bolívar, al oeste del río Caura. Mendoza (1974) redefine la provincia, donde usa el nombre de Grupo en vez de Asociación e introdujo el nombre de Supergrupo Cedeño para incluir dos conjuntos de rocas ígneas ácidas; el Grupo Cuchivero (más antiguo) y el Grupo Suapure (más joven), constituido este último por los granitos de Pijigüaos y Parguaza.

- **Supergrupo Cedeño**

Mendoza (1974) lo define como una unidad litoestratigráfica volcánico-plutónica ácida, que comprende los Grupos Cuchivero y Suapure, separados entre sí por metabasitas. El Supergrupo Cedeño se extiende en dirección, E-O desde las proximidades del río Caura hasta Puerto Páez y en dirección N-S desde el río Orinoco, en su tramo NE hasta el río Ventuari, abarcando todo el municipio Cedeño del Estado Bolívar. Regionalmente el Supergrupo Cedeño puede asumirse comprendido entre  $1750 \pm 50$  y  $2200 \pm 200$  Ma.



**Figura 3.** Provincias geológicas del Escudo de Guayana Venezolano. Tomado de Sidder y Mendoza (1995), editada por Jiménez (2004).



- **Grupo Cuchivero**

McCandless (1965) designa el nombre de Serie Ígnea de Cuchivero a un conjunto de rocas predominantemente ígneas, intrusivas y extrusivas. Seguido, Ríos y Mendoza (1972) y Mendoza (1974) restringe la Asociación Ígnea de Cuchivero a las siguientes secuencias (de más antiguo a más reciente): Formación Caicara, Granito de Guaniamito, Granito de Santa Rosalía y Leucogranito de San Pedro, basado en edades absolutas y de formación tectónica.

Formación Caicara: Ríos (1972) designa con este nombre a la secuencia de rocas extrusivas ácidas que afloran en la región noroccidental del estado Bolívar. Está constituida por un conjunto de rocas volcánicas predominantemente ácidas, tales como riolitas y riolitas porfídicas y porfíricas con matriz de grano fino a medio, seguidas en orden de abundancias por riolitas y dacitas porfídicas. Además, intercalaciones de rocas muy fina, afaníticas, muy ricas en cuarzo que probablemente representan tobas ignimbríticas. La Formación Caicara está intrusionada por el granito de San Pedro y en contacto de falla con los granitos de Santa Rosalía y Parguaza. Hurley et al. (1973 y 1977) determinaron una edad Rb-Sr en roca total de 1750 Ma, a partir de tres muestras de la unidad.

Granito de Santa Rosalía: este nombre es introducido por Ríos (1972) para designar a una unidad de rocas de composición granítica, expuestas extensamente al este y al oeste del río Cuchivero y Mendoza (1974) la describe en el área del río Suapure. El granito de Santa Rosalía modalmente es un granito típico, extremadamente uniforme en composición tanto mineralógica como química, que presenta cambios generales en la granularidad en las diferentes regiones, constituido esencialmente por; cuarzo (35%), biotita como principal componente máfico (5%) y cantidades menores de hornablenda, epidota, clorita y opacos. El granito de Santa Rosalía se caracteriza por contenidos relativamente altos de SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O, Rb-Sr y bajos contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Ca,

Sr, K-Rb. En muestras provenientes del área del río Suapure, Hurley et al. (1977) obtuvo una edad, por isócrona de Rb-Sr en roca total, de 1.875 Ma.

Granito de Guaniamito: la litología predominante consiste en roca ácida intrusiva de composición granítica, con textura gnéisica, ricas en componentes félsicos, de grano medio a grueso, holocristalinas, porfídica, que hacia las zonas de contacto con las rocas volcánicas muestran indicios de metasomatismo y de deformación mecánica. La roca está constituida por cuarzo (10-30%), feldespato (25-65%), biotita (1-8%) y menores cantidades de moscovita, sericita y como accesorios comunes se encuentran esfena, epidota, hornablenda, titanita, zircón y magnetita. Olmeta (1968) obtuvo, por K-Ar en roca total,  $1700 \pm 80$  Ma para este granito.

Granito de San Pedro: Mendoza (1974) propone este nombre para designar un granito leucocrático que aflora en las colinas de San Pedro, aproximadamente a 1 Km al oeste del río Suapure, en el área de Los Pijigüaos, Estado Bolívar. El leucogranito de San Pedro es una roca de grano fino, aplítica, hipautomórfica granular a xenomórfica, protoclastica, compuesta por: cuarzo (25%), feldespato perfitico (40%), albita (27%), y constituyentes menores (biotita, clorita, epidota, apatito, titanita y circón).

- **Grupo Suapure**

Mendoza (1974) propuso este nombre para designar a las rocas ígneas ácidas expuestas desde Pijigüaos hasta Puerto Páez (E-O), y desde Pijigüaos hasta el río Ventuari (N-S), sobre un área de  $300 \text{ Km}^2$  y que este grupo lo conforman, el Granito de Pijigüaos y el Granito del Parguaza.

Granito de Pijigüaos: definido como una roca leucocrática, masiva, de grano fino a medio, de color rosado salmón, sin cataclasis y sin desarrollo de textura gráfica. Consiste esencialmente de feldespato potásico (30-35%), plagioclasas albítica (25-30%), cuarzo en glomérulos (25-30%) y biotita marón (1-3%), apatito (0-4%) y opacos

(1-3%) como accesorios epidota y clorita. Este granito aflora en la mitad inferior del Domo de Los Pijigüaos, en contacto no transicional con el Granito Rapakivi de Parguaza, además, se extiende por las partes bajas de los ríos Parguaza, Villacoa y Ventuari.

Granito Rapakivi de Parguaza: constituye un extenso batolito de composición homogénea que ocupa unos 30.000 Km<sup>2</sup>, ubicado en el noroeste de Guayana y representa una de las mas grandes intrusiones graníticas anorogénicas del mundo. Dicho granito parece representar un gran evento termal de extensión continental denominado parguazense. Este granito es masivo sin indicios de metamorfismo o tectonismo sobre impuesto, de grano muy grueso, inequigranular con textura rapakivi y constituido por altos contenido de feldespato potásico (40%), oligoclasa (25%), cuarzo (20%), hornablenda (8%), biotita (7%) y cantidades menores de clinopiroxeno, fluorita, apatito y opacos (magnetita e ilmenita). Los fenocristales de feldespato muestran zonación múltiple. Químicamente este granito se caracteriza por contenidos altos de FeO, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, Rb, Sr, Zr, Ni y Co y valores bajos a moderados de Na<sub>2</sub>O, MgO y K-Rb. La edad radiométrica por el método Rb-Sr en roca total isócrona de 1.531 Ma según Gaudette et al. (1977).

### **2.3.2. Provincia geológica de Roraima**

La provincia geológica de Roraima se encuentra desde los límites del Parque Nacional Canaima, hacia el Km 95 cerca de la Piedra de la Virgen hasta Santa Elena de Uairén en dirección N-S y desde el río Venamo hasta las proximidades del río Paragua. Esta provincia está compuesta por rocas del Grupo Roraima con diabasas y rocas gabronoríticas cuarcíferas a dioríticas cuarcíferas. En su área tipo en el cerro Roraima, estos sedimentos han sido agrupados por Reid (1974) bajo el nombre de Grupo Roraima. Los sedimentos casi horizontales y en posiciones normales son

principalmente cuarzo arenitas con menores proporciones de areniscas feldespáticas, lutitas y tobas volcánicas silicificadas.

Las rocas del Roraima solo registran metamorfismo de contacto (andalucita) con granitos intrusivos, post-1450 Ma y rocas máficas de la Asociación Avanavero, aunque Urbani (1977) postuló un metamorfismo de carga (pirofilitas) en algunas localidades del Alto Caura, posiblemente donde el Grupo Roraima alcanzo otros 3.000 m adicionales de sedimentos actualmente erosionados.

## **2.4. ÁREA DE ESTUDIO**

A continuación son descritos algunos aspectos relacionados con la zona de estudio (características geomorfológicas, climáticas e hidrográficas), las cuales fueron tomadas del boletín del M.A.R.N.R (1983) citado en Moreno (1996).

### **2.4.1. Ubicación**

La zona de estudio está ubicada al noroeste del Estado Bolívar (municipio Cedeño) y Amazonas (municipios Atures y Autana); entre los paralelos 4°00' N y 8°00' N y los meridianos 66°00' O y 68°00' O (figura 4), la misma cubre un área aproximada de 42.417 Km<sup>2</sup>, y presenta diversas cuencas hidrográficas en toda su extensión, Específicamente las cuencas de los ríos Sipapo, Autana y Cuao, en el Estado Amazonas y Ore, Villacoa, Simonera, Suapure y Maniapure en el Estado Bolívar. La principal vía de acceso a la zona de estudio la constituye la carretera nacional Caicara-Puerto Ayacucho, sin embargo, la navegación por el río Orinoco es el medio de acceso más importante a los ríos Cuao, Autana y Sipapo.

### **2.4.2. Geomorfología**

La región de estudio está comprendida dentro del Escudo Guayanés; la misma presenta grandes variabilidades en el relieve, donde pueden reconocerse grandes paisajes como los de sabanas, colinas, montañas, tepuyes y valles. Las superficies elevadas presentan alturas superiores a los 500 m con pendientes pronunciadas, constituidas por los macizos graníticos y los tepuyes. Estos ocupan extensos sectores, iniciándose en el extremo noroccidental del Amazonas, dirigiéndose hacia el sur y conformando las nacientes de aguas de los ríos Cuao, Autana y Sipapo. Las zonas bajas están representadas por llanuras y peniplanicies de relieve plano u ondulado que ocupan una extensa superficie entre el macizo de Cuao.

### **2.4.1. Hidrografía**

Los ríos estudiados presentan altos caudales que oscilan entre los 25 y 700 m<sup>3</sup>/s, de amplias extensiones, cuya longitud varia entre 90 y 190 Km, profundidades promedio entre 1-4 m y 4-7 m de ancho. Además dichos ríos presentan un patrón de drenaje subparalelo con dirección noroeste hasta desembocar en el rio Orinoco.

### **2.4.2. Suelo**

La región es caracteriza por poseer suelos fuertemente lixiviados y alterados, en los cuales debido a la edad y condiciones climáticas imperantes de la zona han provocado el desarrollo de ferralitización y la formación de arcillas, principalmente caolinita, óxidos de hierro y aluminio hidratado.

### **2.4.1. Clima**

El área de estudio corresponde a climas tipo lluvioso, monzónico y tropical de sabana. Básicamente caracterizado por presentar dos estaciones, una seca y otra de lluvia con altos valores de precipitación, temperatura y humedad. La precipitación promedio supera los 1.200 mm hasta 2.400 mm anuales y las temperaturas depende considerablemente de la altura, desde las más cálidas de las tierras bajas, con medias anuales de 30 a 32 °C, hasta las más frías de las mesetas más elevadas, solo un poco mayores a 10 °C. En general el promedio oscila entre 26 a 27 °C, con máximas de 30 °C y mínimas de 24 °C.

### **2.4.1. Vegetación**

Gran parte de la zona de estudio está cubierta por inmensas selvas, por lo que la vegetación debido al alto índice de pluviosidad, es la típica selvática. De igual forma hay sabanas de suelos secos y sabanas de suelos húmedos, así como vegetación arbustiva y vegetación litófila asociada a las cumbres de los tepuyes.



Figura 4. Mapa de localización de la zona de estudio.

### **3. MARCO METODOLÓGICO**

En este capítulo es descrita la metodología experimental desarrollada durante la ejecución de este proyecto, con el fin de cumplir los objetivos planteados. Esta sección consta de distintas etapas: una etapa de trabajo de campo (recolección de muestras), una etapa de trabajo de laboratorio (tratamiento físico y químico de las muestras) y una etapa de trabajo de oficina (tratamiento estadístico de los resultados).

#### **3.1. ETAPA DE CAMPO**

La etapa de campo fue llevada a cabo en abril de 1994, donde fue realizado el muestreo de sedimentos y preconcentrado de batea en los ríos de estudio, bajo las condiciones idóneas para la colección de muestras (baja pluviosidad).

Según Moreno (1996) las muestras fueron recolectadas en la parte baja de la cuenca de los ríos Maniapure, Suapure, Simonera, Villacoa, Ore, Cuaio, Autana y Sipapo (figura 5), aproximadamente a 5 Km de la desembocadura, esto por facilidad de acceso, el cual fue por vía terrestre a excepción de los ríos Autana y Sipapo, a los cuales fue necesario acceder por vía fluvial. En cada punto de muestreo fue realizado la toma de una muestra representativa, que fue producto de la mezcla de varias muestras tomadas a lo largo de una transecta perpendicular al canal del río, incluyendo así los sedimentos cercanos a los márgenes y de la parte central del canal. Además, en cada punto de muestreo fue realizada la preconcentración de los sedimentos pesados empleando el método de la batea, el cual consiste en la exclusión del sedimento grueso (>2mm) con la ayuda de una suruca. En cada río fueron tomados entre 500 y 2000 g de este concentrado, que posteriormente fueron almacenados en bolsas plásticas previamente rotuladas hasta su traslado al laboratorio.





Figura 5. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo dentro de la zona de estudio.

## **3.2. ETAPA DE LABORATORIO**

El trabajo de laboratorio estuvo comprendido por varias etapas, entre ellas el tratamiento físico, el análisis químico y mineralógico de las muestras, el tratamiento estadístico de los datos obtenidos y la elaboración de los mapas, cada una de estas etapas son explicadas a continuación:

### **3.2.1. Tratamiento físico**

El tratamiento inicial (secado, separación granulométrica y separación de minerales pesados) de las muestras fue realizado por Moreno (1996), con el fin de llevar a cabo el estudio granulométrico y mineralógico de las mismas.

Las ocho (8) muestras de preconcentrado de batea fueron secadas al aire libre por un período de 72 horas y luego fueron disgregadas manualmente. No requirió que fueran tratadas con soluciones ácidas, ya que presentaban un aspecto limpio, que indicaba no tener cantidades significativas de limo o materia orgánica.

El fraccionamiento del concentrado de batea fue realizado con un juego de tamices de acero de 10 (2,00 mm), 18 (1,00 mm), 35 (0,50 mm), 60 (0,25 mm), 120 (0,125 mm) y 230 (0,063 mm) mallas, mediante un vibrador mecánico de tamices, tomando alrededor de 300 y 500 g de muestra. Cada fracción obtenida fue pesada con el uso de una balanza analítica, para su cuantificación.

La separación de los minerales pesados en cada una de las fracciones granulométrica fue llevada a cabo mediante la separación por gravedad con líquido denso (bromoformo,  $\rho = 2,89 \text{ g/cm}^3$ ). Para esto fue utilizado un embudo de separación de 250 ml, donde fue colocada la muestra, (específicamente las fracciones de 35 hasta 230 mallas) y llenado con bromoformo, luego agitando suavemente y dejando en reposo hasta separarse en dos fases. Los minerales con densidades mayores a la del

bromoformo decantaron al fondo, mientras que los livianos permanecieron suspendidos en el líquido. Una vez definidas las dos fases, fue abierta la llave dejando pasar la fracción pesada y recolectada en un beaker de vidrio de 250 ml. Posteriormente, las fracciones fueron dejadas en la campana extractora para que secan durante dos días y evitar la presencia de bromoformo en las muestras. Posteriormente cada fracción es pesada y realizada la cuantificación de los minerales pesados y en base a esto, es establecida las fracciones a ser separadas por magnetismo.

Los minerales pesados pertenecientes a las fracciones arena media (35-60), fina (60-120) y muy fina (120-230), fueron separados según su naturaleza magnética con el separador isodinámico tipo FRANTZ (APÉNDICE A, figura A1 ). Las condiciones establecidas para el equipo fueron corriente de 0,4 y 0,8 Amperios, las cuales fueron definidas en base a la tabla de susceptibilidad magnética (tabla 5) y configuración de los ángulos de inclinación lateral (25 grados) y frontal (20 grados) (APÉNDICE A, tabla A1 ). Finalmente obtuvieron las siguientes fracciones:

- Fracción magnética (0,4 A)
- Fracción medianamente magnética (0,8 A)
- Fracción no magnética

### **3.2.2. Análisis químico**

Los análisis químicos de las cincuenta y cinco (55) muestras fueron realizados mediante la técnica de Espectrometría de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (ICP-AES) (APÉNDICE A, figura A2) para los elementos titanio (Ti), niobio (Nb) y circonio (Zr) y Espectrometría de Absorción Atómica (AAS) para hierro (Fe) y manganeso (Mn) (APÉNDICE A, figura A3).

