

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA DE LA ILMENITA Y  
MAGNETITA DE LOS CONCENTRADOS DE MINERALES PESADOS DE  
LAS CUENCAS DE LOS RIOS SUAPURE Y GUANIAMO DEL ESTADO  
BOLÍVAR**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al título de Ingeniero Geólogo  
por la Bra Pacheco R, Rotshira J

Caracas, Junio de 2013

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA DE LA ILMENITA Y  
MAGNETITA DE LOS CONCENTRADOS DE MINERALES PESADOS DE  
LAS CUENCAS DE LOS RIOS SUAPURE Y GUANIAMO DEL ESTADO  
BOLÍVAR**

Tutor Académico:

Prof. De Abrisqueta, Ander

Co-Tutor:

Prof. Hurtado, Ruthman

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
para optar al título de Ingeniero Geólogo  
por la Bra Pacheco R, Rotshira J

Caracas, Junio de 2013

**Pacheco R, Rotshira J**

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA DE LA ILMENITA Y MAGNETITA DE LOS CONCENTRADOS DE MINERALES PESADOS DE LAS CUENCAS DE LOS RIO SUAPURE Y GUANIAMO DEL ESTADO BOLÍVAR**

**Tutor Académico: Prof. Ander De Abrisqueta.**

**Co-Tutor. Prof. Ruthman Hurtado**

**Tesis, Caracas UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2013, 183p.**

**Palabras claves:** Guaniamo, Suapure, ilmenita manganífera, magnetita, columbita, Ilmenita-Nb

**Resumen:** Las ilmenitas y magnetitas estudiadas pertenecen a las cuencas de los ríos Guaniamo y Suapure ubicados al nor-occidente del estado Bolívar, la investigación contempló la caracterización morfológica y química de 31 muestras de sedimentos pesados recolectadas en esta zona. La investigación fue realizada en dos etapas mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido: la primera corresponde al análisis morfológico y consistió en la descripción morfológica de los granos de ilmenita a partir de la carta visual de esfericidad y redondez propuesta por Krumbein & Pettijhon (1938), la segunda, contempló el análisis químico de los granos determinando la concentración de los elementos mayoritarios, minoritarios ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ) y traza (V, Cr, Ni, Zr, Nb y Ta).

Los resultados obtenidos a partir del análisis morfológico fueron, para ambas cuencas una mayor ocurrencia de granos subangulares y pocos esféricos de hábito principalmente bipiramidales y tabulares y una población menos frecuente de granos subredondeados con mayor esfericidad. También se observó microtexturas típicas de ambientes fluviales como cráteres de impacto, variedad de fracturas, partículas adheridas (diatomeas) y huellas de disolución, esta última asociada principalmente a los granos subangulares. Específicamente las diatomeas se veían con mayor frecuencia en el alto Guaniamo y las huellas de disolución en la cuenca de Suapure. Así mismo, se observó las texturas de enrejado típicas en las soluciones sólidas entre la ilmenita-magnetita-hematita.

Los análisis químicos arrojaron como resultados tres grupos de ilmenitas: Grupo 1 Ilmenitas (0-5)% MnO las más frecuentes encontradas en todas las cuencas (Guaniamo, Cuchivero, Suapure, Parguaza); Grupo 2 y 3 Ilmenitas (10-15)% MnO y (15-30)% MnO respectivamente, encontradas específicamente en el alto Guaniamo, presentando exsoluciones de ulvoespinela, columbita, fergusonita-(Y). También, se determinaron tres grupos de Magnetitas: Magnetita con 99%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ulvoespinela (aproximadamente 70%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y Magnetita (1-5)%  $\text{V}_2\text{O}_5$ . A su vez las ulvoespinelas contienen entre (1-7)% MnO y están asociadas a las ilmenitas ricas en Mn del alto Guaniamo.

Finalmente, a partir de los datos obtenidos se proponen tres posibles rocas fuentes: el grupo 1 asociada a rocas graníticas, grupo 2 asociada a rocas alcalinas y el

grupo 3 asociada a rocas carbonatíticas o kimberlíticas, estando estos dos últimos relacionados genéticamente.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios! todo poderoso, por brindarme la fé y la paciencia necesaria para alcanzar esta gran meta.

A mis padres y mis hermanas, por apoyarme en todo momento, papitos gracias por enseñarme a luchar siempre y sobreponerme a los momentos difíciles. .

A la UCV y a cada profesor que formaron parte de mi desarrollo académico y en algunos casos me enseñaron grandes lecciones de vida.

Al Instituto Nacional de Geología y Minas de Venezuela (INGEOMIN), por darme la oportunidad de desarrolla esta valiosa investigación.

A mis tutores Ander De Abrisqueta y Ruthman Hurtado, gracias por todas las enseñanzas tanto académicas como de vida y por estar como mis guias durante el desarrollo de esta investigación.

Al Sr Orlando, quien fue de gran compañía y maestro y Tepedino quien fue portador de momentos gratos y de risa en el laboratorio.

A los profesores: Eduardo Greaves (USB) y William Melendez (UCV), quienes aportaron muestras importantes para el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Noel Mariño y al Ing. Valerio Guerrero, sus aportes fueron de gran importancia para el desarrollo de la investigación.

Al Prof. Luis Chacón, quien me asigno este tema de tesis.

A la Prof. Carolina y el Prof, Ricardo, quienes me han apoyado en todo momento, Gracias ustedes mas que profesores son como unos padres para mi.

A los Profesores: Lenin G, Enzo C, David M, Maria L, Sebastian G, Rafael F, Mederos, Humberto D, Luis F, F Urbani, gracias por responder a muchas dudas y en muchos casos por prestar apoyo en el desarrollo de la investigación.

A mi novio hermoso y su familia, mi oso estuviste en muchos momentos difíciles y me soportaste te agradezco eso y muchísimo mas te amo muchísimo! A tus padres muchas gracias por todo el apoyo!

A mis locas Karlita, Sarai, Mariale (Alozo), Karol, Marianto y Yera amigas!!!! Ustedes son lo máximo las quiero mucho, gracias!!!! por contar con ustedes en todo momento.

Al igual que mis locas de la resi, Joha, Leo y Ori gracias por todo. Y por último a mis amigos de la uni, Ali, Jhonda, Fercho, Yessy, Raul, Vicky, Rosbeidy, Laura, Andreina, muchachos ustedes formaron parte de mi vida :D y me ayudaron en todo momento Gracias.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron con el desarrollo de esta investigación,

a todos Muchas Gracias!

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.2	Objetivos Específicos .....	2
1.3	Ubicación del área de estudio.....	2
1.4	ANTECEDENTES.....	4
2.	METODOLOGÍA .....	14
2.1	Preparación de muestras para el estudio morfológico y químico .....	21
2.1.1	Estudio Morfológico .....	21
2.1.2	Estudio Químico.....	22
2.2	Análisis Morfológico en el MEB .....	25
2.3	Análisis Químico en el MEB.....	29
2.3.1	Tratamiento estadístico del análisis morfológico.....	31
2.3.2	Tratamiento estadístico del análisis químico .....	32
2	GEOLOGIA REGIONAL.....	34
2.1	Provincia de Imataca .....	35
2.2	Provincia de Pastora .....	37
2.3	Provincia de Roraima .....	41
2.4	Provincia de Cuchivero .....	45
	Asociación Cuchivero .....	45
	Asociación Suapure.....	46
	Granito Rapakivi del Parguaza.....	46
3	GEOLOGÍA LOCAL.....	54
3.1	Cuencas de los ríos Cuchivero – Guaniamo.....	54
3.2	Cuenca del río Suapure.....	58
4	MARCO TEÓRICO.....	65
4.1	Minerales Pesados .....	65
4.2	Estabilidad de los minerales pesados .....	66
4.3	Procesos controladores de la composición de los minerales pesados .....	67
4.4	Meteorización de la roca fuente .....	68
4.5	Mineral Pesado: Ilmenita $FeTiO_3$ .....	69
4.6	Mineral Pesado: Magnetita $Fe_3O_4$ .....	72
4.7	Formación de Depósitos y Ocurrencia .....	73
4.8	Alteración de la ilmenita y magnetita.....	74

4.9	Alteración de la magnetita.....	74
4.10	Magnetitas e Ilmenitas de diferentes tipos de rocas .....	76
4.11	Carbonatitas .....	77
4.12	Asociaciones minerales.....	78
4.13	Estabilidad de minerales en carbonatitas lateríticas .....	80
4.14	Kimberlitas.....	82
4.15	Pegmatitas radioactivas.....	83
2.1	Minerales radioactivos en las pegmatitas .....	85
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	86
4.1	Cuenca del río Guaniamo .....	86
4.1.1	Análisis Morfológicos.....	86
4.1	Cuenca del río Suapure.....	92
4.1.1	Análisis Morfológicos.....	92
4.2	Análisis Químico cuenca de los ríos Guaniamo y Suapure.....	97
4.2.1	Análisis químico Guaniamo.....	97
4.2.2	Análisis químico Suapure .....	103
4.3	Comparación química entre las cuencas adyacentes .....	106
4.3.1	Comparación química entre Guaniamo y Suapure.....	106
4.3.2	Comparación química entre Guaniamo y Cuchivero .....	109
4.3.3	Comparación química entre Guaniamo, Cuchivero y Suapure .....	109
4.3.4	Cluster de todas las cuencas (Guaniamo- Suapure-Cuchivero-Parguaza) 111	
4.4	Comparación química entre las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las estudiadas en otros trabajos.....	111
4.4.1	Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las estudiada por Grigsby, (1992).....	112
4.4.2	Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas de Kimberlitas por Kaminsky, F., et al. (2004).....	114
4.4.3	Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas de Cerro Impacto, estado Bolívar.....	116
4.4.4	Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las ilmenitas del Granito de Potrerillos, Badillo Argentina .....	118
4.1.1	Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las ilmenitas de la Kimberlita de Seguela, Côte d’Ivoire (Africa Occidental).....	119

4.1.2	Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas del Cerro siete Cabezas, Paraguay (Comin & De Barros, 2005) .....	122
4.1.3	Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas de la carbonatita de Jacupiranga, Brasil .....	123
4.1.4	Comparación química entre las picroilmenitas de Kaminsky et al. (2004) de Guaniamo con ilmenitas de la Kimberlita de Gerais, Brasil. ....	124
4.1.5	Asociación de minerales encontrados en las ilmenitas de los ríos Guaniamo y Suapure .....	125
4.2	Análisis químico Magnetitas (Guaniamo-Cuchivero-Suapure) .....	129
4.3	Comparación entre los análisis Morfológicos y químicos de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure .....	132
4.4	Análisis final.....	133
5.	CONCLUSIONES .....	140
6.	RECOMENDACIONES .....	142
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
	APÉDICE A .....	151
	APÉDICE B .....	153
	APÉNDICE D (Microtexturas Morfológicas) .....	166
	APÉNDICE E (Texturas químicas) .....	171
	APENDICE F (Lista de minerales por muestra en el estudio morfológico).....	174
	APENDICE G .....	175

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Mapa de Ubicación, Cuencas Nor-Occidentales del Estado Bolívar. Tomado de Gamero &amp; Reveti (2011)</i> .....	3
Figura 2: <i>Diagrama ternario con los tres tipos de granos. Tomando de (Grigsby, 1990).</i> .....	7
Figura 3: <i>Mapa territorial construido desde dos funciones discriminatorias canónicas calculado por las variables MnO, TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> del conjunto de granos detríticos de ilmenita. Nota la buena separación de los granos de las rocas ígneas félsicas y rocas ígneas máficas. Tomado de (Grigsby, 1992).</i> .....	9
Figura 4: <i>Mapa de zonas anómalas. Tomado de GAMERO &amp; REVETY (2011)</i> .....	12
Figura 5: <i>Mapa de ubicación de los puntos de muestreo, cuenca Nor-Occidental el estado Bolívar.</i> .....	17
Figura 6: <i>Separación magnética manual</i> .....	19
Figura 7: <i>Separador magnético tipo Frantz (INGEOMIN)</i> .....	20
Figura 8: <i>Fracciones magnéticas 0,4 amps y manual</i> .....	21
Figura 9: <i>Esquema de la preparación de las muestras para estudio morfológico</i> .....	22
Figura 10: <i>A) Preparación de baquelitas en la prensa. B) Pulidora</i> .....	23
Figura 11: <i>A) Evaporador al vacío (Jeol, JEE-4X) y B) Baquelitas recubiertas con grafito</i> .....	24
Figura 12: <i>Microscopio electrónico de barrido (Jeol JSM-5910 LV) equipado con un espectrómetro de rayos X (MEB-EDX). (INGEOMIN)</i> .....	25
Figura 13: <i>A) Imagen adquirida del grano completo. B) ampliación de una microtextura</i> .....	26
Figura 14: <i>Imagen con detectores retrodispersados, en la imagen se observa la diferencia de densidades entre los minerales de ilmenita y la monacita.</i> .....	30
Figura 15: <i>Imagen del análisis químico, tabla de composición, puntos de análisis y espectro</i> .....	31
Figura 16: <i>Mapa de Provincias Geológicas del Escudo de Guayana. Tomado de (Mendoza, 2005)</i> .....	34
Figura 17: <i>Mapa geológico esquemático del Complejo de Imataca al oeste de río Caroní. Tomado de (Dogan, 1972)</i> .....	35
Figura 18: <i>Complejo de Imataca fajas tectónicas. (Ascanio, 1975)</i> .....	36
Figura 19: <i>Evolución magmática de Granitos Rapakivis del Parguaza. Tomado de Mendoza (2005)</i> .....	48
Figura 20: <i>Evolución geodinámica de Imataca (1ª etapa) por compresión entre placas oceánicas con cambio de subducción a la izquierda y (2da etapa) sucesiva sobre posición o aglutinación de los arcos o microcontinentes formando parte del supercontinente Guayanensis o Valvaara o Kenoriano. Tomado de (Mendoza, 2005)</i> .....	50
Figura 21: <i>Estructura domica de los granitos sódicos del Complejo Supuamo y los sinformes de CRV de Pastora y Botanamo, b) cierre del océano y colisión de los CRV de Pastora y Botanamo contra el continente Imataca. La zona de colisión está representada por la Falla o Sutura del Guri al NE y de Takutu al SW. (Tomado de Mendoza, 2005)</i> .....	53

Figura 22: Mapa Geológico de Guaniamo- Cuchivero (tomado de la U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1109. Publicado 2006 en línea) .....	57
Figura 23: Mapa Geológico Suapure – Parguaza (tomado de la U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1109. Publicado 2006 en línea) .....	60
Figura 24: acta.....	60
Figura 25: A) megafactura que controlaron el emplazamiento de Carbonatitas y Kimberlitas en la provincia geológica Cuchivero y B) localización estructural o controlada de kimberlitas en el área de Quebrada Grande, Guaniamo, Distrito Cedeño, Estado Bolívar (Tomado de Rodríguez, 1997) .....	62
Figura 26: Mapa geológico de Cerro Impacto. Tomado de la U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1109. Publicado 2006 en línea.....	64
Figura 27: Esquema de los procesos que operan durante el ciclo de sedimentación. Tomado de (Morton & Hallsworth, 1999) .....	68
Figura 28: Estructura cristalina ilmenita. <a href="http://www.jcrystal.com">http://www.jcrystal.com</a> .....	70
Figura 29: Representación del sistema triangular FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub> , acordado por (GARNAR, 1978; Tomado de Elsner, 2010). No hay análisis conocidos de minerales de Ti en el campo negro. ....	71
Figura 30: Estructura cristalina de la Magnetita. <a href="http://www.geocities.jp">http://www.geocities.jp</a> .....	72
Figura 31: Evolución de los diferentes caminos de alteración de detritos de minerales pesados opacos; ilmenita, hematita, magnetita y titanomagnetita, en relación a los ambientes geoquímicos. (Mange & Wright, 2007) .....	75
Figura 32: Grano de hematita con poco Ti, con textura martita solución sólida magnetita-ulvoespinela. Quaternary, Shagra Fm, Egypt. Tomado de <a href="http://geography.lancs.ac.uk">http://geography.lancs.ac.uk</a> .....	76
Figura 33: Relación geológica entre carbonatitas y foscoritas. Tomado de Amelin & Zaitsev (2002).....	79
Figura 34: Esquema de un tubo o diatrema de Kimberlita Imagen tomada de: <a href="http://www.nature.com/">http://www.nature.com/</a> .....	83
Figura 35: Histograma de redondez cuenca Guaniamo .....	86
Figura 36: Histograma de esfericidad cuenca Guaniamo .....	87
Figura 37: Grano de ilmenita que representa la fracción mixta subangular - subredondeado .....	87
Figura 38: Histograma representativo de la geometría de las ilmenitas presente en el río Guaniamo .....	88
Figura 39: Grano de ilmenita hábito bipiramidal del río Guaniamo .....	89
Figura 40: Grano de ilmenita hábito tabular del río Guaniamo .....	89
Figura 41: Grano de ilmenita con cráteres de impactos.....	90
Figura 42: Grano de ilmenita muy meteorizada .....	91
Figura 43: A) Grano de ilmenita río Guaniamo con diatomeas adheridas al grano; B) Ampliación de Diatomeas .....	91
Figura 44: A) Grano de ilmeno-magnetita con textura exsolución tipo enrejado triangulares; B) Ampliación textura de exsolución .....	91
Figura 45: A) Grano de ilmenita con huellas de disolución; B) Detalle de huella de disolución .....	92

Figura 46: A) Grano de ilmenita con facetas escalonadas; B) Ampliación de las facetas escalonadas.....	92
Figura 47: Histograma de redondez cuenca Suapure .....	93
Figura 48: Histograma de esfericidad cuenca Suapure .....	93
Figura 49: Histograma representativo de la geometría de las ilmenitas presente en el río Suapure.....	94
Figura 50: Grano de ilmenita hábito bipiramidal del río Suapure. ....	94
Figura 51: Grano de ilmenita hábito tabular del río Suapure. ....	95
Figura 52: A) Grano de ilmenita con huellas de disolución y a su vez huellas de impacto; B) Detalle de las huellas de disolución.....	96
Figura 53: A) Grano de ilmenita con fracturas concoideas. B) Detalle de las fracturas. ....	96
Figura 54: A) Grano de ilmenita con hábito tabular. B) Detalle del hábito. ....	97
Figura 55: Histograma de frecuencia % p/p MnO en ilmenitas de la cuenca del río Guaniamo .....	98
Figura 56: Histograma de frecuencia % p/p Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> de la cuenca del río Guaniamo ..	98
Figura 57: Diagrama FeO* vs TiO <sub>2</sub> ilmenitas de Guaniamo .....	99
Figura 58: Diagrama de correlación cuenca de Guaniamo .....	101
Figura 59: Histograma de frecuencia % p/p MnO en ilmenitas de la cuenca del río Suapure .....	103
Figura 60: Histograma de frecuencia % p/p Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> en ilmenitas de la cuenca del río Suapure .....	104
Figura 61: Diagrama TiO <sub>2</sub> vs FeO* ilmenitas de Suapure – Pijiguaos.....	104
Figura 62: Diagrama de Correlación cuenca Suapure.....	105
Figura 63: Comparación entre la composición química de la Ilmenita de Guaniamo y las ilmenitas de Suapure, diagrama FeO* vs MnO. ....	108
Figura 64: Comparación entre la composición química de la Ilmenita de Guaniamo y las ilmenitas de Cuchivero, diagrama FeO* vs MnO.....	109
Figura 65: Comparación entre la composición química de la Ilmenita de Guaniamo, Cuchivero y Suapure, diagrama FeO* vs MnO.....	110
Figura 66: Comparación entre las ilmenitas de GRIGSBY, J (1992) y la zona en estudio .....	113
Figura 67: Diagrama FeO* vs MnO, comparación química de la Ilmenita de la Kimberlita de Guaniamo estudiada por KAMINSKY et al. (2004) y las ilmenitas de Guaniamo estudiadas en este trabajo .....	115
Figura 68: Histogramas de frecuencia % p/p Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ilmenitas de Cerro Impacto... ..	116
Figura 69: Diagrama de Correlación Cerro Impacto.....	118
Figura 70: Comparación entre la composición química de la Ilmenita yacimiento de Badillo, Argentina estudiada por Sardi (2003) y las ilmenitas de Guaniamo, Cuchivero y Suapure, diagrama FeO* vs MnO.....	120
Figura 71: Comparación entre la composición química de la Ilmenita de la Kimberlita Seguela, Allialy, M., et al. (2011) y las ilmenitas estudiadas en este trabajo, diagrama FeO* vs MnO.....	121