Antes de realizar el análisis por medio de (ICP-AES) y (AAS) las muestras fueron sometidas a un proceso químico de digestión previo, ya que para realizar el análisis de

elementos presentes en muestras geológicas por medio de las técnicas antes mencionadas, estas deben ser llevadas a solución. Para esta investigación y previo a ensayos realizados, las muestras no-magnéticas fueran sometidas a fusión alcalina, siguiendo el procedimiento descrito por Liberatore (1993 y 1994) en el manual instrumental del ICP-AES de la Varian Australia Pt y Ltd. En lo que respecta a las muestras magnéticas y medianamente magnéticas fue mediante el método de digestión ácida total, establecido por la Environmental Protection Agency (EPA) para muestras de suelo rica en sílice. Ambos métodos fueron modificados y son descritos a continuación:

Primeramente cada fracción magnética, medianamente magnética y no-magnética fue cuarteada y homogenizada, obteniendo una alícuota de dos (2) g que luego fue pulverizada en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino.

- **No-magnéticas (fusión alcalina):** en crisoles de platino, fue añadido aproximadamente 1,00 g de metaborato de litio ( $\text{LiBO}_2$ ) y 0,10 g de la muestra pulverizada (1:10 muestra:fundente), seguido los crisoles fueron colocados en una mufla a 1000 °C por 30 minutos para la fusión. Una vez transcurrido el tiempo, fueron retirados de la mufla y colocados en un desecador hasta llegar a temperatura ambiente (figura 6). Posteriormente la perla formada en la fusión fue disuelta en un vaso precipitado con 20 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 20% v/v, con agitación constante, en una plancha de calentamiento con temperatura entre 40 y 60 °C. Finalmente las soluciones fueron filtradas y aforadas hasta 50 ml.
- **Magnéticas y medianamente magnéticas (digestión ácida total):** en beaker de teflón, fue colocado 0,10 g de la muestra pulverizada, consecutivamente fue añadido seis (6) ml de ácido clorhídrico (HCl) y dos (2) ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ambos ácidos concentrado en relación (3:1). Posteriormente los beaker fueron colocados en una plancha de calentamiento durante una (1) horas, para luego la incorporación de siete (7) ml de ácido fluorhídrico concentrado (HF),

dejando reaccionar durante cuatro (4) horas o hasta que la muestra estuviera totalmente disuelta (figura 7). Seguidamente los beaker les fue retirado la tapa para llevar a sequedad o eliminación de los ácidos, una vez evaporado los mismo, las muestras son regeneradas con tres (3) ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado, filtradas y enrazadas en un matraz de 50 ml.

Las soluciones son trasvasadas a un envase plástico previamente curado con  $\text{HNO}_3$  10% v/v e identificado con el nombre y características (fracción granulométrica y magnética) de la muestra. Finalmente, cada muestra es medida, según las concentraciones estimadas. Los resultados de las concentraciones son mostrados en el (APÉNDICE B, tablas B2, B3 y B4).



**Figura 6.** Perlas generadas por la fusión alcalina de las muestras no-magnéticas.



**Figura 7.** Proceso de digestión ácida total para las muestras magnéticas y medianamente magnéticas

### **3.2.3. Exactitud y precisión del método.**

Para comprobar la exactitud del método fueron analizados dos (2) materiales de referencia: Anortosita (AN-G.976) y Basalto (BR178) (APÉNDICE D, tabla D1). La precisión fue mediante el análisis por triplicado de varias muestras escogidas aleatoriamente con la finalidad de establecer la reproducibilidad y el grado de confianza de los métodos analíticos utilizados. Así mismo, dichas replicas permitieron calcular la media, desviación estándar y el coeficiente de variación de los datos obtenidos con el fin de evaluar la variabilidad de los mismos (APÉNDICE D, tablas D2 y D3).

### **3.2.4. Análisis mineralógico**

El análisis mineralógico fue realizado mediante la técnica de Difracción de Rayos X, para siete (7) muestras escogidas aleatoriamente, considerando fuesen analizada dos (2) muestras por cada fracción en función del magnetismo y que de estas una para algún río del Edo. Bolívar y otra del Edo. Amazonas. El montaje de la muestra dentro

del instrumental fue mediante el método del polvo, en el cual la muestra es pulverizada en un mortero de ágata hasta obtener un tamaño de grano muy fino y homogéneo, luego es esparcida en el portamuestra, para ser analizada en condiciones de rutina (APÉNDICE A, tabla A3).

### **3.2.5. Tratamiento estadístico**

El tratamiento estadístico aplicado a esta investigación fue mediante el empleo de EXCEL 2010, para lo cual realizar los histogramas de frecuencia, tablas y gráficos de correlación entre los elementos estudiados, que permitieron visualizar la distribución y tendencia que presentan los datos.

### **3.2.6. Elaboración de los mapas**

Los mapas de distribución de concentraciones para cada elemento analizado, fueron realizados mediante el programa ArcGis v.9.3, la base geológica de los mapas fue tomada del mapa de Venezuela 1:750.000 (2006) de la USGS. Todos los mapas de distribución de los elementos analizados son encontrados en el apéndice F.

## **4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

A continuación son presentados y discutidos los resultados obtenidos del análisis químico y mineralógico del sedimento pesado de los ríos Maniapure, Suapure, Simonera, Villacoa, Ore, Cuao, Autana y Sipapo, los cuales están divididos en diferentes fracciones en función del magnetismo y la granulometría.

### **4.1. ANÁLISIS MINERALÓGICO DE LOS MINERALES PESADOS**

Con el fin de identificar la mineralogía presente en las diferentes fracciones separadas por magnetismo, fue realizado un estudio mineralógico mediante Difracción de rayos X, en la cual la selección de las muestras fue en función del tamaño de grano y localidad. Los resultados obtenidos son mostrados en el APÉNDICE E y son discutidos a continuación:

Los difractogramas de las muestras magnética (0,4 A) indican que la composición de esta fracción corresponde principalmente a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) indiferentemente del tamaño de grano y la localidad (APÉNDICE E, figura E1 y E2). Moreno (1996) reporta en el estudio mineralógico con lupa binocular que todos los ríos estudiados presentan ilmenita como mineral mayoritario, concentrándose preferiblemente en las fracciones correspondiente arena media y fina, siendo los ríos del Estado Bolívar los que presentan mayor concentración de este mineral, en especial el río Simonera.

Por otra parte, para la fracción medianamente magnética (0,8 A) la composición mineralógica es más compleja, ya que está caracterizada por una diversidad de minerales, donde el difractograma correspondiente al río Maniapure (APÉNDICE E, Figura E3) reporta minerales tales como fosfatos de tierras raras, como la monacita [(Ce, La, Y, Th) $\text{PO}_4$ ] y la xenotima [(Y,Yb) $\text{PO}_4$ ]; además de anfíbol (hastingsita) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), en donde esta última fase mineral puede ser derivada de la alteración de la magnetita. En lo que respecta al difractograma del río Sipapo, (APÉNDICE E, Figura



E4) este reporta minerales como el pseudorutilo ( $\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$ ) e ilmenorutilo [ $\text{FeO}(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_5\text{TiO}_2$ ], donde ambas fases minerales son producto de la alteración de la ilmenita, proceso en el cual está implícito la oxidación de hierro ferroso a férrico, siendo el pseudorutilo el principal producto de ese proceso (Grey y Reid, 1975). De igual forma, el difractograma revela la presencia de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), aunque este mineral es no magnético, es encontrado en esta fracción debido que él puede contener en su estructura cristalina, ciertas cantidades de hierro ( $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ ) que le pueden conceder ciertas propiedades magnéticas. Moreno (1996) destaca la presencia del mineral hastingsita, sólo en los ríos ubicados en el estado Bolívar y la abundancia de dicho mineral decrece en dirección Norte-Sur en la zona y atribuye la diferencia mineralógica en ambas localidades, a que el proceso de meteorización en la zona de estudio es más intenso hacia la zona del Amazonas.

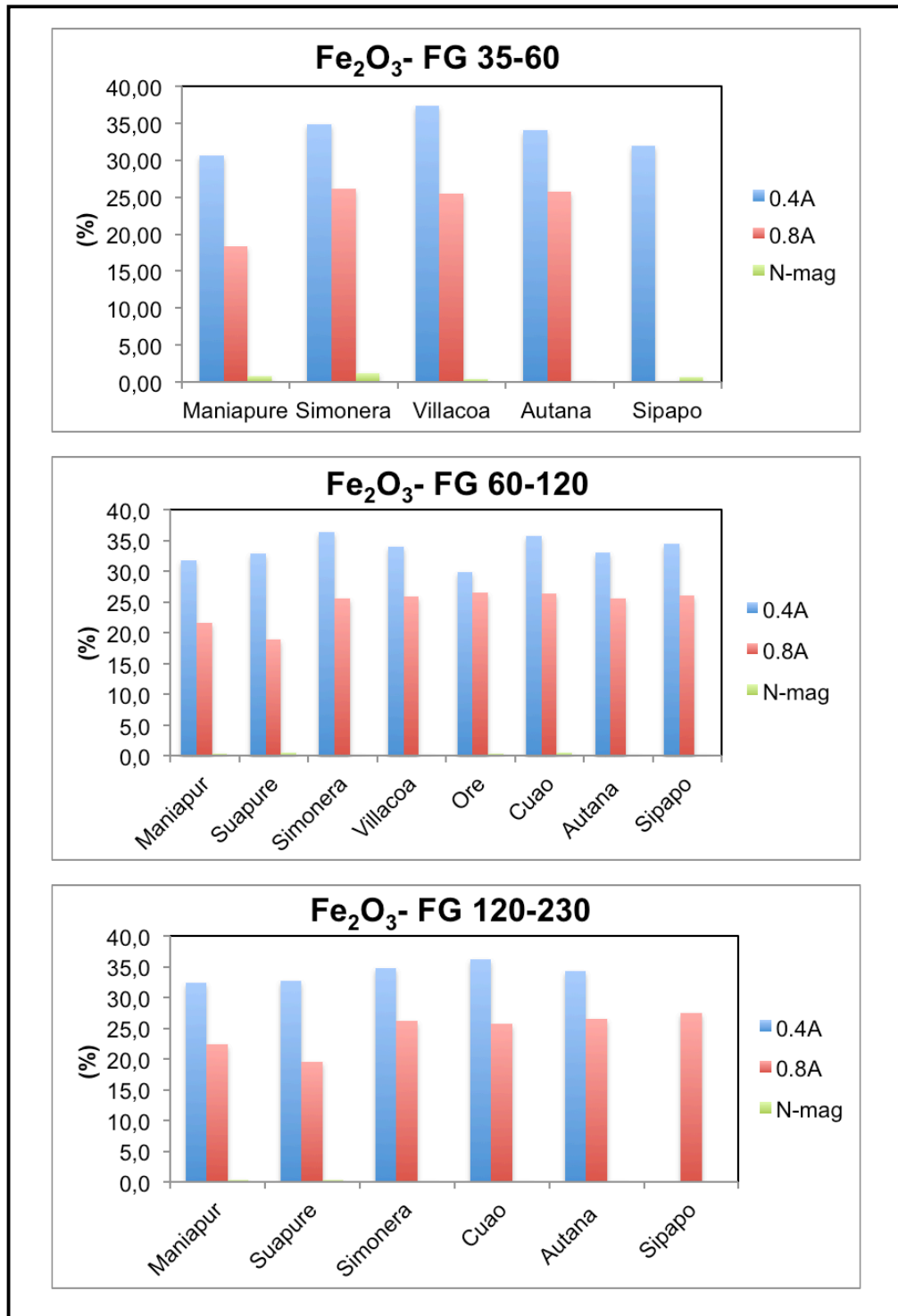
En cuanto a las muestras de la fracción no-magnéticas (APÉNDICE E, Figura E5, E6 y E7) puede decirse que tanto las muestras de los ríos de Amazonas como la de los ríos de Bolívar, están constituidas principalmente por la fase mineral circón [ $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$ ], ya que en los difractogramas estudiados, en las tres fracciones granulométricas (arena media, fina y muy fina) de dichas muestras, fue el único mineral reconocido. Además, los difractogramas no reflejan la presencia de otras fases minerales como rutilo y fluorita para la fracción no-magnética. Según los datos mineralógicos reportados por Moreno (1996) éstos indican la presencia de estos minerales en muy baja proporción ( $\ll 1\%$ ) en los ríos Autana, Sipapo, Maniapure y Suapure.

## 4.2. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MINERALES PESADOS

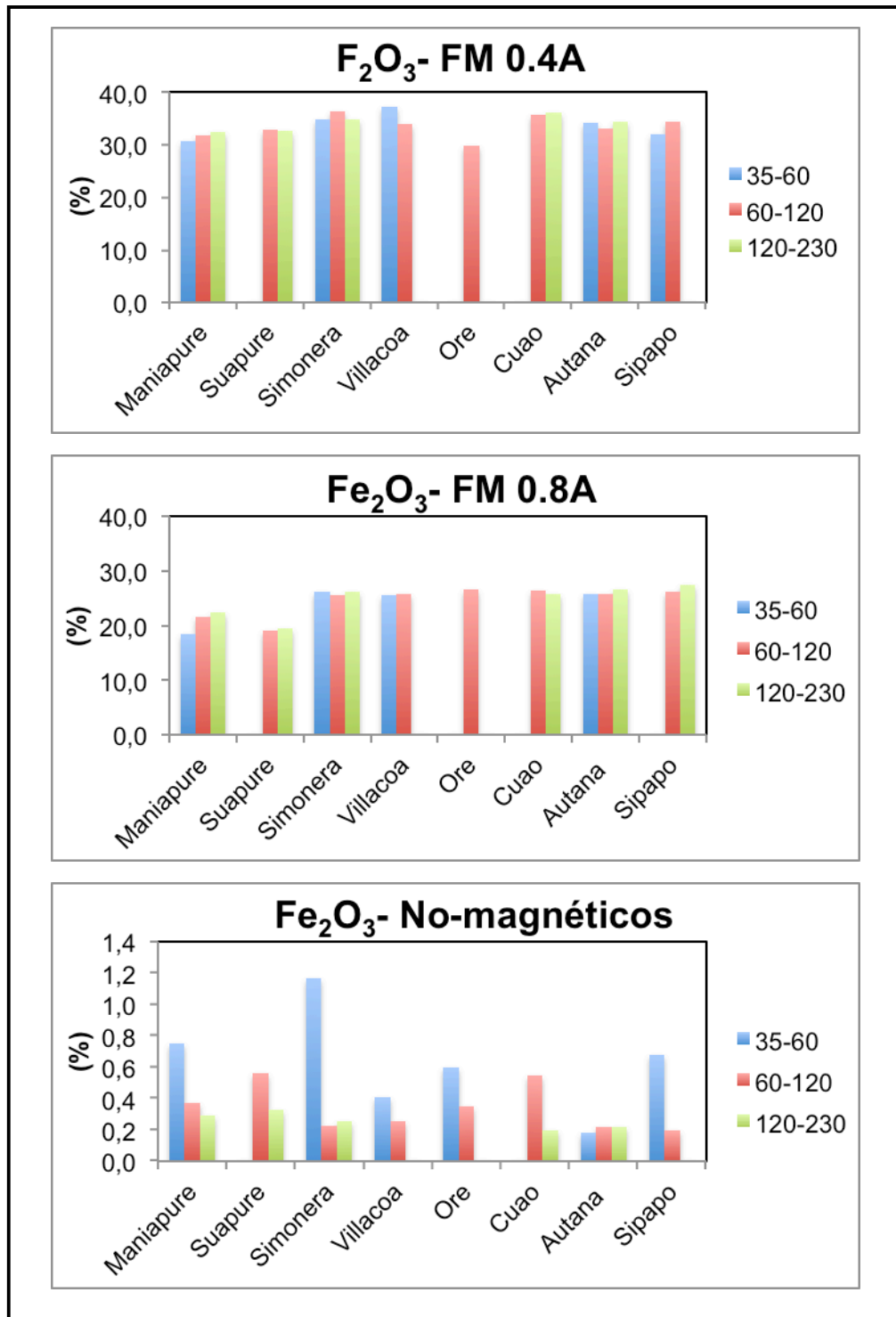
El objetivo de la presente investigación es determinar la concentración de los elementos mayoritarios y traza en los minerales pesados en función del magnetismo, el análisis fue realizado mediante (AAS) y (ICP-AES), para los elementos Fe, Mn, Ti y Nb en las fracciones magnéticas y medianamente magnéticas, mientras que para la fracción no-magnética fueron determinadas las concentraciones de Fe, Mn y Zr. Posteriormente el tratamiento de los datos consistió en evaluar la abundancia relativa de los elementos en función del tamaño de grano, magnetismo y localidad, además establecer correlaciones e indicar la posible fase mineralógica asociada a dichos elementos.

En primer lugar debe indicarse que el hierro (Fe) es reportado como ( $\text{Fe}_3\text{O}_2$ ), éste presenta una tendencia a concentrarse en la fracción magnética (0.4 A) con un promedio de 33,76% p/p, seguido de la fracción medianamente magnética con concentraciones promedio de 24,47% p/p y por último la fracción no-magnética con concentraciones promedio de 0,41% p/p (APÉNDICE B, Tablas B1, B2 y B3). Ésto es debido a que existe una relación entre la susceptibilidad magnética y la concentración de hierro en la muestra, a medida que hay mayor concentración de hierro, mayor es el carácter magnético de la misma, por ende, es normal que las fracciones magnéticas sean más ricas en este elemento que las medianamente magnética y éstas a su vez que las no magnéticas (Figura 8).

En lo que respecta a la variación de la concentración, en función de la granulometría, el hierro no presenta una tendencia a distribuirse por un tamaño de grano en específico, tanto en la fracción magnética como en la medianamente magnética, lo que quiere decir que su concentración es indiferente al tamaño de partícula, destacando que las concentraciones para Fe entre los ríos estudiados son muy similares entre ellos, exceptuando los ríos Maniapure y Suapure que en la fracción de 0,8 A están por debajo de la concentración promedio reportada para esa fracción (Figura 9).



**Figura 8.** Variación de la concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.

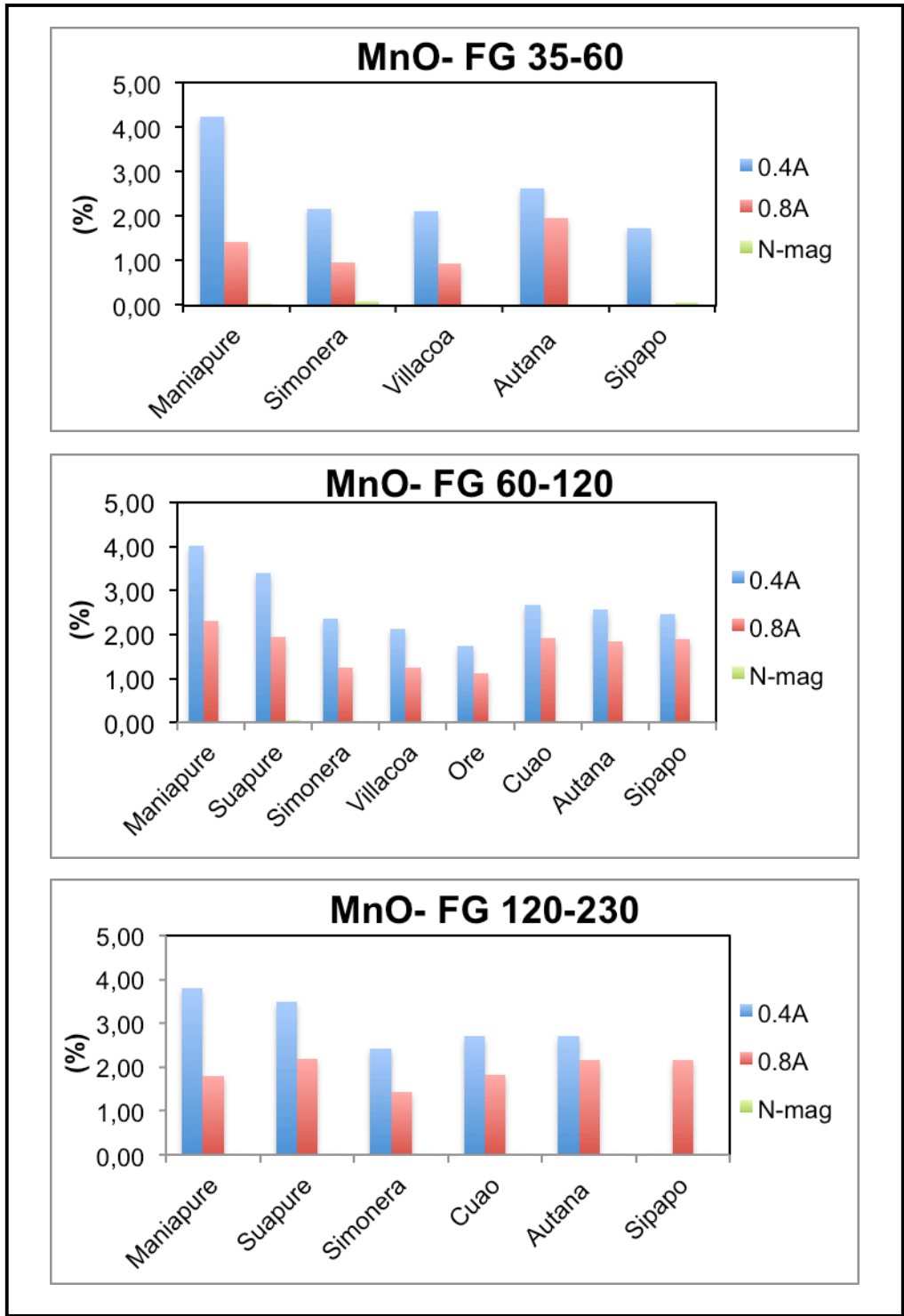


**Figura 9.** Variación de la concentración de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por tamaño de grano en función del magnetismo.

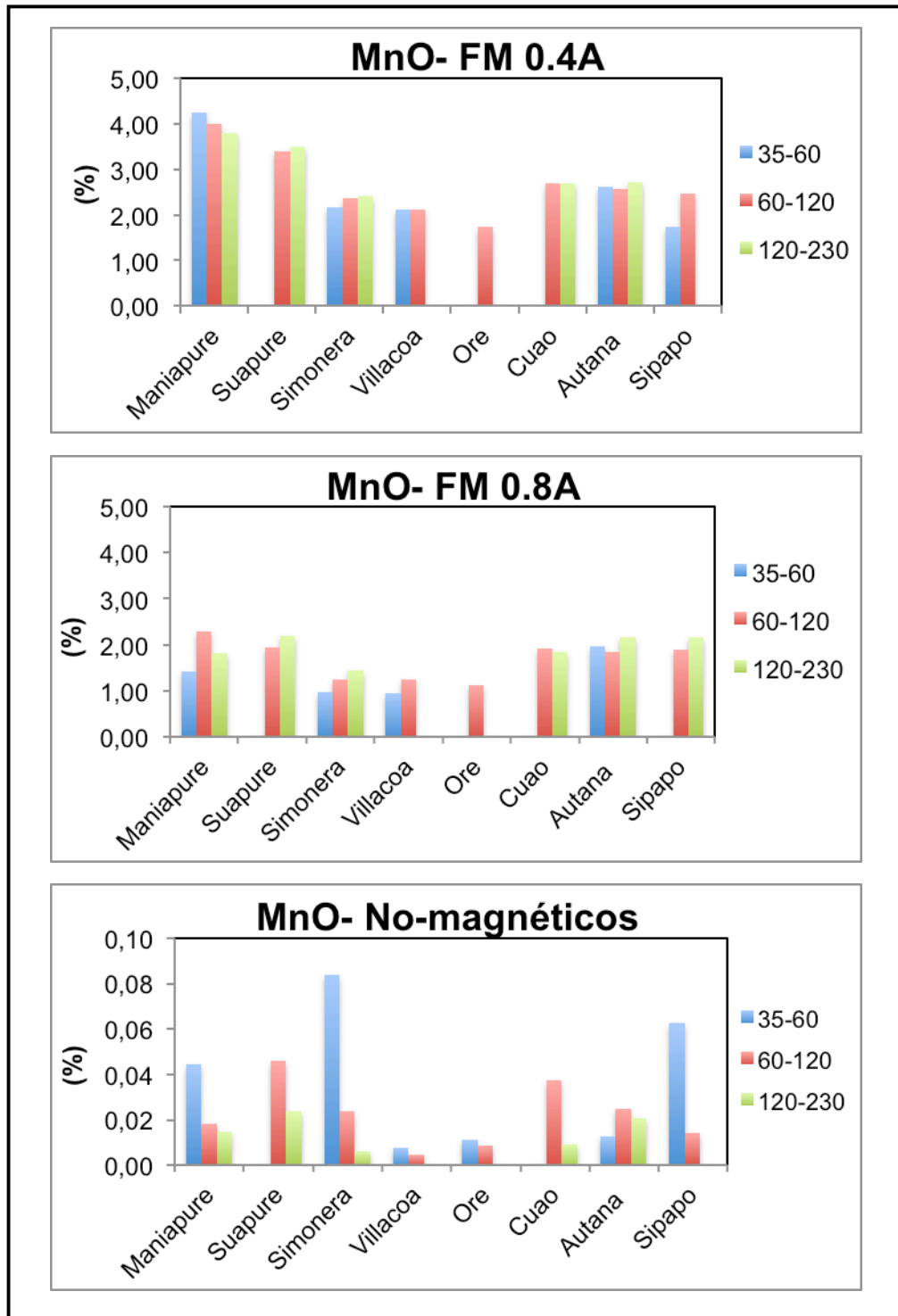
La distribución de Fe obtenida concuerda con lo reportado por Jacotte (1996) donde expresa que las concentraciones de hierro en sedimento total presentan una gran variabilidad dentro del sistema estudiado, y concentrándose preferiblemente a las fracciones correspondiente arena media, arena fina y arena muy fina.

Para el caso de manganeso (Mn) este tiene tendencia a acumularse mayormente en la fracción magnética con concentraciones promedio de 2,74% p/p (figura 10), siendo los ríos Maniapure y Suapure del Edo. Bolívar los que presentan la mayor abundancia de este elemento en las tres fracciones granulométricas, con concentraciones que varían entre 3,5-4,5% p/p de MnO. En cuanto a la fracción medianamente magnética se obtiene que la concentración promedio es de 1,69% p/p y por último la fracción no-magnética presenta concentraciones por debajo del 0,1% p/p.

En lo que respecta a la concentración de Mn por tamaño de grano en función del magnetismo (figura 11), podemos observar que en la fracción magnética (0,4 A) no presenta tendencia a concentrarse en un tamaño de grano en específico, sin embargo, en la fracción medianamente magnética (0,8 A) si existe una tendencia por parte del Mn a concentrarse en la fracción de menor tamaño, que corresponde a la fracción de arena muy fina (120-230 mallas), a excepción de los ríos Maniapure y Cuaó donde se concentra mayormente en la fracción de arena fina. Por otro lado, también puede observarse que la concentración de manganeso dentro de los ríos del Estado Bolívar tanto en la fracción de 0,4 A y la de 0,8 A, decrece en dirección Norte-Sur, mientras en los ríos del Estado Amazonas la concentración es similar, esto puede ser a consecuencia que los ríos Maniapure, Suapure, Cuaó, Autana y Sipapo drenan en su mayoría al Grupo Cuchivero.



**Figura 10.** Variación de la concentración de MnO por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.



**Figura 11.** Variación de la concentración de MnO por tamaño de grano en función del magnetismo.

La variación presente en los ríos Maniapure y Suapure con respecto a las concentraciones de hierro y manganeso en la fracción magnética, puede ser a consecuencia de la sustitución limitada de Mn dentro de la estructura cristalina de la ilmenita, por su asociación geoquímica [ $\text{Fe}^{+2}$  ( $r= 0,76\text{\AA}$ ) y  $\text{Mn}^{+2}$  ( $r= 0,80\text{\AA}$ )]. También puede atribuirse a la presencia de especies relacionadas a la ilmenita como lo es la pirofanita ( $\text{MnTiO}_3$ ) (Klein y Hurbult, 2002). Además, en el estudio de Gamero y Reveti (2011) son reportadas anomalías de MnO (6-16% p/p) a lo largo de la cuenca del río Suapure y proponen que mineralógicamente esta zona esté compuesta por ilmenita rica en Mn, hematita y magnetita y no descartan la posibilidad de la presencia de una solución sólida de ilmenita y pirofanita. Esta hipótesis podría ser confirmada con un estudio detallado de las ilmenitas, ya que la ilmenita-Mn presenta un contenido inusualmente alto de manganeso, con MnO > 3,0% p/p hasta 11% y una elevada concentración de vanadio,  $\text{V}_2\text{O}_3 = 0,21 - 0,43 \%$  p/p (F.V, Kaminsky y E.A, Belousova, 2006).

Por otra parte, la fracción no-magnética presenta valores muy bajos en Fe y Mn (APÉNDICE B, tabla B4) para considerarlos de importancia en comparación con las fracciones magnética y medianamente magnética; sólo se indica que puede estar asociado en la fracción de mayor tamaño o arena media (35-60 mallas), siendo los ríos Maniapure, Suapure y Simonera en el Edo. Bolívar y los ríos Cuao y Sipapo en el Edo. Amazonas los que presentan las mayores concentraciones de estos elemento. Además, la presencia de dichos elementos en la fracción puede atribuirse a la fase mineral rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), ya que este puede contener en su estructura cristalina cantidades considerables de  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ , Nb y Ta (Klein y Hurbult, 2002).

El titanio (Ti) presenta una tendencia a concentrarse en la fracción medianamente magnética con concentraciones superiores al 40% p/p, a excepción de los ríos Maniapure, Suapure y Simonera (arena media, fina y muy fina) y el río Villacoa (arena media), los cuales presentan mayor concentración de este elemento en la fracción de

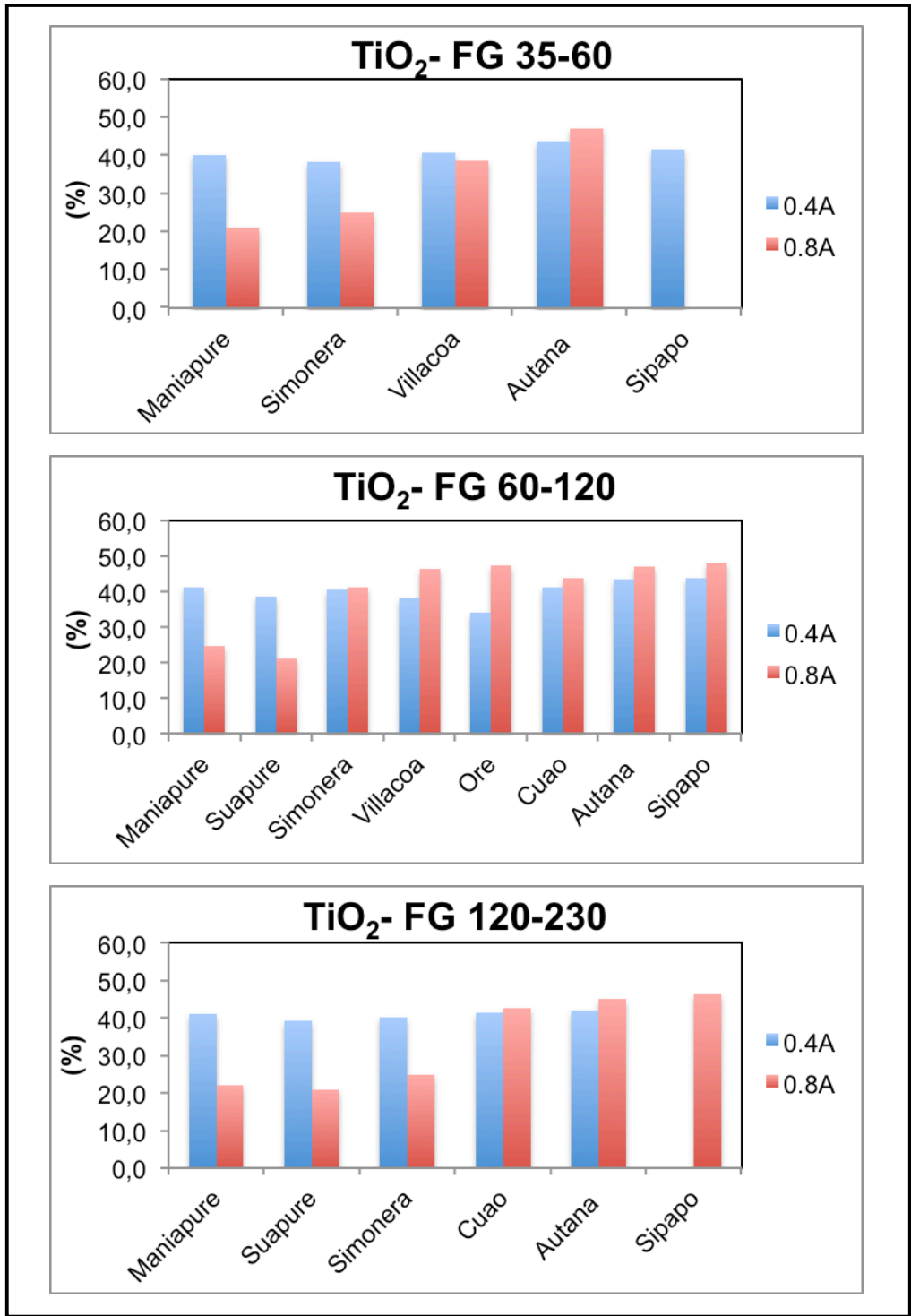


0,4A (Figura 12). Por otra parte, la relación de la abundancia relativa del elemento en función del tamaño de partícula, no presenta tendencia alguna por un tamaño de grano determinado en ninguna de las fracciones en función del magnetismo (Figura 13).