Figura 72: Comparación entre la composición química de la Ilmenita del Cerro siete Cabezas Comin & De Barros (2005) y las ilmenitas estudiadas en este trabajo, diagrama $FeO^*$ vs $MnO$ .....	123
Figura 73: Comparación entre la composición química de la Ilmenita Jacupiranga estudiada por Gaspar & Wyllie (1983) y las ilmenitas estudiadas en este trabajo, diagrama $FeO^*$ vs $MnO$ .....	124
Figura 74: Diagrama de comparación entre ilmenitas de la Kimberlita de Brasil y las analizadas por Kaminsky (2004). ....	125
Figura 75: A): Grano de ilmenita m29 con exsoluciones de ulvoespinela y columbita B) Ampliación exsoluciones de ulvoespinela con columbita. Ilm = Ilmenita; Col = Columbita; Ulv = Ulvoespinela.....	127
Figura 76: Grano con borde de alteración de rutilo y núcleo ilmenita. Ilm=ilmenita; Rt=Rutilo.....	128
Figura 77: Grano de ilmenita con inclusiones de circones. Ilm= ilmenita; Zrn=Circón. ....	128
Figura 78: Diagrama $FeO^*$ vs $TiO_2$ de las magnetitas de Cuchivero, Guaniamo y Suapure. ....	130
Figura 79: Diagrama $TiO_2$ vs $MnO$ de granos de ulvoespinela de Guaniamo y exsoluciones de ulvoespinela de ilmenitas de Guaniamo. ....	131
Figura 80: Diagrama $TiO_2$ vs $MnO$ de granos de ulvoespinela de Guaniamo, exsoluciones de ulvoespinela de ilmenitas de Guaniamo con las magnetitas de Cerro 7 Cabezas de Comin & De Barros (2005) .....	132
Figura 81: Diagrama $FeO^*$ vs $MnO$ de todas las cuencas Nor-occidental del estado Bolívar.....	133
Figura 82: Diagrama $FeO^*$ vs $MnO$ error típico de todas las cuencas Nor-occidental del estado Bolívar. Grupo1 (0-5)% $\pm$ 2,34 de $MnO$ , grupo 2 (6-13)% $\pm$ 3,99 de $MnO$ , grupo 3 (14-24)% $\pm$ 2,34 de $MnO$ y grupo 4 (30-35)% $\pm$ 2,34 de $MnO$ . ....	134
Figura 83: Mapa de CVG TECMIN (1994). Cuerpos circulares posibles carbonatitas.....	137
Figura 84: Mapa de Ubicación de las ilmenitas-Mn, Guaniamo.....	138
Figura 85: Mapas de Mapa de CVG TECMIN (1994), solapado con el mapa de la zona de estudio. Cuerpos circulares de posibles carbonatitas. ....	139

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Renombramiento de las muestras y ubicación</i> .....	15
Tabla 2: <i>Nombre de las muestras separadas en las fracciones manual y 0,4 amps</i> ...	18
Tabla 3: <i>Minerales separados por el Frantz de acuerdo a Hess (1959)</i> .....	20
Tabla 4: <i>Clasificación de tamaño de grano según HALLSWORTH &amp; KNOX (1999)</i> .....	27
Tabla 5: <i>Tabla visual de esfericidad y redondez de granos. Según Krumbein &amp; Pettijhon (1938)</i> .....	28
Tabla 6: <i>Tabla de clasificación de geometría de los granos según Zingg (1935)</i> .....	28
Tabla 7: <i>Muestras agrupadas por cuencas</i> .....	31
Tabla 8: <i>Evolución Geológica estructural de Guaniamo (modificada por Channer, 2001)</i> .....	56
Tabla 9: <i>Minerales pesados detríticos en areniscas. Tomado de Boggs,(2009)</i> .....	65
Tabla 10: <i>Características más resaltantes de algunos minerales pesados. Tomado de: Deer et al. (1970) y Hulburt y Klein (1991)</i> .....	66
Tabla 11: <i>Composición mineral en una sucesión típica de las zonas pegmatita (Heinrich, 1966)</i> .....	84
Tabla 12: <i>Lugares donde se presentan lo principales minerales radiactivos hipogénicos de las pegmatitas (Heinrich, 1966)</i> .....	85
Tabla 13: <i>Asociación de minerales encontrados en las ilmenitas de los ríos Guaniamo y Suapure</i> .....	126
Tabla 14: <i>Asociación de minerales con roca fuente</i> .....	129

## **1. INTRODUCCIÓN**

La explotación minera constituye la segunda actividad económica más importante del país, siendo la región del escudo de Guayana la que provee el mayor aporte económico en esta área de Venezuela, de ella se extrae hierro, aluminio, manganeso, estaño, oro y diamante, sin embargo, a pesar de ser la zona con mayor recursos mineros del país aun existen regiones poco estudiadas que resultan ser áreas con grandes acumulaciones de metales, como las cuencas de los ríos Suapure y Guaniamo del estado Bolívar con depósitos de carbonatitas y kimberlitas (Rodríguez, 1997). En diversas investigaciones han utilizado las características químicas de algunos minerales para diagnosticar estos depósitos, por ejemplo: (Kaminsky, 2009) y (Allialy, 2011) propone la ilmenita-Mg como un mineral indicador de depósitos kimberlíticos. Por otra parte, (Gaspar & Wyllie, 1983) proponen la ilmenita-Mn como mineral diagnóstico de cuerpos carbonatíticos y por último (Grigsby, 1990) utiliza magnetitas detríticas para determinar diferentes rocas de proveniencia.

En Venezuela no se han efectuado estudios sobre la caracterización química de estos minerales que permitan relacionarlos con cierto tipo de litología, por esta razón y a partir de la hipótesis planteada por (Gamero & Reveti, 2011), sobre las anomalías de MnO en el área de Guaniamo – Suapure asociadas posiblemente a la fase mineral ilmenita, en este trabajo se realizará una caracterización geoquímica y morfológica de las ilmenitas y magnetitas provenientes de esta zona. La investigación se realizará mediante la descripción morfológica de los granos, la determinación de la concentración de los elementos mayoritarios y minoritarios y finalmente mediante comparaciones químicas con otras ilmenitas y magnetitas de zonas aledañas (cuencas de los ríos Cuchivero, Aro, Parguaza) y de otras partes del mundo (Brasil, Paraguay, Argentina), se establecerán posibles asociaciones de proveniencia.

## 1.1 Objetivo General

Caracterizar química y morfológicamente la ilmenita y magnetita, presente en los concentrados de minerales pesados de las cuencas de los ríos Guaniamo y Suapure del estado Bolívar, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido acoplado a un espectrómetro de rayos-X de energía dispersiva (MEB-EDS).

## 1.2 Objetivos Específicos

- Describir la morfología de los granos de ilmenita y magnetita, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Determinar la concentración de los elementos mayoritarios y minoritarios ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ) y traza (V, Cr, Ni, Zr, Nb y Ta) en los granos de ilmenita y magnetita, mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido acoplado a un espectrómetro de rayos-X de energía dispersiva.
- Estudio comparativo de las ilmenitas y magnetitas presentes en las cuencas de los ríos Guaniamo y Suapure del estado Bolívar con: otras recolectadas en cuencas adyacentes (cuencas de los ríos Parguaza, Cuchivero, Aro), las presentes en rocas de Cerro Impacto, Granito de Pijiguao y Kimberlita de las Minas de Gerais- Brasil y las encontradas en la literatura principalmente (Kimberlita de Guaniamo - Kaminsky, Carbonatita del Complejo Jacupiranga - Brasil, Granito de Badillo - Argentina, Cerro Siete Cabezas - Paraguay)

## 1.3 Ubicación del área de estudio

La zona de estudio está ubicada al noroccidente del estado Bolívar, Venezuela y está demarcada entre las siguientes coordenadas geográficas:

**Longitud:** 66° 30' 00" O – 67° 30' 00" O

**Latitud:** 8° 0' 00" N – 5° 30' 00" N



Figura 1: Mapa de Ubicación, Cuencas Nor-Occidentales del Estado Bolívar. Tomado de Gamero & Reveti (2011)

## 1.4 ANTECEDENTES

### a. PRINS, P. (1972). **Composición de la magnetita de Carbonatitas. (Composition of magnetite from carbonatites)**

El autor establece que las magnetitas que provienen de carbonatitas son más pobres en Ti que el resto que provienen de rocas ígneas. Su contenido de elementos traza, Mn, Mg, V, Al y Ca que varían considerablemente, pero se encuentran dentro del intervalo de concentración de la de otros óxidos ígneos Fe/Ti. Los estudios de microanálisis con sonda de electrones en magnetitas provenientes de carbonatitas demostraron que son invariablemente zonadas con una disminución general en Ti, Mn, Mg, Ca hacia los límites de su grano. Estas tendencias, excepto la de Ca, es considerado como un reflejo de los cambios en la composición química de su entorno de crecimiento. Sin tendencia general de V o del Al, ya que algunos óxidos de hierro-titanio tienen bordes enriquecidos en estos elementos, mientras que otros muestran zonas empobrecidas del Al y V. La composición de magnetita e ilmenita exsueitas indican temperaturas tan bajas como 550 ° C y fugacidades de oxígeno del orden de  $10^{-23}$  atm durante el proceso de exsolución. Las fases ilmenita exsueitas son, enriquecidas en Mg, Mn, pero más pobre en Ca y Al.

### b. GASPAR, J. & WYLLIE, P. (1983). **Ilmenita con alta concentración de Mg, Mn, Nb proveniente de la carbonatita del Complejo Jacupiranga, Brasil. (Ilmenite (high Mg, Mn, Nb) in the carbonatites from the Jacupiranga Complex, Brazil).**

El autor realizó un estudio de las ilmenitas provenientes de las carbonatitas del Complejo de Jacupiranga en Brasil, obtuvo varios grupos de ilmenita que dependen de la composición química, un grupo de estas ilmenitas están en solución sólida entre  $\text{FeTiO}_3$  -  $\text{MgTiO}_3$  -  $\text{MnTiO}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y poseen altas concentraciones en Nb por encima de 3,68% ( $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5$ ). Otro grupo se distingue por una alta concentración en  $\text{MnTiO}_3$  (MnO 15,1-19,6)% y otro grupo que posee una composición de  $\text{FeTiO}_3$  -  $\text{MgTiO}_3$ , con  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  por debajo del 10%. El  $\text{Nb}^{+5}$  y  $\text{Ta}^{+5}$  reemplazan el  $\text{Ti}^{+4}$  en la

Ilmenita causando deficiencia catiónica. En la coexistencia de la magnetita e ilmenita, la distribución del MgO y MnO está preferencialmente en la ilmenita. Las ilmenitas de las carbonatitas se distinguen de las ilmenitas de las kimberlitas por la alta concentración de MnO (16-20)%, muy bajo Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y alto (Nb<sub>2</sub> + Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

**c. GASPAR, J. & WYLLIE, P. (1983). Magnetitas del Complejo Carbonatítico de Jacupiranga Brasil. (Magnetite in the carbonatite from the Jacupiranga Complex, Brazil)**

El autor realizó un estudio de las magnetitas que provenían de 5 intrusiones carbonatíticas del Complejo de Jacupiranga, Brasil, y obtiene composiciones entre la magnesioferrita-magnetita. Las magnetitas de otras carbonatitas similares contienen más Ti aproximadamente entre (2-11)% y menos Mg (1,07-6,20)%, las de Jacupiranga poseen Ti (0,14-1,54)% y Mg (2-9,26)%. El MgO de las magnetitas de Jacupiranga no es mayor al 10%.

**d. TORRES, J. (1984). Geoquímica de los resistatos pesados del río Paragua, estado Bolívar**

Torres (1984), estudió las características geoquímicas de las diferentes fases mineralógicas presentes en los resistatos pesados de la cuenca del río Paragua, estado Bolívar, aplicando una serie de métodos para la separación de los minerales pesados (preconcentrado con bateas, separación con bromoformo y separación magnética) obteniendo principalmente ilmenorutilo, circón y como minerales accesorios rutilo, anatasa y la variedad de ilmenita rica en magnesio (geikielita). Las técnicas aplicadas para el análisis de los minerales mayoritarios, fue DRX y FRX para los minerales accesorios se realizó el estudio mediante la técnica de MEB (SEM) debido a la pequeña cantidad de material. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: el ilmenorutilo encontrado tenía una composición química con cantidades de manganeso y niobio (1,05% Mn y 0,022% Nb), esta proporción aumentaba en las variedades menos magnéticas. Por otra parte, la variedad ilmenítica presentaba alrededor del 1% de Mg.

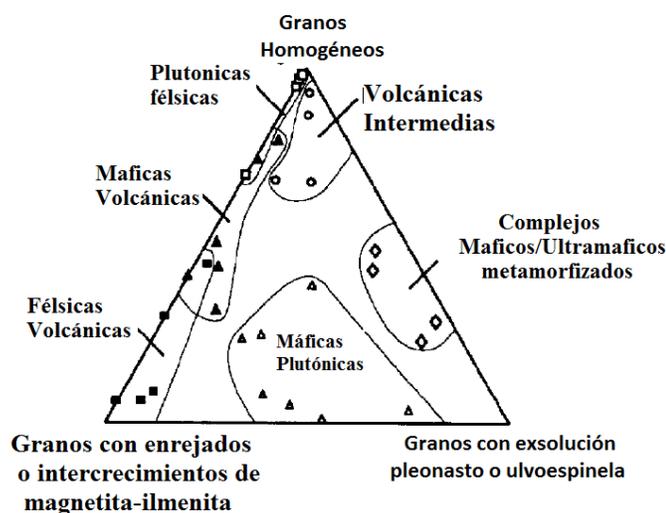
**e. DEL OLLO, D. (1988). Geoquímica de las rocas conglomeráticas y arenaceas de la Formación Uairen (Precámbrico) en la región la Hoyada-Paraitepuy, estado Bolívar, Venezuela**

Del Olla (1988), realizó un estudio del potencial minero de la Formación Uairén en la región La Hoyada-Peraitepuy, estado Bolívar, trabajó con sedimentos pesados y los analizó con las técnicas de DRX, FRX con detector de Si(Li) y microscopia electrónica de barrido (MEB). El análisis mineralógico, dió como resultado la identificación de los siguientes minerales: hematita, circón, ilmenita, rutilo y casiterita. Por otra parte, determinó la presencia de Ce, Y, La, Ba, P, Th y Al, elementos constituyentes de fosfatos de tierras raras como: florencita, monacita y xenotima, minerales asociados a carbonatitas. Por último, encontró una correlación entre el U, Th y Zr, lo cual indica una asociación del uranio y torio con la fase mineral circón; igual correlación encontró entre los elementos Mn, Nb y Ti, sugiriendo que el niobio y el manganeso están incorporados a la estructura de los minerales ilmenita y rutilo. El autor concluye que la Formación Uairén recibió aporte de sedimentos de varias fuentes: una fuente principal de sedimentos de composición granítica, una contribución de rocas ultramáficas, un aporte de rocas de tipo carbonatítico y un aporte de origen metamórfico.

**f. GRIGSBY, J. (1990). Magnetita detritica como un indicador de proveniencia. (Detrital magnetite as a provenance indicator).**

El autor realizó, un estudio sobre granos de magnetitas para establecer la roca de procedencia, ya que según el autor en este mineral queda una huella dactilar petrográfica y química que puede ser utilizada para este tipo estudios. Analizó 2941 granos de magnetitas en arenas del Holoceno provenientes de rocas félsicas, plutónicas y volcánicas, volcánicas intermedia, plutónicas y volcánicas máficas y metamórficas máficas / ultramáficas encontrando que el 58% eran poliminerálicas. Las arenas provenientes de rocas volcánicas félsicas son caracterizadas por granos compuestos o enrejados tipo intercrecimiento de magnetitas e ilmenita, mientras las arenas provenientes de rocas plutónicas máficas y metamórficas maficas/ultramaficas

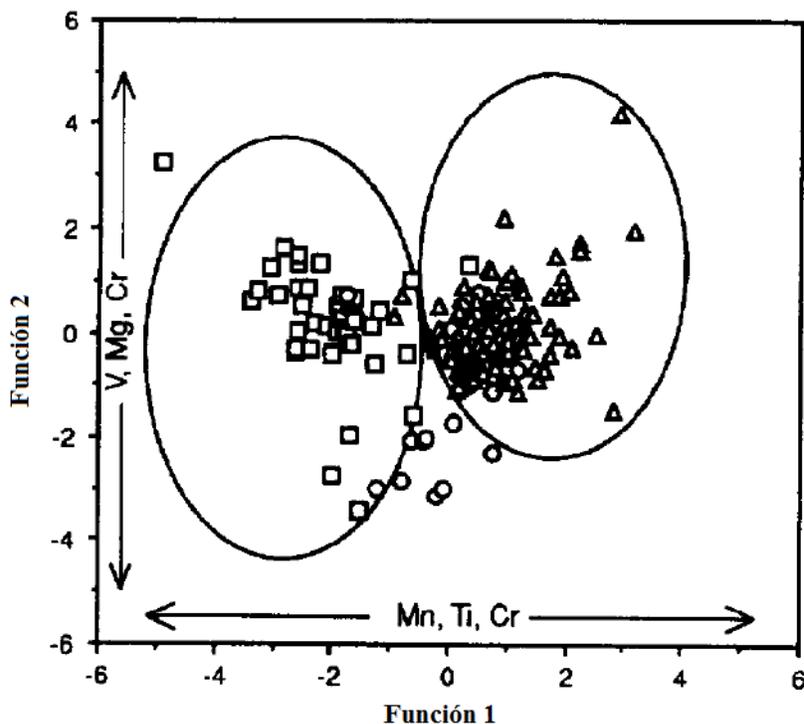
son caracterizadas por granos con exsoluciones de pleonasto o ulvoespinela. Los granos monomineral (homogéneos) son característicos de arenas provenientes de rocas plutónicas félsicas y fuentes volcánicas intermedias. Un diagrama ternario (Figura 2), donde cada esquina es representada por granos homogéneos, granos con enrejados o intercrecimientos de magnetita-ilmenita y granos con exsoluciones de pleonasto o ulvoespinela, agrupan correctamente los granos de roca madre en estos campos con una mínima superposición. También analizaron 433 granos homogéneos por microsonda de electrones, identificando la presencia de una huella digital química, esta huella radica en la composición química de los granos de magnetita que varía según su roca de origen. Las etapas de análisis de función discriminante encontró que  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $V_2O_3$  y  $Al_2O_3$ , es la mejor manera de discriminar entre los granos de magnetita detríticos de félsicas plutónicas y volcánicas, volcánicas intermedias y máficos. A través de ese control pudieron clasificar los granos de magnetitas el 98% de las veces. Sin embargo, los granos de origen volcánico máficos y metamórficos de fuentes máficas / ultramáficas no eran químicamente distinto, haciendo hincapié en la importancia de integración del análisis petrográficos y químicos en la investigación de procedencia.



**Figura 2:** Diagrama ternario con los tres tipos de granos. Tomando de (Grigsby, 1990).

**g. GRIGSBY, J (1992). Huella química en ilmenitas detríticas: ¿una alternativa viable en investigaciones de procedencia? (Chemical fingerprinting in detrital ilmenite: a viable alternative in provenance research?)**

El autor realizó un estudio sobre detritos de ilmenita en donde establece que este mineral tiene una huella digital química única, que pueden ser utilizada como herramienta en la investigación de procedencia de estos granos. La composición elemental (Mn, Ti, V, Mg, Cr, Al), es reportado en porcentaje en peso de los óxidos, los cuales fueron determinados por microsonda de electrones sobre granos homogéneos de ilmenitas de detritos provenientes de rocas plutónicas y volcánicas félsicas, volcánicas intermedias y plutónicas - volcánicas máficas. Los resultados indican, que las firmas químicas obtenidas en roca ígneas félsicas y máficas son retenidos por los granos detríticos de ilmenita en arenas hijas. De igual forma, determinaron que los granos de fuentes ígneas máficas son enriquecidos en  $TiO_2$  ( $50\pm 1$ )% y tienen un rango más estrecho de los granos de fuentes ígneas félsicas ( $48\pm 2$ )%. En adición, los granos con  $MnO > 2\%$  son más persistentes en arenas provenientes de rocas félsicas. A través del análisis de función discriminante (Figura 3), utilizando los óxidos  $MnO$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Cr_2O_3$  y  $Al_2O_3$  como las variables discriminantes, encontraron que los granos de rocas ígneas félsicas y máficas podían ser clasificados correctamente el 86% de las veces. Sin embargo, cuando los granos que provenían de rocas volcánicas intermedias fueron añadidas al modelo, la clasificación correcta decayó al 62%. La compleja naturaleza química de los granos detríticos de ilmenita provenientes de rocas ígneas intermedias indica que hay mucho que aprender acerca de la composición de los granos detríticos ilmenita, sin embargo, si es usada en conjunto con otros métodos, la huella digital de los detritos de granos de ilmenita pueden ser una valiosa contribución a la investigación de procedencia.



**Figura 3:** Mapa territorial construido desde dos funciones discriminatorias canónicas calculado por las variables  $MnO$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $MgO$ ,  $Cr_2O_3$  y  $Al_2O_3$  del conjunto de granos detríticos de ilmenita. Nota la buena separación de los granos de los granos de rocas ígneas félsicas y rocas ígneas máficas. Tomado de (Grigsby, 1992).