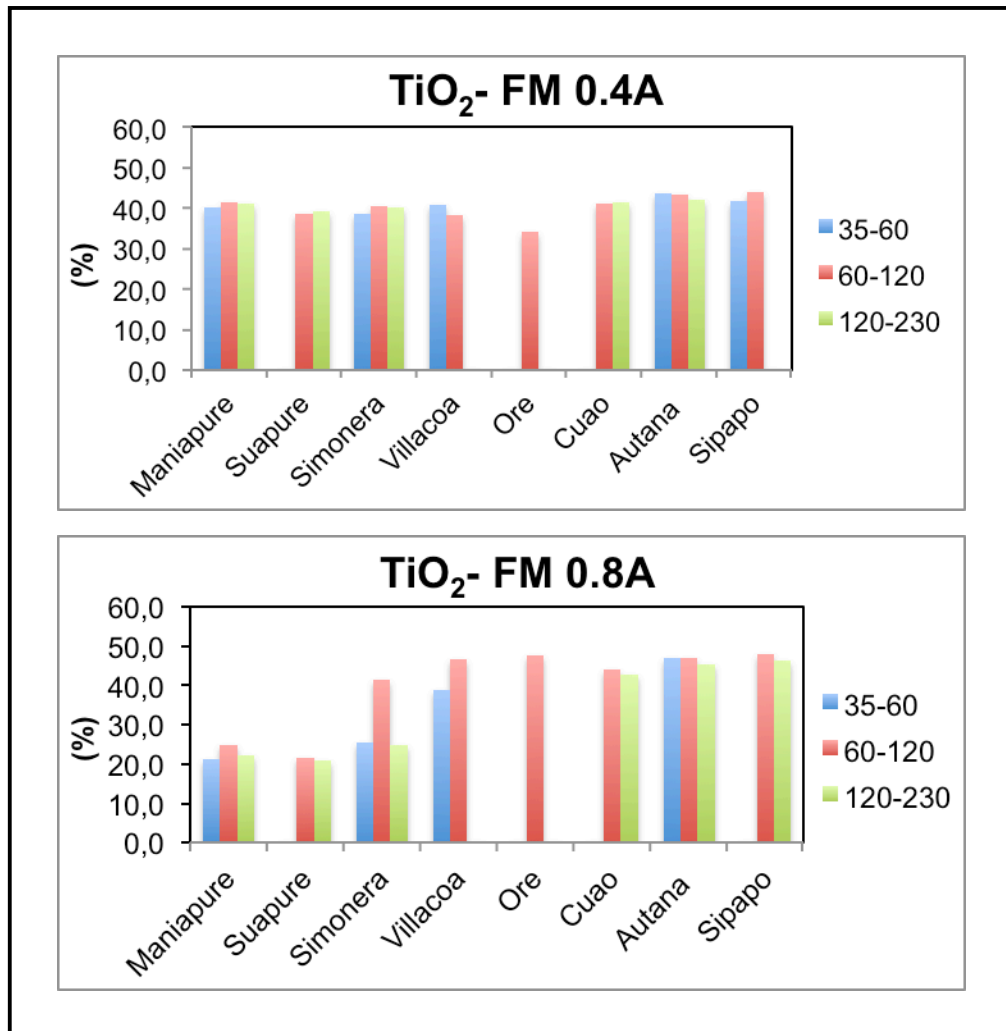
Los valores de concentración obtenidos de Ti, Fe y Mn para la fracción magnética, sugieren a la ilmenita como principal constituyente de esta fracción, confirmando lo reportado en el análisis mineralógico. Por su parte, la fracción medianamente magnética (0,8 A), está caracterizada por la presencia de diversas fases minerales, tales como pseudorutilo e ilmenorutilo, los cuales son producto de la alteración de la ilmenita. Dicha alteración es el resultado de los procesos de meteorización donde las sales solubles de titanio se hidrolizan fácilmente y en consecuencia, el titanio queda en gran parte de los resistatos, por lo tanto, a medida que la ilmenita va enriqueciéndose en dicho elemento el magnetismo decrece.

La fracción magnética, a pesar que está dominada por la fase mineral ilmenita, no hay buena correlación entre Fe y Ti. En el apéndice C son presentados los valores de correlación obtenidos entre los elementos analizados en función del magnetismo. La relación  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  para la fracción de 0,4 A es menor a la esperada, por lo que se propone que esta fracción esté compuesta por una combinación de ilmenita en diversos grados de alteración, es decir, una combinación de ilmenita e ilmenorutilo.

Frost (1976) citado en Torres (1984) propone la relación  $\text{Ti}/(\text{Ti}+\text{Fe})$  para clasificar el grado de alteración de las ilmenitas, estableciendo que valores inferiores a 0,50 corresponden a ilmenitas poco alteradas y valores entre 0,5 y 0,6 corresponden a ilmenorutilos. Esta relación fue verificada en la fracción de 0,4 A total, obteniéndose una relación de 0,52; e infiriendo que esta fase corresponde a ilmenorutilos ( $\text{FeO}(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_5\text{TiO}_2$ ).



**Figura 12.** Variación de la concentración de TiO<sub>2</sub> por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.



**Figura 13.** Variación de la concentración de TiO<sub>2</sub> por tamaño de grano en función del magnetismo.

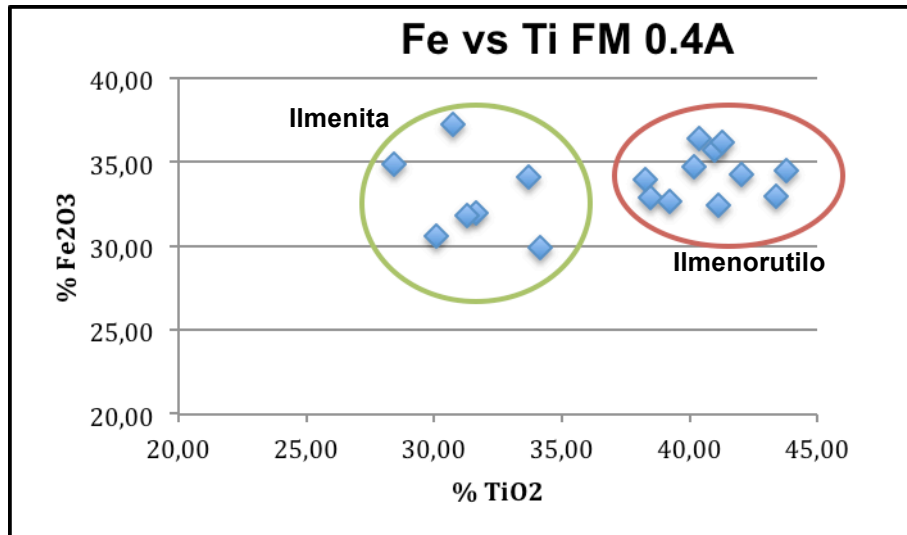
Además, fue determinada la relación Ti/Ti+Fe a cada fracción granulométrica de la fracción magnética, obteniéndose diferentes relaciones por granulometría (Tabla 8). Rodríguez (1984) reporta en su estudio geoquímico de los resistatos pesados en el Alto Paragua, que la ilmenita presente en esta zona, posee diversos grados de alteración, siendo predominante en la fracción de 0,4 A.

**Tabla 8.** Relación Ti/Ti+Fe en las diferentes fracciones granulométricas en función de del magnetismo (0,4 A).

<b>Fracción granulométrica (mallas)</b>	<b>Relación Ti/Ti+Fe</b>	<b>Fase mineral</b>
35-60	0,48	Ilmenita
60-120	0,54	Ilmenorutilo
120-230	0,54	
Total	0,52	

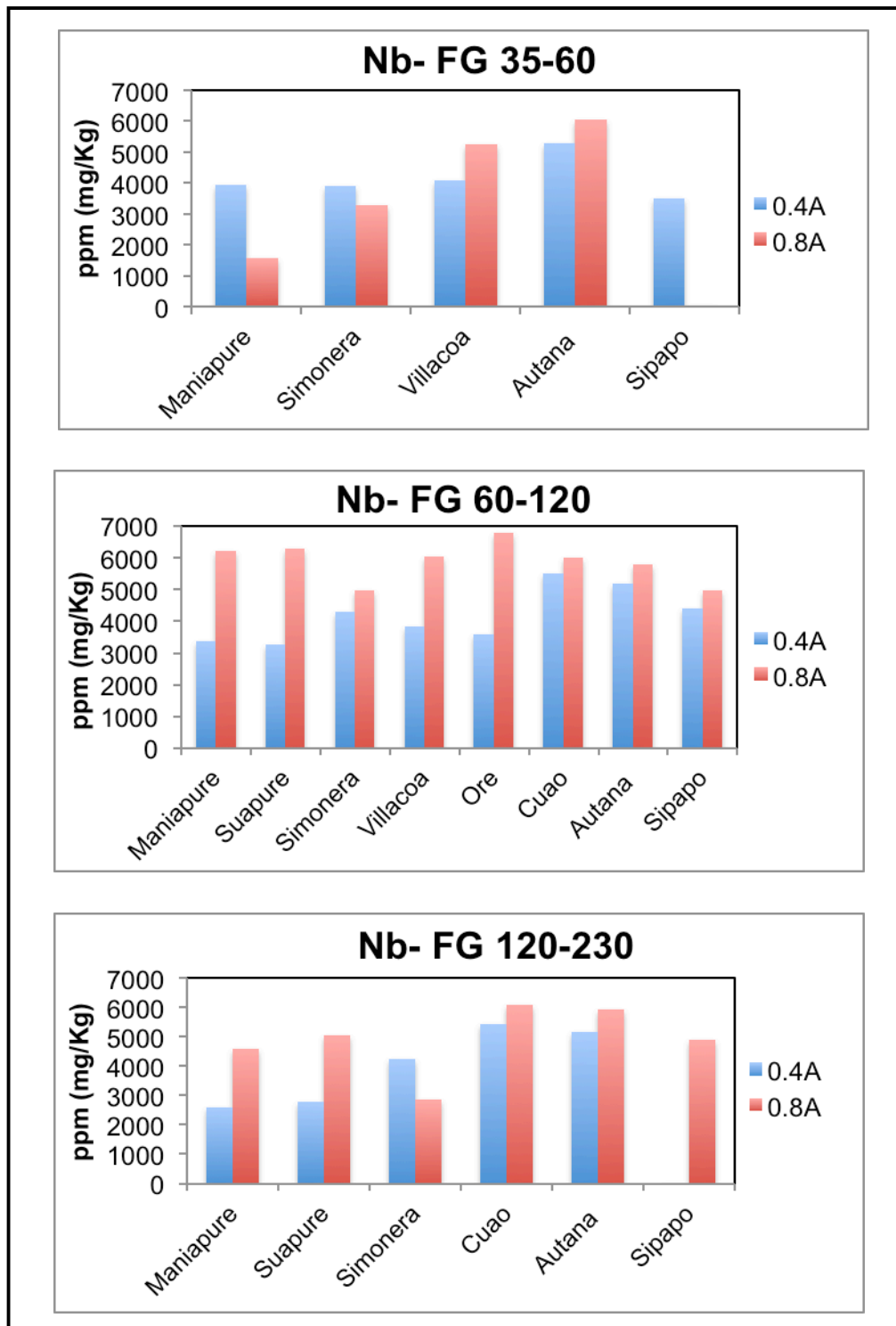
En la gráfica de correlación  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vs  $\text{TiO}_2$  (Figura 14) es posible observar la separación de estas dos fases y es posible inferir que el hierro es reemplazado por titanio a medida que avanzan los procesos de meteorización. Además en dicho gráfico se confirma la separación de fases por granulometría, donde los datos encerrados en verde, son los correspondientes a las concentraciones obtenidas a la fracción de arena media (35-60 mallas), que da una relación de (0,48) atribuida a ilmenitas y los encerrados en rojo son los que corresponden a las concentraciones de las muestras de arena fina (60-120 mallas) y muy fina (120-230 mallas) que indican una relación de (0,54) relacionada con ilmenorutilo. Esta diferencia por granulometría puede deberse que a mayor tamaño de grano, existe una menor área superficial, por lo tanto más resistente tornará el mineral

La concentración de los elementos traza es de gran importancia, ya que estos son mejores discriminantes en los procesos petrológicos, debido a que presentan mayor variabilidad en concentración y determinan procesos que no pueden ser observados con los elementos mayoritarios. Además, la correlación que puedan establecerse con estos elementos puede discernir de manera mas precisa influencias de diferentes fases mineralógicas.



**Figura 14.** Gráfico de correlación Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs TiO<sub>2</sub> en la fracción magnética 0,4 A.

Debido a problemas con el instrumental analítico, el niobio (Nb) fue el único elemento traza analizado en la fracción magnética y medianamente magnética. Este presenta una tendencia similar al Ti, asociado preferiblemente a la fracción medianamente magnética, a excepción de los ríos Maniapure y Simonera en la granulometría de arena media (35-60 mallas), donde la acumulación es principalmente en la fracción de 0.4A (figura 15). Las concentraciones de Nb en la fracción magnética tiene una concentración promedio de 4130 ppm (APÉNDICE B, Tabla B2), mientras que en la fracción medianamente magnética la concentración promedio de Nb es de 5145 ppm (APÉNDICE B, Tabla B3) con una tendencia a acumularse en la fracción granulométrica de arena fina (60-120), siendo el río Ore el que presenta mayor abundancia de este elemento, con concentraciones superiores a los 6500 ppm. Los ríos del Estado Bolívar son los que presentan mayor abundancia de este elemento en la fracción de 0,8 A y los ríos del Estado Amazonas es en la fracción de 0,4 A (Figura 16).