**h. BROOKS, W., et al. (1995). Depósitos de Carbonatita. (Deposit Carbonatite)**

Los autores hacen referencia a los depósitos de carbonatitas existentes en la zona del escudo de Guayana, Venezuela. Ellos hablan sobre la laterita de Cerro Impacto y hacen referencia a la existencia de otros posibles depósitos carbonatíticos en el área del estado Bolívar, esto lo determinaron mediante imágenes de radar y por datos aeromagnéticos, ellos aseguran en un 90% dos o más depósitos de carbonatitas, 50% cinco o más y 10% 20 o más.

**i. PÉREZ, M. (1999). Caracterización de kimberlitas en los alrededores de la quebrada Grande municipio Cedeño, estado Bolívar**

Pérez (1999), realizó la caracterización de kimberlitas en los alrededores de quebrada Grande, en el municipio Cedeño, estado Bolívar. Este trabajo fue la continuación de estudios previos en los años 60, sobre diamantes encontrados en el área de Guaniamo que dieron indicio de Kimberlitas, por la presencia de granate cromífero cercanos al yacimiento. Luego Pérez con nuevas tecnologías en los años 90, realiza la caracterización de la Kimberlita y encuentra nuevos minerales: ilmenita magnesiana (geikielita), piropo cromífero, perovskita, olivino muy alterado, melilita y un mineral metálico que tentativamente podría ser níquel nativo.

**j. SARDI, F. (2003). Composición química de la betafita, ilmenita, rutilo y rabdofano del yacimiento W-Mo “Badillo”, Angulos, Argentina.**

El objetivo de este trabajo fue realizar un estudio composicional y detallado de los minerales accesorios del yacimiento de Badillo de Angulos - Argentina. Estos minerales accesorios eran: la betafita, ilmenita, rutilo y rabdofano. La ilmenita que provenía de lentes mineralizados tenía concentraciones altas de Mn que iban de 3,18% a 7,14% MnO, a su vez determinaron dos tipos de rutilo, uno asociado a las biotitas del Granito de Potrerillos formado a causa de la alteración postmagmática que registró hasta 7,31% WO<sub>3</sub> y otro asociado a los lentes de cuarzo que tenía hasta 7,92% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Por último el rabdofano era el portador de tierras raras livianas y torio.

**k. KAMINSKY, F., et al. (2004). Kimberlitas Anómalas Neoproterozoicas de Guaniamo, Venezuela: kimberlita micacea del tipo isotópica transicional (Neoproterozoic “anomalous” kimberlites of Guaniamo, Venezuela: mica kimberlites of “isotópico transicional” type)**

Kaminsky estudió químicamente las kimberlitas de Guaniamo, describe que se caracterizan por su alto contenido de MgO, bajo contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y de TiO<sub>2</sub>, y contenidos de FeO y K<sub>2</sub>O superiores a la media. Estas rocas tienen concentraciones

de Ni, Cr, Co, Th, Nb, Ta, Sr, y LREE por encima de la media, y bajas de P e Y, y particularmente de Zr, y Hf. También identificó los principales minerales indicadores de kimberlitas como son: Granate piropo, Cr-espinela, Cr-dióxido, ilmenita, olivino y la flogopita. En particular reconoció dos tipos de ilmenita: ilmenita maganifera y picroilmenita, la primera la más común y con significativas concentraciones de MnO entre (0,73% - 2,55)%. La segunda la ilmenita magnesiana también común con concentraciones de MgO variables que iban de 1% a 13%.

**I. GAMERO, A. & REVETY, M. (2011). Estudio geoquímico y mineralógico de minerales pesados en la zona nor-occidental del estado Bolívar.**

Las autoras realizaron un estudio geoquímico de las cuencas nor-occidentales del estado Bolívar, con el fin de ubicar y limitar zonas de interés para la prospección minera. Para el estudio utilizaron técnicas como: espectrometría de emisión óptica para determinar los elementos mayoritarios y minoritarios (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y MnO) y para los elementos traza (Y, Zr, Nb, Hf, La, Ce, Nd, Th, U y Cr) utilizaron la espectrometría de masa con plasma inductivamente acoplado (ICPMS), también realizaron análisis mineralógicos por medio de la técnica de DRX para las muestras que resultaron anómalas. Con los resultados obtenidos generaron mapas geoquímicos de distribución de concentraciones dividiendo la zona de estudio en cuatro áreas anómalas: en la zona A (Figura 4) los análisis mineralógicos arrojaron como posibles fases minerales: ilmenita, magnetita, cromita, hematita e ilmenorutilo, en la zona B (Figura 4) las fases minerales son ilmenita y circón; en la zona BI como fases minerales son: ilmenita, hematita y magnetita; y en la zona BII las fases minerales identificadas fueron monacita, Mn-ilmenita e ilmenita. Particularmente en la zona BI las autoras plantean la posibilidad de que las anomalías de Mn y Nb se encuentran asociadas a la fase mineral ilmenita y proponen que su presencia posiblemente se deba a cuerpos carbonatíficos en el área.

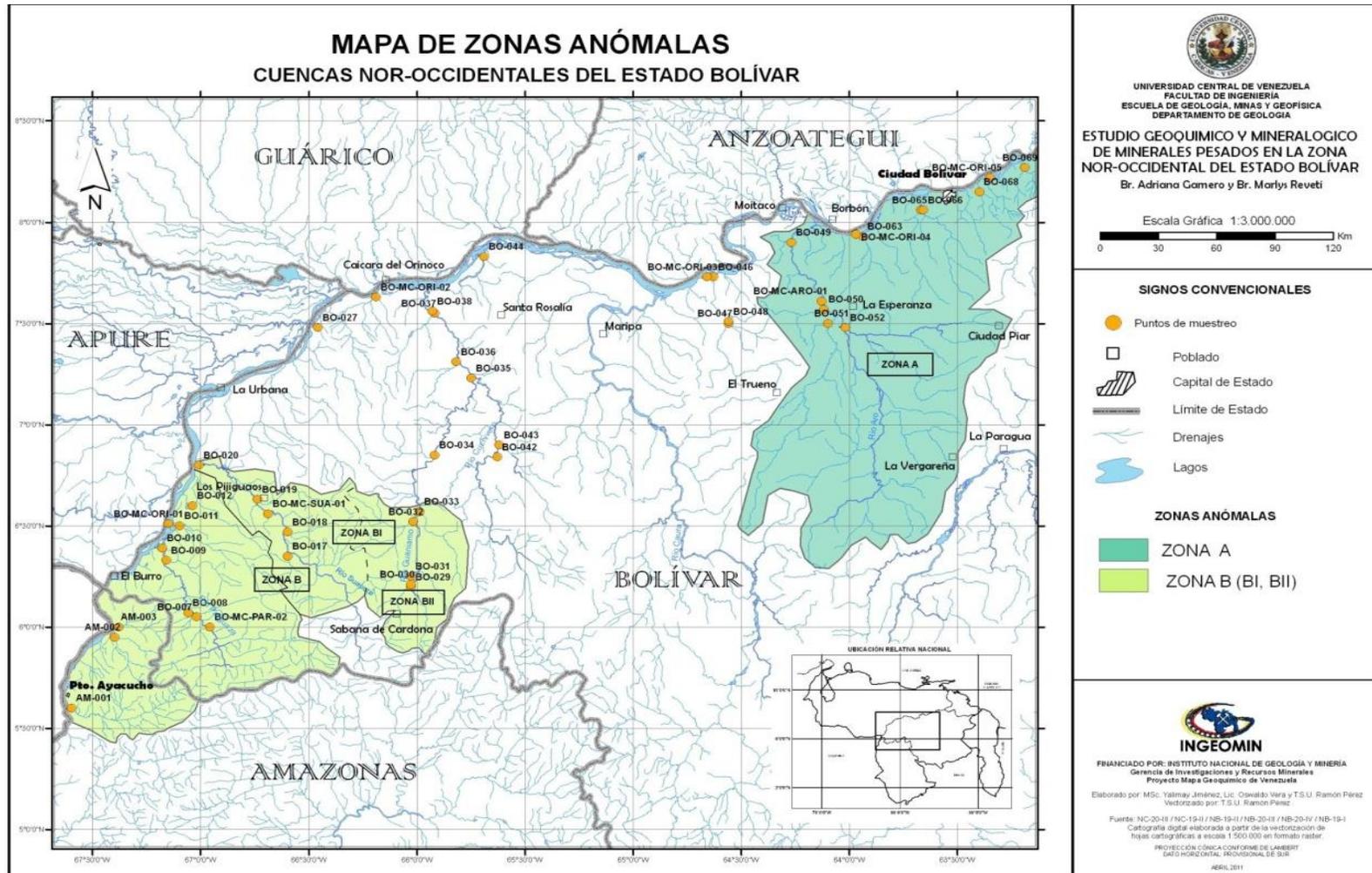


Figura 4: Mapa de zonas anómalas. Tomado de GAMERO & REVETY (2011)

**m. GREAVES, E., et al. (2011). Depósito de Torio del Impacto, Venezuela (Impacto, Venezuela's Thorium Deposit)**

El autor realizó una descripción del depósito laterítico en la zona del Impacto del estado Bolívar, Venezuela en el cual estimó 324 mil toneladas de torio, 750 mil toneladas de REE y 583 mil toneladas de Nb. El depósito consiste de una capa muy gruesa de laterita que contiene un promedio de 0,43% de Th, que básicamente cubre la roca subyacente original que por asociaciones de elementos se cree que es una carbonatita. Los análisis mineralógicos indicaron que el material está principalmente compuesto de granos finos, pobremente cristalino, goetita y hematita. Otros minerales contienen Th, Nb, REE (óxidos hidratados de Fe, Mn, Al) y otros elementos son también muy finos e íntimamente asociados a minerales de hierro (ilmenorutilo, columbita, rutilo, monacita, leucoxeno, allanita y cuarzo).

**n. ALLIALLY, M., et al. (2011). La cromita, ilmenita-Mg y priderita como minerales indicadores de Kimberlitas y Lamproitas cretácicas diamantíferos de Cote d'Ivoire (Oeste de Africa). (Chromite, Mg-ilmenite and Priderite as indicators minerals of diamondiferous Cretaceous Kimberlites and Lamproites from Cote d'Ivoire (West Africa))**

Los autores realizaron un estudio en las kimberlitas de Seguela, las cuales son caracterizadas por tener xenocristales de cromita con elevado contenido de  $TiO_2$  (0,6-5%). Las cromitas están asociadas a los diamantes que tiene altos niveles de  $Cr_2O_3$  (usualmente >55% peso),  $MgO$  (9-12% peso) y  $Al_2O_3$  (12% peso). El Cr contenido en los xenocristales de cromita depende de la presión y por lo tanto es indicativo de potenciales diamantes. La cromita está asociada con la ilmenita-Mg, que en las kimberlitas es un importante mineral indicador de diamantes, sin embargo, los resultados que obtuvieron en esta investigación señalan la presencia de ilmenitas-Mn en abundancia caracterizadas por altas concentraciones de  $TiO_2$  (46-56% en peso), alto  $MnO$  (4-19% en peso) y relativamente bajo  $MgO$  (<0,63 peso), así mismo la ilmenita-Mg contiene concentraciones de  $MgO$  (3-15% peso).

## 2. METODOLOGÍA

La presente investigación fue llevada a cabo a partir de una serie de etapas, estas se clasificaron en: selección de muestras, preparación de muestras para análisis (morfológico y químico), análisis microscópico, tratamiento estadístico y comparación química y morfológica.

### **1era Etapa: Selección de muestras**

La población de muestra, está conformada por un total de 46 muestras de minerales pesados y fue dividida en tres grupos (Tabla1):

1. Las pertenecientes al Proyecto de Mapa Geoquímico de Venezuela del Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN), conformada por minerales pesados separados magnéticamente por Gamero y Reveti (2011), este grupo corresponde desde la muestra 1 hasta la muestra 31.

2. Las muestras del segundo grupo que pertenecen al proyecto antes mencionado fueron separadas por magnetismo en esta investigación, este grupo corresponde desde la muestra 32 hasta la muestra 41.

3. El tercer grupo, corresponde a las suministradas por diversos autores, recolectadas en áreas adyacentes a la zona en estudio (muestras CI1, CI2, CI\_11 de Cerro Impacto, P\_1 del Granito de Pijiguaos) y una muestra de la kimberlita de las minas de Gerais en Brasil (K\_1) y se les aplicó solamente el análisis químico, para determinar la composición química de las ilmenitas y magnetitas proveniente específicamente de estos lugares.

Es importante resaltar que las muestras del Proyecto de Mapa Geoquímico de Venezuela del Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN), se les asignó otro nombre en esta investigación con el fin de facilitar el manejo de las muestras, ya que de una muestra pueden existir hasta 4 fracciones magnéticas (Tabla 1).

**Tabla 1: Renombramiento de las muestras y ubicación**

Grupo de muestras	Renombramiento de la muestra N° muestra	Nombre original de la muestra	Nombre del río de recolección	Fecha de la recolección	Oeste (W)	Norte (N)
Grupo 1	M1	Bo-050	Río Guaigua	06-Abr-08	64°07'28"	07°34'08"
	M2	Bo-018	Caño La Miel	07-May-07	66°36'07"	06°27'58"
	M3	Bo-007	Caño Colorado	01-May-07	67°01'20"	06°03'01"
	M4	MP-Atabapo Amazonas	-	-	-	-
	M5	Bo-MC-Ori-01 Río Orinoco. Magnético 1,2amp	Río Orinoco	04-May-08	67°08'50"	06°30'52"
	M6	Bo-MC-Ori-01 Río Orinoco. Magnético	Río Orinoco	04-May-08	67°08'50"	06°30'52"
	M7	Bo-051. Pegado al imán 0,8amp	Río Arizo	06-Abr-08	64°06'15"	07°30'15"
	M8	Bo-051-P pegado al imán 0,4 amp	Río Arizo	06-Abr-08	64°06'15"	07°30'15"
	M9	Bo-051-D magnético 0,4 amp	Río Arizo	06-Abr-08	64°06'15"	07°30'15"
	M10	Bo-020 1,2 amp	Río Suapure	25-Abr-07	67°00'45"	06°48'05"
	M11	Bo-020 magnético manual	Río Suapure	25-Abr-07	67°00'45"	06°48'05"
	M12	Bo-020 0,4 amp	Río Suapure	25-Abr-07	67°00'45"	06°48'05"
	M13	Bo-038 magnético manual	Río Cuchivero	13-May-07	65°55'50"	07°33'25"
	M14	Bo-038 pegado electroimán	Río Cuchivero	13-May-07	65°55'50"	07°33'25"
	M15	Bo-063 pegado electroimán 1,2 amp	Río Mapares	07-Abr-08	63°56'27"	07°55'52"
	M16	Bo-063 magnético manual	Río Mapares	07-Abr-08	63°56'27"	07°55'52"
	M17	Bo-063 magnético 1,2 amp	Río Mapares	07-Abr-08	63°56'27"	07°55'52"
	M18	Bo-034 magnético manual	Río Guaniamito	18-May-07	67°06'03"	06°29'51"
	M19	Bo-034 magnético 1,2 amp	Río Guaniamito	18-May-07	67°06'03"	06°29'51"
	M20	Bo-034 pegado del electroimán 1,2 amp	Río Guaniamito	18-May-07	67°06'03"	06°29'51"
	M21	Bo-052 Pegado al imán	Río Carapo	08-Abr-08	64°01'21"	07°28'55"
	M22	Bo-052 magnético manual	Río Carapo	08-Abr-08	64°01'21"	07°28'55"
	M23	Bo-044 magnético 1,2 amp	Río Uyape	16-May-07	65°41'38"	07°49'57"
	M24	Bo-044 pegado electroimán 1,2 amp	Río Uyape	16-May-07	65°41'38"	07°49'57"
	M25	Bo-044 magnéticos manuales	Río Uyape	16-May-07	65°41'38"	07°49'57"

**Continuación Tabla 1: Renombramiento de las muestras y ubicación**

Grupo de muestras	Renombramiento de la muestra N° muestra	Nombre original de la muestra	Nombre del río de recolección	Fecha de la recolección	Oeste (W)	Norte (N)
Grupo 1	M26	Suapure Mp				
	M27	Bo-029 magnético manual	Río Guaniamo	22-May-07	66°01'40"	06°12'04"
	M28	Bo-029 imán 1,2 amp	Río Guaniamo	22-May-07	66°01'40"	06°12'04"
	M29	Bo-029 pesados	Río Guaniamo	22-May-07	66°01'40"	06°12'04"
	M30	AM-001 magnético 1,2 amp	Río Cataniapo	28-Abr-07	67°35'44"	05°35'47"
	M31	Am-001 pegado al electroimán 1,2	Río Cataniapo	28-Abr-07	67°35'44"	05°35'47"
Grupo 2	M32	Bo-043 Magnético manual	Río Zariapo	15-May-07	65°37'21"	06°54'02"
	M33	Bo-043 magnético 0,4	Río Zariapo	15-May-07	65°37'21"	06°54'02"
	M34	Bo-042 Magnético manual	Río Cuchivero	15-May-07	65°37'53"	06°50'16"
	M35	Bo-042 magnético 0,4	Río Cuchivero	15-May-07	65°37'53"	06°50'16"
	M36	Bo-031 Magnético manual	Río Aguada Aje	22-May-07	66°01'54"	06°14'43"
	M37	Bo-031 magnético 0,4	Río Aguada Aje	22-May-07	66°01'54"	06°14'43"
	M38	Bo-032A Magnético manual	Río Las Nieves	24-May-07	66°00'55"	06°31'20"
	M39	Bo-032A magnético 0,4	Río Las Nieves	24-May-07	66°00'55"	06°31'20"
	M40	Bo-017 Magnético manual	Caño La Peineta	07-May-07	66°35'54"	06°21'14"
	M41	Bo-017 magnético 0,4	Caño La Peineta	07-May-07	66°35'54"	06°21'14"
Grupo 3	CI1	-	Cerro Impacto	1976	-	-
	CI2	-	Cerro Impacto	1976	-	-
	K_1	-	Kimberlita, Brasil	-	-	-
	P_1	-	Pijiguaos	-	-	-
	CI-11	-	Cerro Impacto	1976	-	-

En el siguiente mapa de localización de las muestras tomado de Gamero & Reveti (2011) (Figura 5), están ubicadas las muestras con su nombre original:



**Figura 5:** Mapa de ubicación de los puntos de muestreo, cuenca Nor-Occidental el estado Bolívar.

Tomado de Gamero & Reveti (2011)

## **2da etapa: Preparación de muestras**

Las muestras del primer grupo, están separadas magnéticamente en las fracciones manual, 0,4; 0,8 y 1,2 amps por el trabajo de Gamero y Reveti (2011), sin embargo, las muestras del grupo dos no se encontraban separadas magnéticamente, por esta razón fueron separadas en las fracciones manual y 0,4 amps mediante el isodinámico tipo Frantz. Este paso fué necesario realizarlo antes de comenzar con la preparación de las muestras para su posterior estudio en el microscopio electrónico de barrido equipado con un espectrómetro dispersivo en energía de rayos X (MEB-EDX).

### **Separación magnética de las muestras del grupo dos (muestras 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41)**

Las muestras Bo-043, Bo-042, Bo-031, Bo-032 y Bo-017 fueron separadas magnéticamente en el isododinámico tipo Frantz, en la fracción manual y 0,4 amps (Figura 8), ya que según Hess (1959), las ilmenitas y magnetitas aparecen en estas fracciones, esta separación dió como resultado diez muestras (Tabla 2).

**Tabla 2:** Nombre de las muestras separadas en las fracciones manual y 0,4 amps

<b>N° muestra</b>	<b>Separación</b>
M32	Bo-043 Magnético manual
M33	Bo-043 magnético 0,4
M34	Bo-042 Magnético manual
M35	Bo-042 magnético 0,4
M36	Bo-031 Magnético manual
M37	Bo-031 magnético 0,4
M38	Bo-032A Magnético manual
M39	Bo-032A magnético 0,4
M40	Bo-017 Magnético manual
M41	Bo-017 magnético 0,4

### La separación magnética manual

Consistió en aproximar un imán a la muestra (Figura 6), protegido con un papel parafinado, para evitar que los granos se adhieran directamente al imán y facilitar la recolección de la fracción obtenida, en esta fracción se encuentran regularmente la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) y la pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$  con  $x=0-0,2$ ).



**Figura 6:** *Separación magnética manual*

### La separación magnética por el isodinámico tipo Frantz

Es realizada en un equipo con un riel de dos canales, por el canal mas externo los minerales magnéticos o de mayor susceptibilidad magnética son concentrados según el amperaje colocado, por el otro canal suelen pasar los minerales de menor susceptibilidad magnética. Este riel está rodeado por dos bobinas que generan un campo magnético variable controlado por un amperímetro. La muestra es colocada poco a poco en la parte superior del equipo y este genera pequeños movimientos vibratorios que permiten la circulación de los granos a través de los canales hasta llegar al otro extremo del riel y son depositados en dos recipientes. El proceso es realizado las veces que sea necesario dependiendo del amperaje colocado (Figura 7).