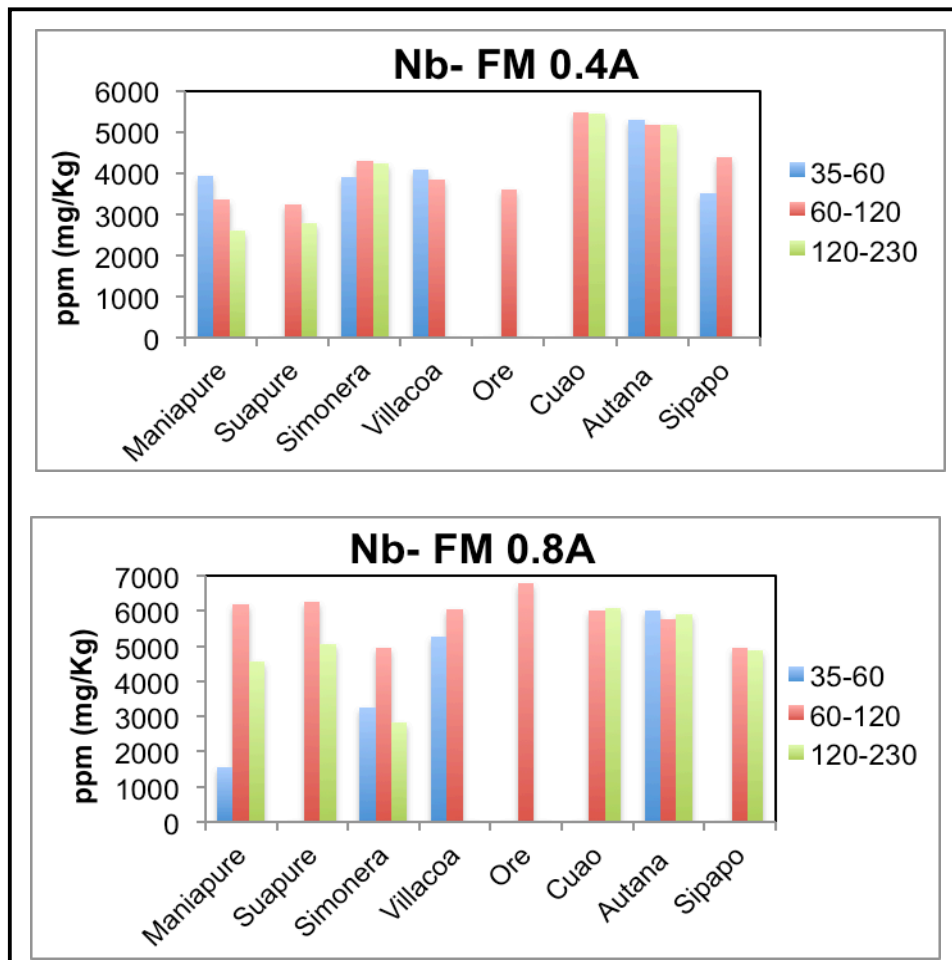
**Figura 15.** Variación de la concentración de Nb por magnetismo en las diferentes fracciones granulométricas.

la fase mineralógica asociada al Nb viene dada principalmente por la ilmenita y de acuerdo con lo planteado por (Torres, 1984) el  $\text{Nb}^{+5}$  ( $r=0,68\text{\AA}$ ) sustituye con preferencia al  $\text{Ti}^{+4}$  ( $r=0,64\text{\AA}$ ) en esta fase, por su carga iónica mayor y radio iónico similar. Cramer et al. (2011) determinan anomalías importantes de Ti, Fe y Nb en la cuenca baja del río Inírida-Colombia; establece a la ilmenita como mineral huésped de dichos elementos e identifica la presencia de inclusiones de pirocloro  $[(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Nb},\text{Ta},\text{Ti})_2\text{O}_6 (\text{OH}, \text{F})]$  con alta concentraciones de itrio (Y) e iterbio (Yb) en las mismas.

La ilmenita es un mineral accesorio común en rocas ígneas, pero de gran importancia desde el punto de vista de prospección, por presentar gran variabilidad en concentración de elementos traza, por lo que es utilizado como indicador de fraccionamiento magmático y trazador de cuerpos kimberlíticos (Nakashima e Imaoka, 1998). Por esta razón, es recomendado un estudio a detalle de la composición y distribución de los elementos traza, en especial niobio (Nb) y tántalo (Ta) en la fase mineral ilmenita, que puede proponer la influencia de cuerpos carbonáticos o kimberlíticos, en la zona de estudio. Utilizando la herramienta propuesta por Gasper y Willye (1983), donde presentan promedios de Nb y Ta en las ilmenitas provenientes de kimberlitas (0,22% Nb y 0,16% Ta) son menores a los de las ilmenitas provenientes de carbonatitas (1,11% Nb y 0,13% Ta).

No obstante, puede haber el aporte de otra fuente mineral para el Nb, ya que no se obtuvo buena correlación entre este elemento y el titanio ( $\text{Nb}/\text{TiO}_2$ ) (APÉNDICE C, tablas C1 y C2), un ejemplo de ello es la presencia de la fase mineral columbita-tantalita  $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6 - (\text{Fe},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6]$ , ya que las fuentes importantes de dicho mineral son las rocas graníticas y pegmatíticas. El río Ore fue el que reporto mayores concentraciones de Nb en el análisis químico; éste drena el Granito del Parguaza (APÉNDICE F, Figura F10, F11, F12). Estudios indican que hacia el borde del batolito en especial en el lado oeste, presenta zonas de cizalla con emplazamiento de pegmatitas y plantea la existencia de significativa importancia de columbita-tantalita,

casiterita, y circón (Mendoza, 2005). Cisneros et al. (1987) en el estudio de las fracciones magnéticas y no magnéticas en el río Villacoa, identifica la presencia de columbita-tantalita. Gamero y Reveti (2011) reportan altas concentraciones de Nb (3633-4114 ppm) en sedimento pesado en las muestras de la zona comprendida entre la cuenca del río Suapure, Parguaza y Cataniapo. Buenaventura y Rosas (1998) reportan anomalías de Nb y Ta en sedimento total e identifican la presencia de minerales de la serie columbita-tantalita en las cercanías de Puerto Carreño-Colombia, sugiriendo la concentración de estos minerales en depósitos de placer, relacionado con diques pegmatíticos emplazados en el granito del Parguaza.



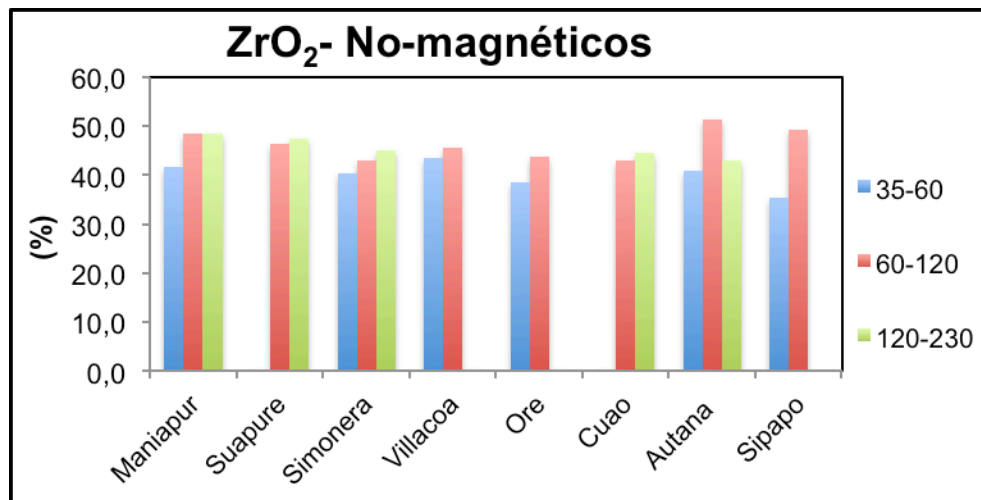
**Figura 16.** Variación de la concentración de Nb por tamaño de grano en función del magnetismo.



Por último, el circonio (Zr) solamente fue analizado cuantitativamente para la fracción no-magnética y el mismo se presenta como elemento mayoritario para esta fracción con concentración promedio en óxido de 44% p/p, siendo los ríos Autana y Sipapo los que presentan las mayores concentraciones para este elemento, estando alrededor del 50% p/p. (APÉNDICE B, Tabla B4). La tendencia del elemento es acumularse en la fracciones de menor tamaño, específicamente las de arena fina y muy fina (60-120 y 120-230 mallas) (figura 17). El hecho de que el circonio se asocie preferiblemente a un tamaño de grano es debido a que este elemento forma una fase mineral pesada muy estable, el circón [ $Zr(SiO_4)$ ]. Este mineral es el reportado como la fase mineral predominante para la fracción no-magnética en el análisis mineralógico. Nicholls y Loving (1962) citado en Jacotte (1996), explica que durante los procesos de meteorización el circón es liberado y rápidamente inmovilizado en las arcillas por adsorción, concentrándose en el material meteorizado y llegando a incrementar hasta 306 ppm en profundidades de hasta 30 cm en el suelo. Meléndez (2006) reporta valores de  $ZrO_2$  hasta de 500 ppm en los primeros metros del perfil laterítico de los Pijigüaos, el cual está desarrollado sobre el Granito del Parguaza. Además, Rodríguez (1984) encuentra en su estudio geoquímico del río Paragua, que el circón se concentra en la fracción de arena muy fina.

Por su parte, Moreno (1996) indica que el circón tiene un intervalo de abundancia que oscila entre 5 y 40% en los ríos estudiados, siendo los ríos del estado Amazonas los que presentan la mayor concentración de circón. En consecuencia los ríos Autana y Sipapo presentan elevadas concentraciones de circonio. El incremento de la concentración de circón en esta zona pueden ser debido a que dichos ríos drenan las rocas metasedimentarias del Grupo Roraima constituida principalmente por cuarzoarenitas con intrusiones de diabasa y rocas dioríticas cuarcíferas (APÉNDICE F, figura F13, F14 y F15). Además Gamero y Reveti (2011), reportan anomalías de circonio, hafnio (1595-2327 ppm) y uranio (145-209 ppm) en sedimento pesado para la zona comprendida entre la cuenca del río Suapure, Parguaza y Cataniapo, asociando

dichos elementos al circón. Estudios anteriores como Pascuali (2003) y Quevedo (2009) mediante el uso de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) detectan inclusiones de torita ( $\text{ThSiO}_4$ ) y uraninita ( $\text{UO}_2$ ) en granos de circón. Por lo tanto, no se descarta la presencia de elevadas concentraciones para dichos elementos en el sistema de estudio, ya que el Hf y Zr presentan características de carga y radio iónico similares [ $\text{Zr}^{+4}$  ( $r=0,80\text{\AA}$ ) y  $\text{Hf}^{+4}$  ( $r=0,81\text{\AA}$ )], entrando en la estructura cristalina del circón



**Figura 17.** Variación de la concentración de  $\text{ZrO}_2$  por tamaño de grano en la fracción no-magnética.

En general, la agrupación de los datos obtenidos para la zona de estudio sugiere la influencia de rocas félsicas, sieníticas, graníticas y pegmatíticas presentes en la Provincia de Cuchivero y aporte del Grupo Roraima. Sin embargo, la acumulación de ciertos elementos es debido a los procesos secundarios producto de la meteorización y erosión en climas tropical lluvioso.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a la discusión realizada anteriormente, son generada las siguientes conclusiones:

- La mineralogía del área de estudio es la siguiente: la fracción magnética (0,4 A) está dominada por ilmenita, la fracción medianamente magnética (0,8 A) por ilmenorutilo, pseudorutilo, hematita y fosfatos de tierras raras (monacita y xenotima) y hastingsita, por último la fracción no-magnética constituida principalmente por circón.
- El hierro (Fe) está como elemento mayoritario en la fracción magnética con concentraciones promedio de 33,74% p/p y asociado a la fase mineral ilmenita.
- El manganeso (Mn) presenta tendencia acumularse en la fracción magnética, con concentraciones que varían entre 4,25 -1,73% p/p, donde los ríos Maniapure y Suapure presentan las concentraciones más elevadas.
- Las concentraciones de Fe y Mn en la fracción no-magnética son muy bajas para considerarlas de importancia en comparación con las magnéticas y medianamente magnéticas.
- El Titanio (Ti) presenta tendencia marcada a concentrarse en la fracción medianamente magnéticas (0,8 A) con concentraciones superiores al 40% p/p, siendo los ríos del Estado Amazonas los que presentan la mayor abundancia de dicho elemento. Asociado a la fase mineral ilmenita y sus productos de alteración.
- La relación  $Ti/Ti+Fe$  establece que la fracción magnética esta caracterizada por una variedad de ilmenitas en diversos grados de alteración y en función de la granulometría, la fracción de arena media con relación de 0,48 es atribuida a

ilmenita mientras que para las fracciones de menor tamaño (arena fina y muy fina) con relación 0,52 es para ilmenorutilo.

- El niobio (Nb) está mayormente asociado a la fracción medianamente magnética, ubicándose el mayor valor al río Ore con 6787 ppm, dicho elemento está asociado principalmente a la ilmenita, además puede haber aporte de fase mineral tipo columbita-tantalita.
- El circonio (Zr) es el elemento mayoritario en la fracción no-magnética, con concentraciones promedio de 44,19% p/p y tiende a concentrarse en las fracciones de menor tamaño, formando la fase mineral circón. Los valores más elevados de dicho elemento fueron encontrados en los ríos Autana y Sipapo y puede ser atribuido a aporte litológico del Grupo Roraima.

## 6. RECOMENDACIONES

- Determinar las concentraciones de los elementos Ca, Mg, Sr, Rb, Pb, Y, Ta, La, Al, Co, Ni, Cu, V, Cr, Zn, Hf, Si y TR para todas las fracciones separadas por magnetismo, con la finalidad de detectar posibles anomalías geoquímicas.
- Realizar estudio detallado (composición y distribución elemental) de las ilmenitas presentes en la fracción magnética, con el fin de indicar procedencia e influencia por cuerpos carbonáticos o kimberlíticos.
- Realizar análisis mediante MEB a la fracción no magnética (circón) y determinar la presencia de elementos traza como (Hf, Th, U, Y, Nb, Nd, Ta, Ce, La) y su distribución en la estructura cristalina, en especial a la fracciones de arena fina y muy fina, que puedan dar información de interés en la prospección geoquímica.
- Incluir nueva información geológica o modificaciones a los mapa elaborado para la zona de estudio, en lo que respecta mineralogía, distribución y concentración elementales, o cualquier otra información de interés, que sirva para la delimitación de provincias geoquímicas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, R. (2007). *Identificación de minerales pesados en sedimentos fluviales del Estado Bolívar*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Bermúdez, M., & Anaya, R. (2007). Calibración del separador magnético de alta intensidad magnet-lift mlh (13) 111-5. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, 22 (3), 73-84.
- Bernstein, S., Frei, D., McLimans, R., Knudsen, C., & Vasudev, V. (2008). *Application of CCSEM to heavy mineral deposits: Source of high-Ti ilmenite sand deposits of South Kerala beaches, SW India*. *Journal of Geochemical Exploration*, 96, 25-42.
- Buenaventura, J. & Rosas, H., (1988). *Reconocimiento Geológico-Minero entre la región de Puerto Carreño y Puerto Nariño, Comisaría de Vichada*. INGEOMINAS, Informe. Bogotá.
- Boggs, S. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (4<sup>a</sup> Ed.). New York: Prentice Hall.
- Caver, R. (1971). *Procedures in sedimentary petrology*. New York: Wiley.
- Cisneros, O., Isis, L., & Rukoz, J. (1987). *Informe mineralógico de catorce (14) muestras de arena procedentes del río Villacoa*. Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Geología, Caracas, Venezuela.
- Cramer, T., Amaya, Z., Franco, J., Bonilla, A., Poveda, A. (2011). Caracterización de depósitos aluviales con manifestaciones de tantalio y niobio (coltan) en las comunidades indígenas de Matraca y Caranacoa, Departamento del Guainía. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá, Colombia.
- Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Madrid: Fundación BBVA.
- Ergin, M., Keskin, S., Dogan, U., Kaan Kadioglu, Y., & Karakas, Z. (2007). Grain size and heavy mineral distribution as related to hinterland and environmental conditions for modern beach sediments from the Gulfs of Antalya and Finike, eastern Mediterranean. *Marine Geology*, 240, 185-196.

- Feo-Codecido, G. (1956). *Geología; técnica para el estudio de los minerales pesados y su aplicación en la estratigrafía de Venezuela*. Caracas: S.E.S.L.
- Figueredo, N. *Caracterización geoquímica de sedimentos fluviales provenientes de las zona septentrional del Estado Bolívar*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Gamero, A., Reveti, M. (2011). *Estudio geoquímico y mineralógico de minerales pesados en la zona noroccidental del Estado Bolívar*. Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Gaspar, J., & Wyllie, P. (1983). *Ilmenite (high Mg, Mn, Nb) in the carbonatites from the Jacupiranga Complex, Brazil*. *American Mineralogist*, 68, 960-971.
- González de Juana, C., Iturralde De Arozena, J. M., & Picard Cadillat, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas (Vol. I)*. Caracas: FONINVES.
- Harding, K., Morris, W., Balch, S., Lapointe, P., Latham, A. (1988). A comparison of magnetic carácter and alteration in three granite drill cores from Eastern Canada. *Canadian Journal Earth Science*, 25, 1141-1150.
- Hernández, M. (2009). *Evaluación de técnicas de análisis multivariado sobre minerales pesados pertenecientes a sedimentos de drenajes activos de la región de Imataca, Estado Bolívar, Venezuela: Implicación en la determinación de proveniencia*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Hounslow, M., Morton, A. (2004). Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates: comparison with heavy minerals analysis. *Sedimentary Geology*, 171, 13-36.
- Jacotte Verdú, M. (1996). *Estudio granulométrico y geoquímico de los sedimentos de fondo de los ríos que drenan las rocas del Complejo Cuchivero, Estados Bolívar y Amazonas, Venezuela*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Jiménez, Y. (2004). *Cartografía geoquímica de las cuencas de los ríos Caura y Aro, a través de sedimentos fluviales, con fines prospectivos*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.

- Kaminsky, F. V., & Belousova, E. A. (2006). *Manganoan ilmenite as kimberlite/diamond indicator mineral. Russian Geology and Geophysics, 50 (12), 1212-1220*
- Klein, C., & Hurlbut, C. (2002). *Manual de mineralogía. Basado en la obra de J. Dana (4° ed.)*. Barcelona, España: Reverté, S.A.
- Komar, P. (2007). The Entrenment, Transport and Sorting of Heavy Minerals by Waves and Currents. *Developments in Sedimentology, 58, 3-48*.
- Lapointe, P., Harding, K., Morris, W. (1986). Interpretation of magnetic susceptibility: a new approach to geophysical evaluation of the degree of rock alteration.. *Canadian Journal Earth Science, 23, 393-401*.
- Liberatore, P. (1993). Determination of major in geological samples by ICP-AES. *Varian Australia Pty Ltd. ICP-AES Instruments at work, 1, 1-4*.
- Liberatore, P. (1994). Determination of trace elements in geological samples by ICP-AES. *Varian Australia Pty Ltd. ICP-AES Instruments at work, 1, 1-4*.
- Mange, M., & Mauner, H. (1992). *Heavy minerals in colour*. Londres: Chapman & Hall.
- Meinhold, G., Morton, A., Howard, J., Phillips, R., Strogon, D., Abutarruma, Y., y otros. (2011). A heavy mineral study of sandstones from the eastern Murzuq Basin, Libya: Constraints on provenance and stratigraphic correlation. *Journal of African Earth Sciences, 61, 308-330*.
- MeléndeZ, W. (2006). *Caracterización química y mineralógica de los minerales pesados presentes en el perfil de meteorización del yacimiento de bauxitas de los Pijiguaos*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- MéndeZ, J. (2007). *Petrología- Ambientes Sedimentarios*. Caracas: Facultad de Ciencias, U.C.V.
- Menéndez, G. (1992). *Uso de las fracciones magnéticas y no magnéticas de minerales pesados de sedimentos de río para la prospección geoquímica del Alto Paragua, Estado Bolívar, Venezuela*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Mendoza, V. (2005) *Geología de Venezuela. Tomo I: Escudo de Guayana, Andes Venezolanos y sistema Montañoso del Caribe*. Universidad de Oriente, Escuela de Ciencias de la Tierra: Ciudad Bolívar, Venezuela.



- Mitchel, W. (1975). *Heavy Minerals. In Giesecking. Soil Components II Inorganic*. New York: Springer.
- Moreno, Y. (1996). *Estudio geoquímico de los minerales pesados en los ríos que drenan las rocas del Complejo de Cuchivero, Estado Bolívar y Amazonas, Venezuela*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Morton, A., & Hallsworth, C. (1999). Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124, 3-29.
- Morton, A., & Mange, M. (2007). Geochemistry of heavy minerals. *Developments in Sedimentology*, 58, 345-391.
- Parales, D. (2009). *Estudio de la variación en la composición de minerales pesados con el tamaño de grano en sedimentos de las cuencas de los ríos Aro, Arizo, Pao y Orinoco, Venezuela*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- PDVSA-Intevep. (1997). *Código Geológico de Venezuela*. Disponible en URL: <http://www.pdv.com/lexico/b.htm> [consulta el 12 de diciembre de 2012].
- Pascuali, J., (2003). *Informe geoquímico. Avance de resultados*. Informe interno. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Perkins, D. (2010). *Dept. of Geology and Geological Engineering of The University of North Dakota*. Disponible en URL: <http://www.und.nodak.edu/instruct/mineral/320petrology/opticalmin/birefringence.htm> [consulta el 2 de noviembre de 2012].
- Pettijohn, F. J. (1975). *Sedimentary Rocks* (3ª ed.). New York: Harper & Row Publishers.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., & Siever, R. (1972). *Sand and Sandstone* (2ª ed.). New York: Springer-Verlag.
- Quevedo Rondón, J. (2009). *Análisis mineralógico y químico de minerales pesados de sedimentos de la cuenca del río Aro, Estado Bolívar, Venezuela*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.

- Rodríguez, E. (1984). *Geoquímica de los resistatos pesados del río Paragua, Estado Bolívar*. Tesis de Pregrado, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Rubey, W. (1933). The size distribution of heavy minerals within a water-lain sandstone. *Journal Sedimentary Petrology*, 3, 3-29.
- Schmidt Mumm, A., Dart, R., Say, P. (2013). Hematite/maghemite trace element geochemistry in base metal exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 124, 239-251.
- Torres, J. (1984). *Análisis geoquímico de los resistatos pesados de la hoya hidrográfica del río Paragua, Estado Bolívar, Venezuela*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela: Caracas, Venezuela.
- Yang, S., Wang, Z., Guo, Y., Li, C., & Cai, J. (2009). Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35, 56-65.
- Zack, T., Von Eynatten, H., Kronz, A. (2004). Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sedimentary Geology*, 171, 37-58.

## APÉNDICE A- Equipos y condiciones experimentales

**Tabla A.1.** Condiciones experimentales establecidas en el fraccionamiento magnético

Equipo	<b>Separador isodinámico tipo FRANTZ, modelo MOL L-1</b>		
Fracción magnética	Intensidad de corriente (A)	Angulo frontal (grados)	Angulo lateral (grados)
Magnética (M)	0,4	20	25
Medianamente magnética (MM)	0,8	20	25
No- magnética (NM)	-	20	25

**Tabla A.2.** Condiciones experimentales en las determinaciones elementales

<b>Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES) marca PERKIN ELMER, modelo OPTIMA 2100DV</b>	
Elementos	Ti, Zr, Nb
Flujo de gas plasmógeno	15 L/min
Flujo de gas nebulizador	0,8 L/min
Flujo de gas auxiliar	0,2 L/min
Potencia del ICP	1100 Watts
<b>Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS) marca PERKIN ELMER, modelo AAnalyst 200</b>	
Llama	Aire- acetileno oxidante
<b>Fe <math>\lambda</math></b>	372,0 nm
<b>Mn <math>\lambda</math></b>	279,5 nm

**Tabla A.3-** Condiciones experimentales en la difracción de rayos X

<b>Diffractómetro de rayos X <math>\Theta</math>: <math>2\Theta</math>, marca Bruker modelo D8 Advance</b>			
Tubo	Cu	Rendija	$1^{\circ}$ - $0,3$ - $1^{\circ}$
Filtro	Fe	Velocidad de Goniómetro	3 $^{\circ}$ /min
Potencial	35 Kv	Intensidad	25 ma



**Figura A.1.** Separador isodinámico Frantz.



**Figura A.2.** Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS) marca PERKIN ELMER, modelo AAnalyst 200



**Figura A.3.** Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES) marca PERKIN ELMER, modelo OPTIMA 2100DV

**APÉNDICE B-** Ubicación y datos de las muestras estudiadas

**Tabla B.1.** Ubicación de los puntos de muestro

Estado	Río	Coordenadas Geográficas	
		Oeste (W)	Norte (N)
Bolívar	Maniapure	66° 40' 12''	7° 13' 34''
	Suapure	66° 57' 36''	6° 48' 29''
	Villacoa	67° 03' 32''	6° 28' 05''
	Ore	67° 07' 41''	6° 23' 49''
Amazonas	Cuao	67° 37' 37''	4° 57' 18''
	Autana	67° 41' 10''	4° 45' 25''
	Sipapo	67° 44' 46''	4° 42' 25''

**Tabla B.2.** Datos de concentración de los elementos químicos analizados en la fracción magnética (0,4 A) en las muestras de minerales pesados.

Río	FM (A)	FG (mallas)	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ± 3%	% TiO <sub>2</sub> ± 4%	mg/Kg Nb ± 5%	mg/Kg Mn	% MnO ± 3%
Maniapure	0,4	35-60	30,65	40,08	3946,58	42529,22	4,25
Suapure	0,4	35-60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Simonera	0,4	35-60	34,92	38,42	3907,68	21559,86	2,16
Villacoa	0,4	35-60	37,30	40,73	4088,40	21224,68	2,12
Ore	0,4	35-60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cuao	0,4	35-60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Autana	0,4	35-60	34,13	43,73	5300,35	26203,48	2,62
Sipapo	0,4	35-60	31,98	41,63	3511,91	17361,89	1,74
Maniapure	0,4	60-120	31,83	41,30	3348,97	40058,00	4,01
Suapure	0,4	60-120	32,94	38,46	3242,57	33895,58	3,39
Simonera	0,4	60-120	36,42	40,40	4297,35	23626,89	2,36
Villacoa	0,4	60-120	34,00	38,27	3841,55	21197,18	2,12
Ore	0,4	60-120	29,91	34,14	3588,76	17272,38	1,73
Cuao	0,4	60-120	35,77	40,99	5487,80	26784,10	2,68
Autana	0,4	60-120	33,01	43,38	5169,10	25594,15	2,56
Sipapo	0,4	60-120	34,50	43,78	4392,00	24600,00	2,46
Maniapure	0,4	120-230	32,45	41,11	2602,64	37976,54	3,80
Suapure	0,4	120-230	32,65	39,22	2771,84	34936,21	3,49
Simonera	0,4	120-230	34,76	40,19	4231,80	24168,40	2,42
Villacoa	0,4	120-230	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ore	0,4	120-230	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cuao	0,4	120-230	36,19	41,28	5445,08	26941,29	2,69
Autana	0,4	120-230	34,31	42,06	5162,67	27181,81	2,72
Sipapo	0,4	120-230	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>Promedio</b>			33,76	40,51	4129,84	27395,09	2,74
<b>Desviación estándar</b>			2,01	2,31	894,88	7482,79	0,75
<b>MAX</b>			37,30	43,78	5487,80	42529,22	4,25
<b>MIN</b>			29,91	34,14	2602,64	17272,38	1,73

**Tabla B.3.** Datos de concentración de los elementos químicos analizados en la fracción medianamente magnética (0,8 A) en las muestras de minerales pesados.

Río	FM (A)	FG (mallas)	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ± 3%	% TiO <sub>2</sub> ± 4%	mg/Kg Nb ± 5%	mg/Kg Mn	% MnO ± 3%
Maniapure	0,8	35-60	18,39	21,17	1560,89	14257,43	1,43
Suapure	0,8	35-60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Simonera	0,8	35-60	26,12	25,17	3278,69	9691,42	0,97
Villacoa	0,8	35-60	25,51	38,56	5266,41	9467,17	0,95
Ore	0,8	35-60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cuao	0,8	35-60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Autana	0,8	35-60	25,71	46,93	6037,28	19502,82	1,95
Sipapo	0,8	35-60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Maniapure	0,8	60-120	21,68	24,53	6201,98	22941,18	2,29
Suapure	0,8	60-120	18,99	21,28	6264,04	19382,02	1,94
Simonera	0,8	60-120	25,54	41,16	4980,39	12401,96	1,24
Villacoa	0,8	60-120	25,86	46,47	6048,08	12451,92	1,25
Ore	0,8	60-120	26,53	47,44	6787,44	11159,42	1,12
Cuao	0,8	60-120	26,47	43,83	6010,19	19138,09	1,91
Autana	0,8	60-120	25,66	46,93	5792,62	18394,82	1,84
Sipapo	0,8	60-120	26,13	47,80	4973,04	18912,36	1,89
Maniapure	0,8	120-230	22,46	22,15	4578,02	18007,85	1,80
Suapure	0,8	120-230	19,55	20,84	5058,82	21960,78	2,20
Simonera	0,8	120-230	26,23	24,80	2848,08	14471,15	1,45
Villacoa	0,8	120-230	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ore	0,8	120-230	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cuao	0,8	120-230	25,70	42,73	6099,61	18244,58	1,82
Autana	0,8	120-230	26,53	45,08	5927,86	21495,74	2,15
Sipapo	0,8	120-230	27,42	46,24	4904,88	21505,38	2,15
<b>Promedio</b>			24,47	36,28	5145,46	16854,78	1,69
<b>Desviación estándar</b>			2,88	11,32	1359,79	4370,55	0,44
<b>MAX</b>			27,42	47,80	6787,44	22941,18	2,29
<b>MIN</b>			18,39	20,84	1560,89	9467,17	0,95

**Tabla B.4.** Datos de concentración de los elementos químicos analizados en la fracción no-magnética en las muestras de minerales pesados.

Río	FG (mallas)	FM (A)	% ZrO <sub>2</sub> ± 5%	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ± 3%	mg/Kg Mn ± 5%
Maniapure	35-60	NM	41,76	0,75	440,59
Suapure	35-60	NM	N/A	N/A	N/A
Simonera	35-60	NM	40,32	1,17	834,16
Villacoa	35-60	NM	43,36	0,41	76,00
Ore	35-60	NM	38,45	0,60	111,63
Cuao	35-60	NM	N/A	N/A	N/A
Autana	35-60	NM	40,92	0,18	123,48
Sipapo	35-60	NM	35,45	0,68	624,41
Maniapure	60-120	NM	48,55	0,37	182,27
Suapure	60-120	NM	46,32	0,56	456,24
Simonera	60-120	NM	43,02	0,23	234,30
Villacoa	60-120	NM	45,48	0,26	43,95
Ore	60-120	NM	43,84	0,35	83,56
Cuao	60-120	NM	42,99	0,55	370,00
Autana	60-120	NM	51,30	0,22	247,09
Sipapo	60-120	NM	49,34	0,20	138,14
Maniapure	120-230	NM	48,41	0,29	144,09
Suapure	120-230	NM	47,31	0,33	235,85
Simonera	120-230	NM	45,03	0,26	60,52
Villacoa	120-230	NM	N/A	N/A	N/A
Ore	120-230	NM	N/A	N/A	N/A
Cuao	120-230	NM	44,61	0,20	87,95
Autana	120-230	NM	43,07	0,22	204,37
Sipapo	120-230	NM	N/A	N/A	N/A
<b>Promedio</b>			44,19	0,41	247,30
<b>Desviación estándar</b>			3,92	0,25	211,23
<b>MAX</b>			51,30	1,17	834,16
<b>MIN</b>			35,45	0,18	43,95

N/A= no analizada



### APÉNDICE C- Coeficiente de correlación

**Tabla C.1-** Tabla de correlaciones elementales para las muestras magnéticas (0.4 A)

	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Nb</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,00			
<b>MnO</b>	-0,35	1,00		
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0,56</b>	0,00	1,00	
<b>Nb</b>	<b>0,52</b>	-0,32	0,31	1,00

**Tabla C.2-** Tabla de correlaciones elementales para las muestras medianamente magnéticas (0.8 A)

	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Nb</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,00			
<b>MnO</b>	-0,24	1,00		
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>0,78</b>	-0,03	1,00	
<b>Nb</b>	0,26	0,31	<b>0,54</b>	1,00

## APÉNDICE D- Exactitud y precisión del método

**Tabla D.1.** Valores reportados para los certificados Basalto (BR178) y Andesita (AN-G.976) y los valores experimentales obtenidos.