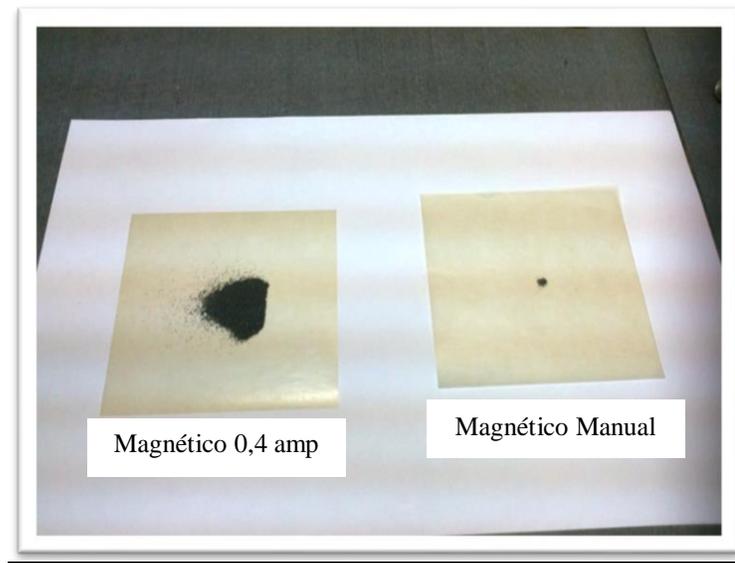
Es importante destacar que la tabla de Hess (1959) fue usada como referencia para la separación de los minerales pesados, en el separador magnético tipo Frantz dada por (Tabla 3).

**Tabla 3:** *Minerales separados por el Frantz de acuerdo a 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</b>	<b>0,8</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>
Magnetita	Ilmenita	Horblenda	Diopsido	Esfena	Circón
Pirrotita	Granate	Hipersteno	Tremolita	Leucoxeno	Rutilo
	Olivino	Augita	Enstantita	Apatito	Anatasa
	Cromita	Actinolita	Espinel	Andalucita	Brookita
	Cloritoide	Estauroлита	Estauroлита	Monacita	Pirita
		Epidoto		Xenotima	Corindon
		Biotita	Moscovita		Topacio
		Clorita	Zoisita		Fluorita
			Clinozoisita		Cianita
			Turmalina		Sillimanita
					Anhidrita
					Berilo



**Figura 7:** *Separador magnético tipo Frantz (INGEOMIN)*



**Figura 8:** Fracciones magnéticas 0,4 amps y manual

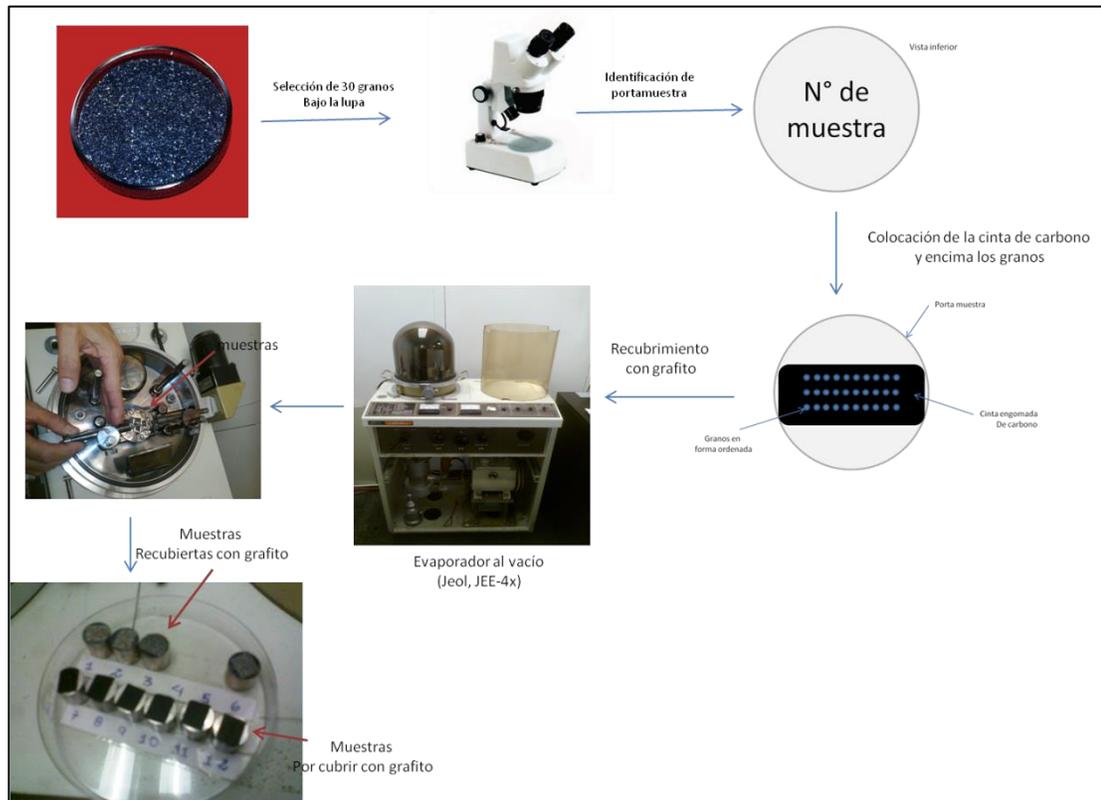
## 2.1 Preparación de muestras para el estudio morfológico y químico

### 2.1.1 Estudio Morfológico

Para el análisis morfológico la población estuvo constituida por 41 muestras, distribuidas en la zona noroccidental del estado Bolívar de las cuales 21 pertenecen a las cuencas de los ríos Guaniamo y Suapure.

#### 2.1.1.1 Preparación de las muestras

De cada muestra fueron seleccionados 30 granos bajo lupa, en algunos caso era menor cantidad de granos debido al poco material de la muestra, una vez seleccionado los granos se identifican los portamuestras, los cuales son rotulados con el nombre de la muestra por debajo con un lápiz de grafito, por encima se colocó una cinta engomada de carbono de doble cara, encima de la cual, con la ayuda de una aguja fueron colocados los 30 granos en forma ordenada y por último son cubiertas con grafito en el evaporador al vacío (Jeol, JEE-4X), ) (Figura 9). Este recubrimiento es realizado de la siguiente manera: el equipo se lleva a vacío y luego se aplica una diferencia de potencial entre un hilo de grafito que actúa como la resistencia de una bombilla al pasar la corriente. Al calentarse se desprenden átomos de carbono por efecto termoiónico y estos caen por gravedad recubriendo la muestra.



**Figura 9:** Esquema de la preparación de las muestras para estudio morfológico

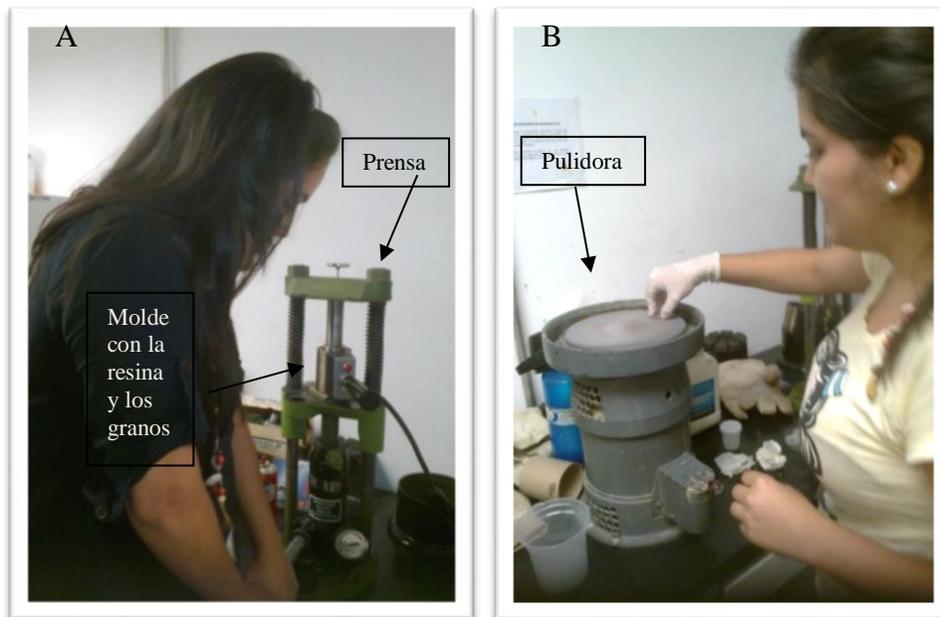
## 2.1.2 Estudio Químico

Para el análisis químico la población estuvo constituida por 46 muestras, distribuidas en la zona noroccidental del estado Bolívar de las cuales 21 pertenecen a las cuencas de los ríos Guaniamo y Suapure.

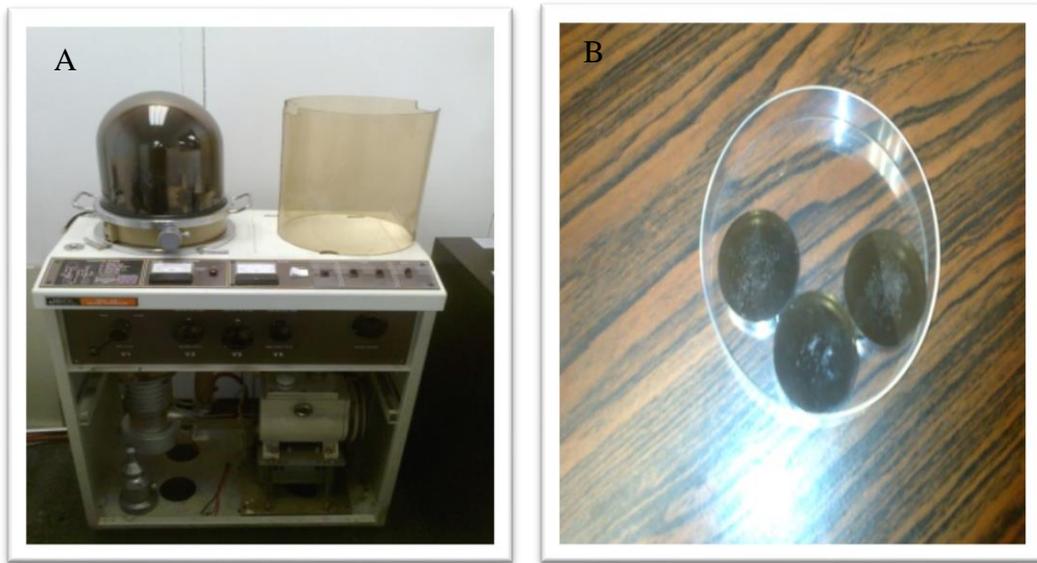
### 2.1.2.1 Preparación de las muestras (baquelitas)

De cada muestra fueron seleccionados mediante la lupa 100 granos aproximadamente y se mezclaron con una resina epóxica a través del siguiente procedimiento: se añadieron 3 cucharadas pequeñas de resina transóptica dentro de un molde y luego los granos de manera centrada. El molde con la resina y los granos es colocada en una prensa y se le aplica una presión de 100 a 200 lb/in<sup>2</sup> (psi) hasta alcanzar la temperatura de 150 °C, luego se apaga el calentador dejando enfriar hasta 70 °C y mientras tanto es necesario mantener una presión de 2100 psi, ya que esta

tiende a disminuir mientras disminuye la temperatura (Figura 10). Luego las baquelitas son pulidas: primero con esmeril (400 y 1000)  $\mu$  respectivamente y luego con pastas de diamante de (3, 1, y 1/4) $\mu$  (Figura 10). Al finalizar las baquelitas son recubiertas con grafito en el evaporador al vacío (Jeol, JEE-4X), mediante el mismo proceso explicado para el cubrimiento de las muestras para el estudio morfológico (Figura 11).