MR ppm ( $\mu\text{g/g}$ )	Basalto (BR178)	Exp	Anortosita (AN-G.976)	Exp
Titanio (Ti)	15583	15603,76	1319	1343
Niobio (Nb)	98	99	1,60	1,98
Circonio (Zr)	260	263	40	49

**Tabla D.2.** Análisis de precisión para la fracción no-magnética.

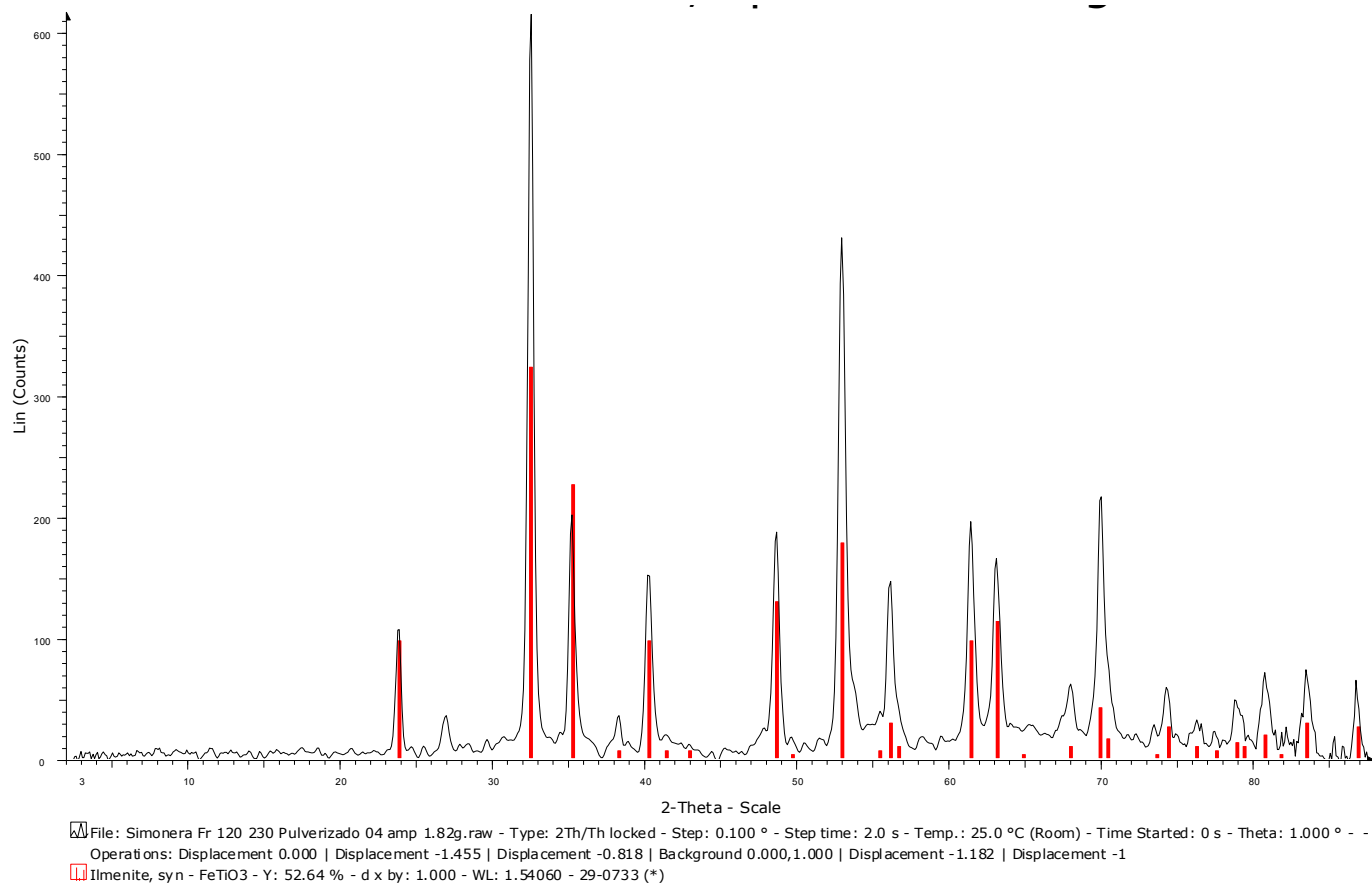
Río	FG (mallas)	FM	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	mg/Kg Mn	% ZrO <sub>2</sub>
Autana	35-60	NM	0,16	131,58	41,92
Autana (R1)	35-60	NM	0,19	127,85	40,80
Autana (R2)	35-60	NM	0,18	111,00	40,03
<b>Promedio</b>			0,18	123,48	40,92
<b>Desviación estándar</b>			0,01	10,96	0,94
<b>% Coeficiente variación</b>			7,07	8,88	2,31
Autana	60-120	NM	0,23	233,13	50,52
Autana (R1)	60-120	NM	0,21	257,40	52,05
Autana (R2)	60-120	NM	0,23	250,74	51,35
<b>Promedio</b>			0,22	247,09	51,30
<b>Desviación estándar</b>			0,01	12,54	0,76
<b>% Coeficiente variación</b>			4,02	5,08	1,49
Autana	120-230	NM	0,20	208,93	42,36
Autana (R1)	120-230	NM	0,24	209,82	42,46
Autana (R2)	120-230	NM	0,21	194,36	44,40
<b>Promedio</b>			0,22	204,37	43,07
<b>Desviación estándar</b>			0,02	8,68	1,15
<b>% Coeficiente variación</b>			8,38	4,25	2,67

**Tabla D.3.** Análisis de precisión para la fracción magnética y medianamente magnética.

Río	FG (mallas)	FM (A)	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% MnO	% TiO <sub>2</sub>	mg/Kg Nb
Ore	60-120	0,4	30,67	1,71	34,31	3550,36
Ore (R1)	60-120	0,4	29,75	1,86	34,25	3745,37
Ore (R2)	60-120	0,4	29,31	1,61	33,85	3470,56
		<b>Promedio</b>	29,91	1,73	34,14	3588,76
		<b>Desviación estándar</b>	0,69	0,12	0,25	141,37
		<b>%Coeficiente de variación</b>	2,32	7,09	0,73	3,94
Autana	35-60	0,4	34,54	2,73	44,64	5361,06
Autana (R1)	35-60	0,4	33,92	2,67	43,26	5309,38
Autana (R2)	35-60	0,4	33,94	2,46	43,29	5230,62
		<b>Promedio</b>	34,13	2,62	43,73	5300,35
		<b>Desviación estándar</b>	0,35	0,14	0,79	65,69
		<b>%Coeficiente variación</b>	1,46	5,49	1,81	1,24
Autana	35-60	0,8	25,74	1,96	47,22	5976,56
Autana (R1)	35-60	0,8	25,72	1,95	47,03	6078,72
Autana (R2)	35-60	0,8	25,66	1,94	46,55	6056,55
		<b>Promedio</b>	25,71	1,95	46,93	6037,28
		<b>Desviación estándar</b>	0,04	0,01	0,34	53,74
		<b>%Coeficiente variación</b>	0,18	0,49	0,73	0,89
Autana	120-230	0,8	26,76	2,15	45,69	5930,80
Autana (R1)	120-230	0,8	25,96	2,15	44,53	5945,03
Autana (R2)	120-230	0,8	26,86	2,15	45,01	5907,75
		<b>Promedio</b>	26,53	2,15	45,08	5927,86
		<b>Desviación estándar</b>	0,49	0,001	0,58	18,81
		<b>%Coeficiente variación</b>	2,05	0,03	1,29	0,32
Sipapo	60-120	0,8	25,44	1,88	47,02	4996,08
Sipapo (R1)	60-120	0,8	26,45	1,89	48,67	4880,11
Sipapo (R2)	60-120	0,8	26,50	1,90	47,69	5042,94
		<b>Promedio</b>	26,13	1,89	47,79	4973,04
		<b>Desviación estándar</b>	0,60	0,01	0,83	83,82
		<b>%Coeficiente variación</b>	2,49	0,67	1,73	1,69

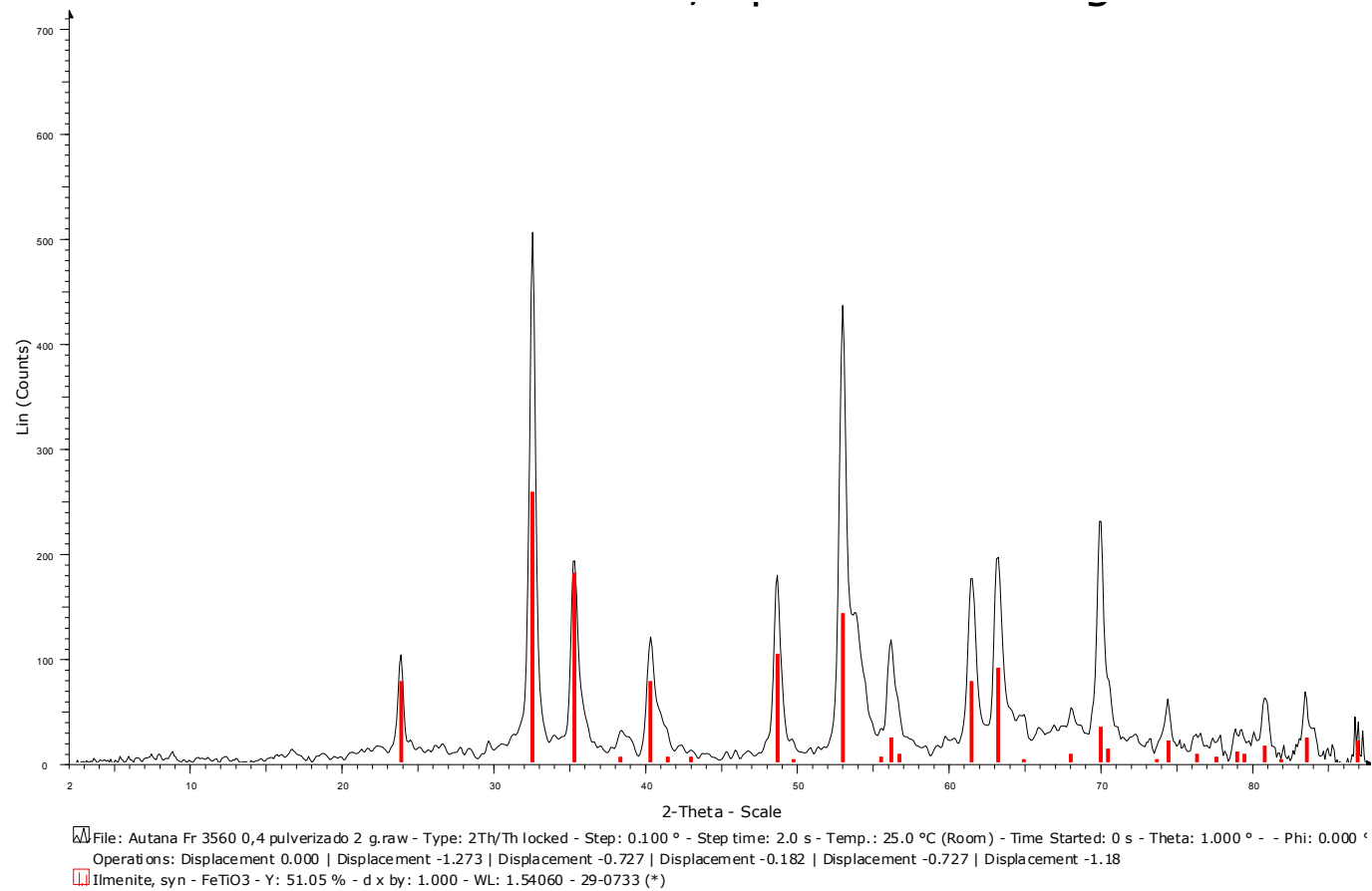
## APÉNDICE E- Espectros de Difracción de Rayos X

### SIMONERA FG 120-230 FM (0.4 A)



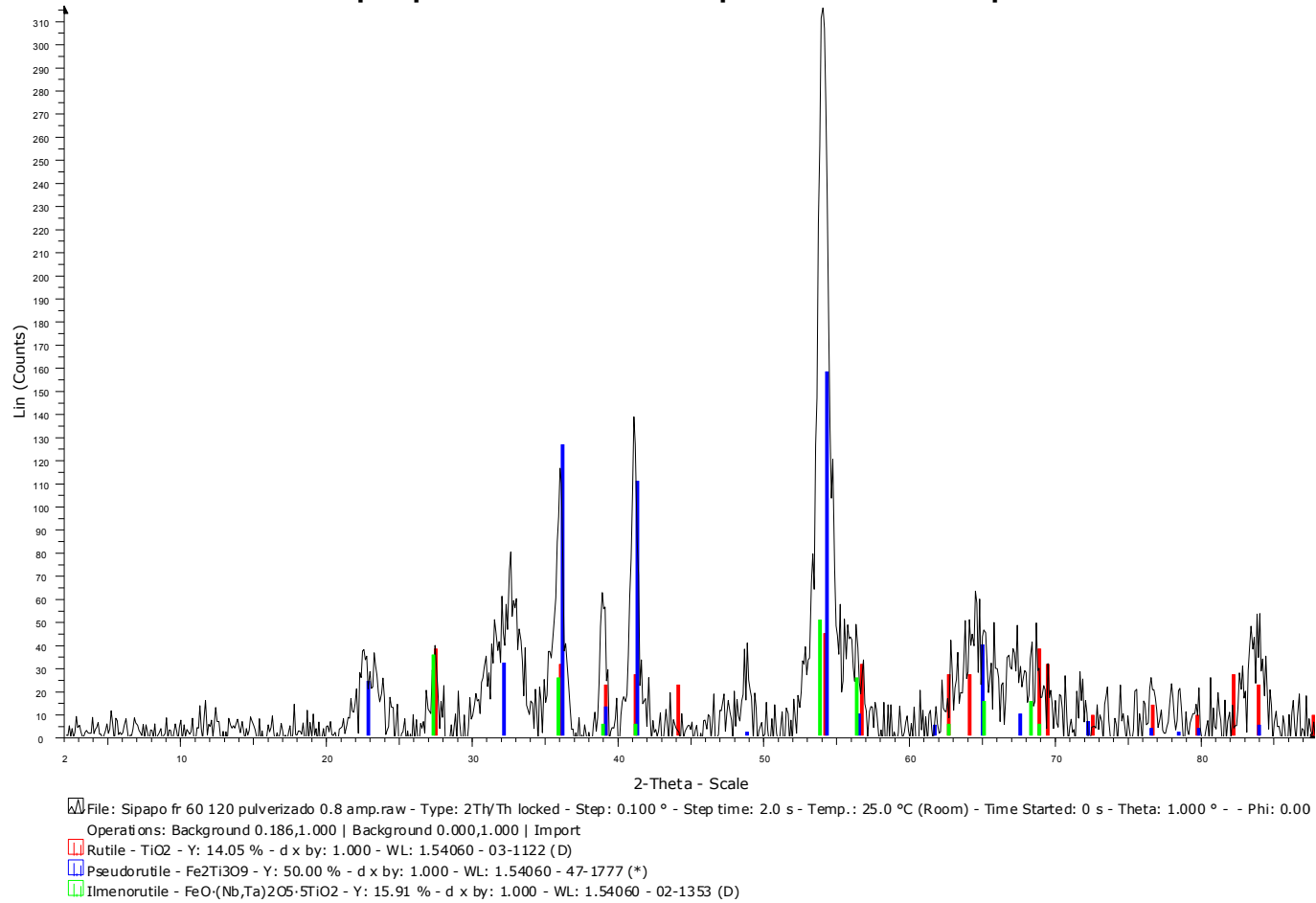
**Figura E1-** Espectro de difracción de rayos X. Muestra Simonera FG 120-230 FM (0.4 A)

# AUTANA FG 35-60 FM (0.4 A)



**Figura E2-** Espectro de difracción de rayos X. Muestra Autana FG 35-60 FM (0.4)

# ŞIPAPO FG 60-120 FM (0.8 Å)



**Figura E3-** Espectro de difracción de rayos X. Muestra Sipapo FG 60-120 FM (0.8 Å)

# MANIAPURE FG 60-120 FM (0.8 A)

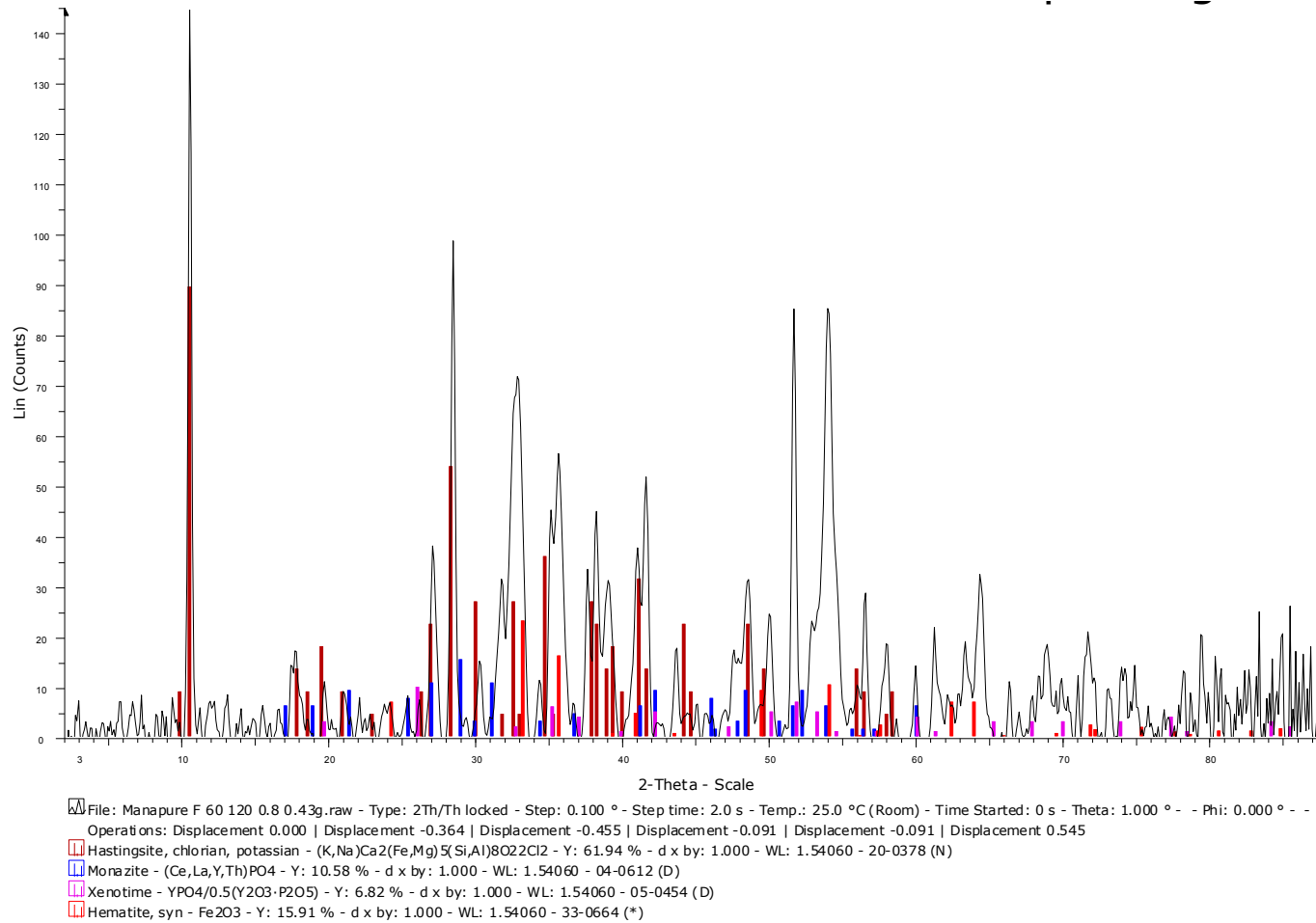
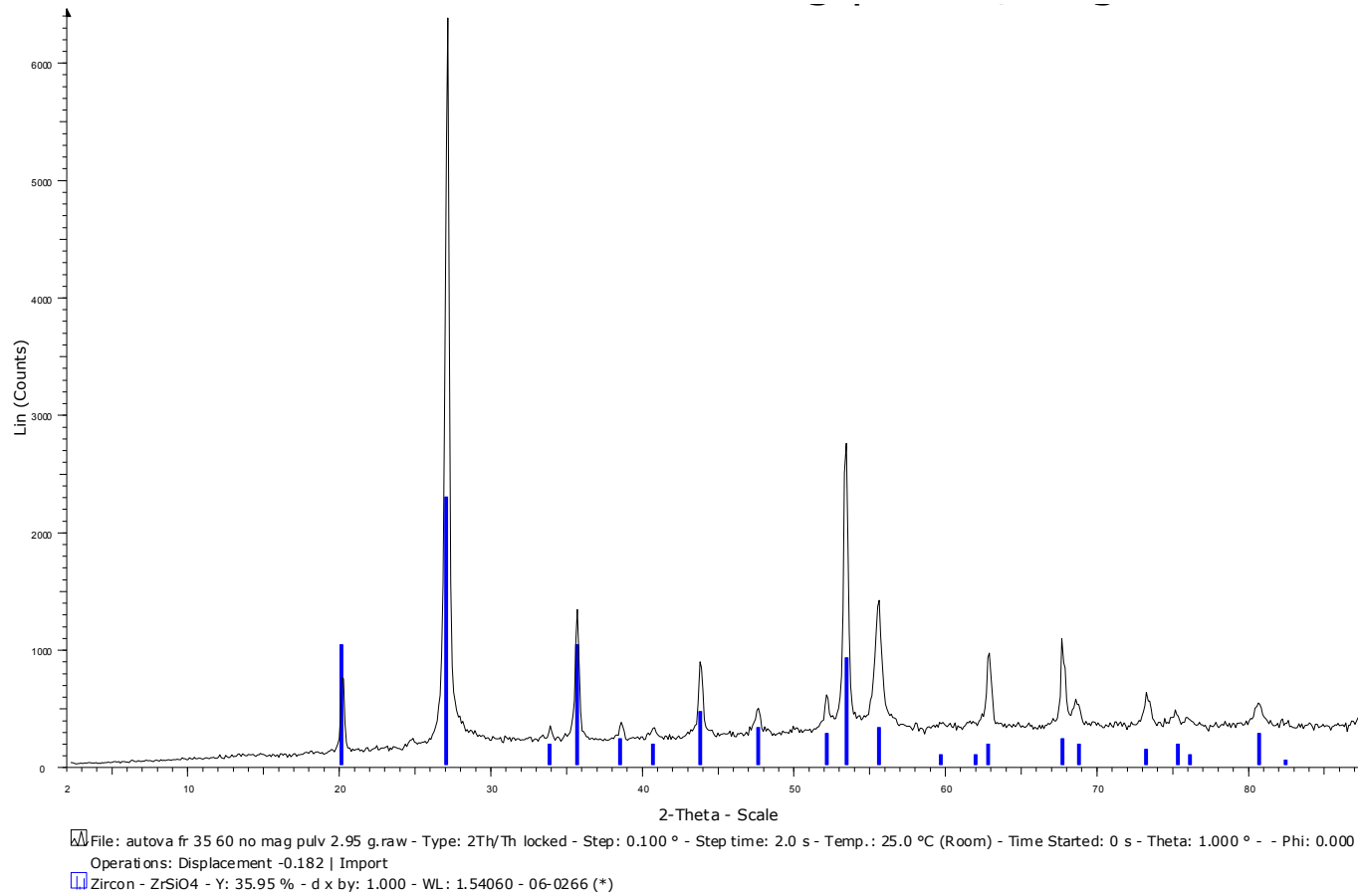


Figura E4- Espectro de difracción de rayos X. Muestra Maniapure FG 60-120 FM (0.8 A)

# AUTANA FG 35-60 NO-MAGNÉTICOS



**Figura E5-** Espectro de difracción de rayos X. Muestra Autana FG 35-60 No-magnéticos



# SIMONERA FG 120-230 NO-MAGNÉTICOS

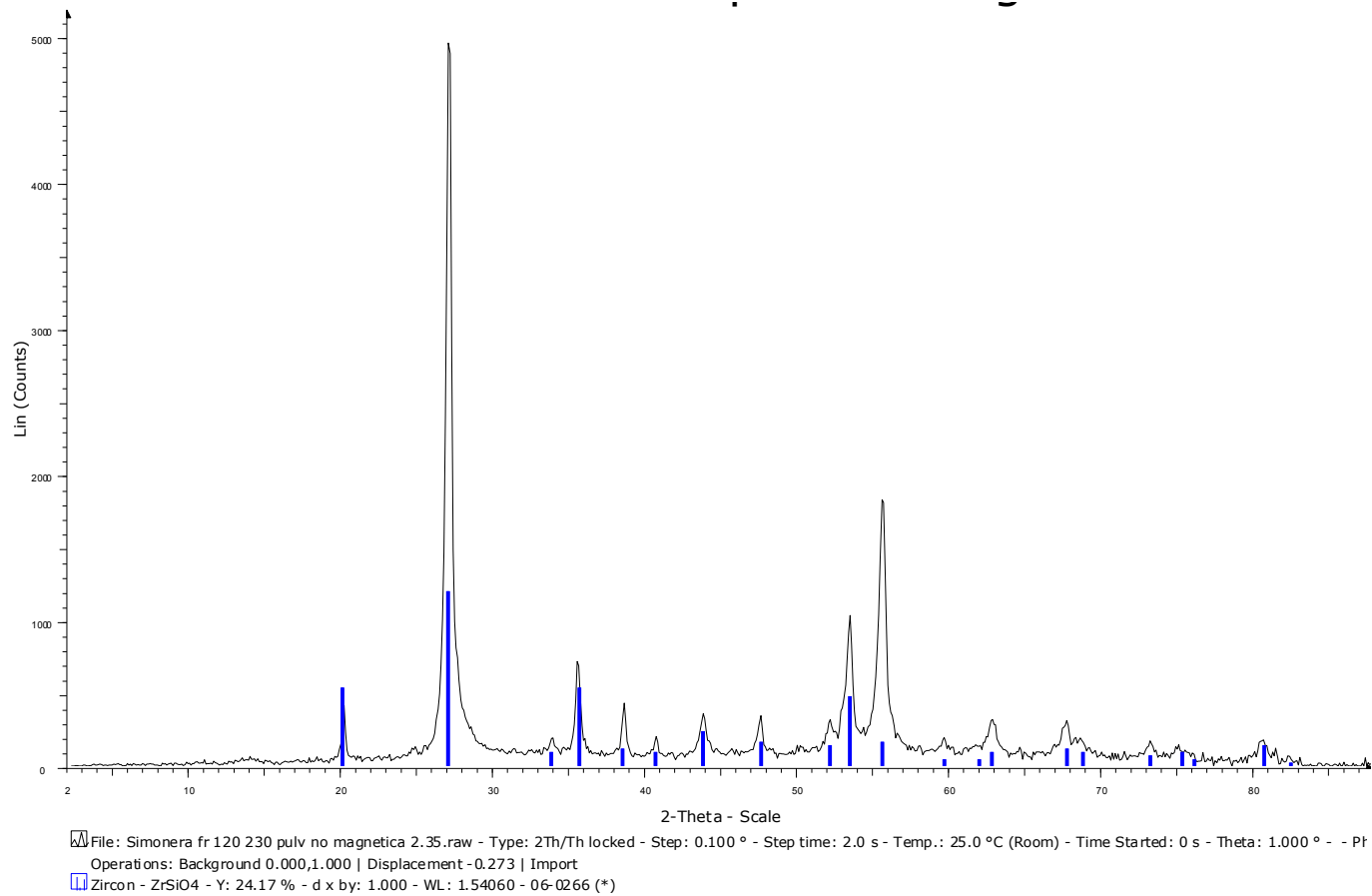
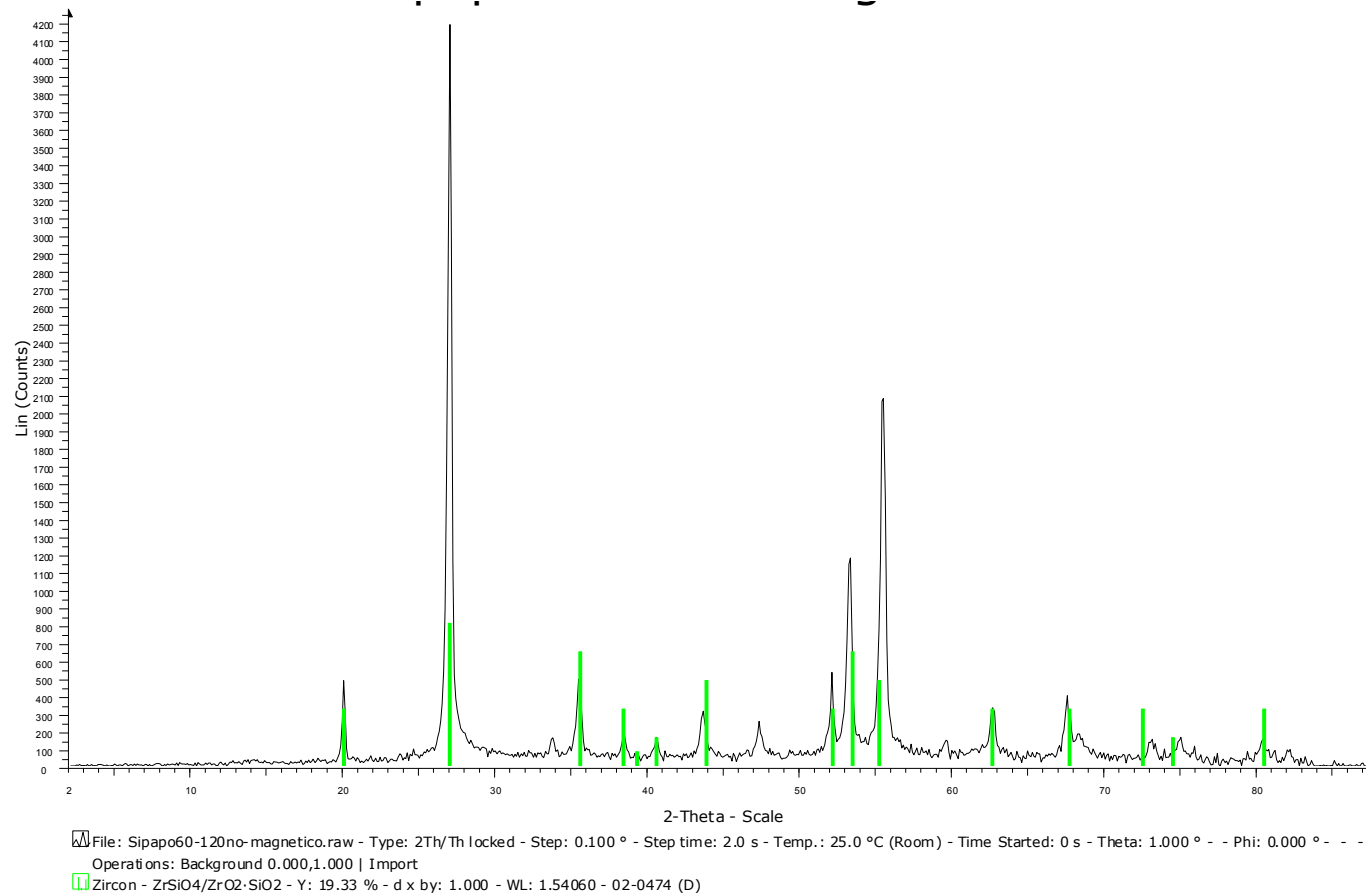


Figura E6- Espectro de difracción de rayos X. Muestra Simonera FG 120-230 No-magnéticos

# SIPAPO FG 60-120 NO-MAGNÉTICOS



**Figura E7-** Espectro de difracción de rayos X. Muestra Sipapo FG 60-120 No-magnéticos

**APÉNDICE F- Mapas de distribución de concentración elementales**