**Figura 10:** A) Preparación de baquelitas en la prensa. B) Pulidora



**Figura 11:** **A)** *Evaporador al vacío (Jeol, JEE-4X)* y **B)** *Baquelitas recubiertas con grafito*

### **3era Etapa: Análisis en el Microscópico Electrónico de Barrido (MEB)**

Las muestras fueron analizadas en un microscopio electrónico de barrido (Jeol JSM-5910 LV) equipado con un espectrómetro dispersivo en energía de rayos X (MEB-EDX) del laboratorio de MEB del Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN) (Figura 12).



**Figura 12:** *Microscopio electrónico de barrido (Jeol JSM-5910 LV) equipado con un espectrómetro de rayos X (MEB-EDX). (INGEOMIN)*

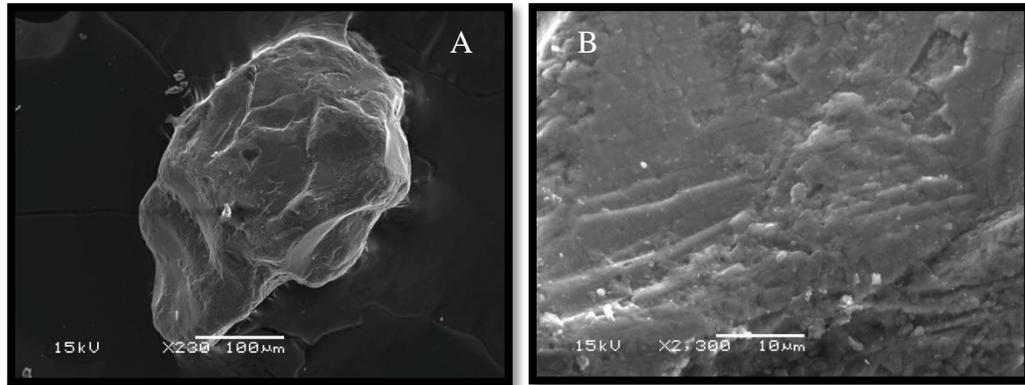
### **Condiciones de trabajo del equipo**

Para el análisis morfológico las condiciones de operación del instrumento fueron: voltaje acelerador 15 kV, distancia de trabajo 10 mm y tiempo de conteo 60 segundos. En el análisis químico se utilizaron las mismas condiciones de trabajo con la excepción del tiempo de conteo, que fue aumentado a 100 segundos.

### **2.2 Análisis Morfológico en el MEB**

El modo de operación para este análisis se efectuó con los detectores de electrones secundarios (SEM), que ofrecen una imagen 3D. El procedimiento aplicado en el MEB para el análisis morfológico fue el siguiente: una vez ubicado el grano era necesario realizar primero un análisis puntual para observar la composición química del grano y determinar si era ilmenita, magnetita u otro mineral, en el caso de ser ilmenitas o magnetitas se tomaba una imagen del grano completo donde era observada la geometría de este (Figura 13A). También si era encontrada alguna

microtextura, se realizaba una ampliación en esa zona del grano y se adquiría la imagen (figura 13B).



**Figura 13:** **A)** Imagen adquirida del grano completo. **B)** ampliación de una microtextura

Las imágenes adquiridas en el MEB-EDS de cada grano, fueron utilizadas para realizar la descripción morfológica tomando en cuenta las siguientes características: el tamaño, la geometría, la redondez y la esfericidad de los granos, así como las diferentes microtexturas.

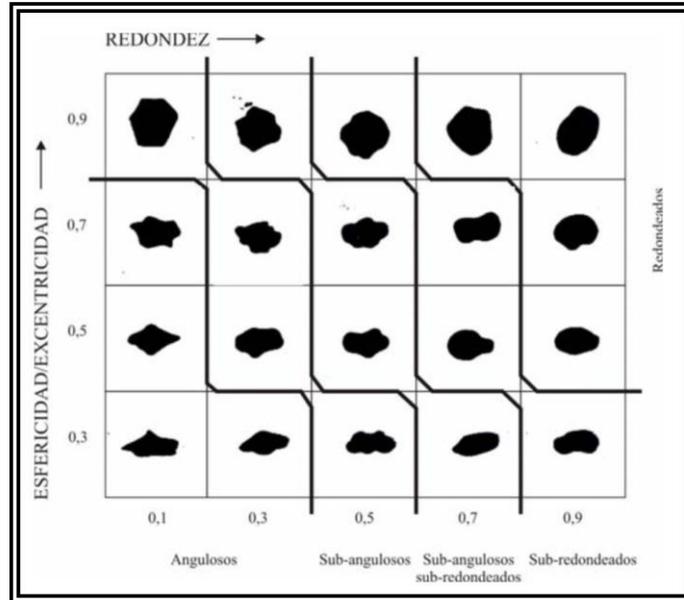
La medición del alto y ancho de cada grano fué realizado a través, del programa GSA Image Analyser versión Demo y con estos datos se clasificaron los granos a través del sistema de clasificación de rocas clásticas Hallsworth & Knox (1999) (tabla 4).

**Tabla 4:** Clasificación de tamaño de grano según HALLSWORTH & KNOX (1999).

Tamaño de clastos (mm)	Clastos sedimentarios			
256	Bloque	GRAVA		
	Canto			
	64		Guijarro	
			16	Gránulo
2	Arena muy gruesa	ARENA		
1	Arena gruesa			
0,5	Arena media			
0,25	Arena fina			
0,125	Arena muy fina			
0,032	Limo	ARCILLA		
			0,004	
	Arcilita			

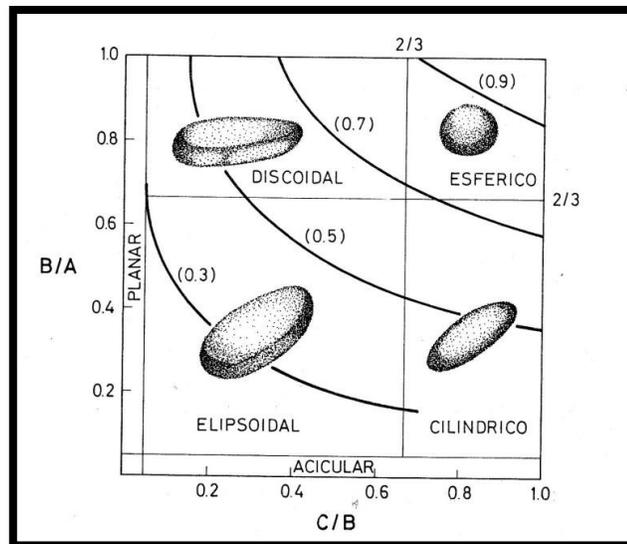
La redondez y esfericidad fué determinada a partir, de la tabla visual de esfericidad y redondez de granos; según Krumbein & Pettijhon (1938) (tabla 5).

**Tabla 5:** Tabla visual de esfericidad y redondez de granos. Según Krumbein & Pettijhon (1938)



La geometría de los granos fue determinado mediante el uso de la tabla de clasificación de geometría de los granos según Zingg (1935) (Tabla 6).

**Tabla 6.** Tabla de clasificación de geometría de los granos según Zingg (1935)

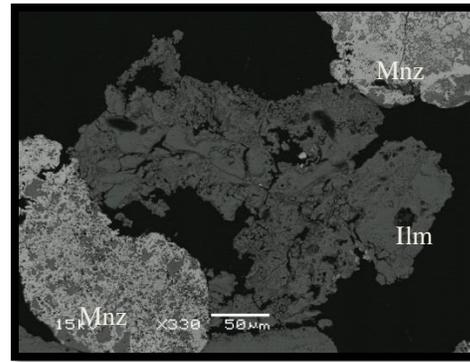


Las microtexturas fueron determinadas, a partir de la comparación con el atlas de (Mahaney, 2002).

### **2.3 Análisis Químico en el MEB**

Las muestras que fueron sometidas al análisis químico son las siguientes: m2, m4, m9, m11, m14, m16, m18, m21, m26, m28, m29, m31, m32, m33, m35, m37, m39, m41, CI1, CI2, CI11, K1, P1. El análisis consistió en determinar las concentraciones de los elementos mayoritarios y minoritarios ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ) y de traza (V, Cr, Ni, Zr, Nb y Ta) en los granos de ilmenita e identificar posibles microtexturas.

El modo de operación para el análisis químico se efectuó primero, con los detectores de electrones retrodispersados (COMPO), los cuales ofrecen una imagen de la superficie del grano y es sensible a las variaciones del número atómico medio de los átomos del grano, es decir que los átomos más pesados producen más electrones retrodispersados y la imagen revela diferencia de contraste (diferentes tonalidades de grises) que van dependiendo de la composición química del grano (Figura 14) y el segundo modo de operación se realiza con el detector de rayos x (EDS), este recibe los rayos procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones, como la energía de cada rayo X es característica de cada elemento, se obtiene información analítica cualitativa y cuantitativa del tamaño del área deseado de la superficie.



**Figura 14:** *Imagen con detectores retrodispersados, en la imagen se observa la diferencia de densidades entre los minerales de ilmenita y la monacita.*

El procedimiento aplicado en el MEB fue el siguiente: una vez ubicado el grano era necesario identificar el mineral mediante tres análisis puntuales, también fueron analizadas aquellas zonas de diferentes relieves y tonalidades de grises, ya que estas diferencias como se explicó en el párrafo anterior, indica posibles cambios de mineral. Al igual que en el análisis morfológico fue adquirida una imagen completa del grano y de aquellas zonas de interés. Al final del análisis era expresada la composición química del mineral en sus óxidos (Figura 15).

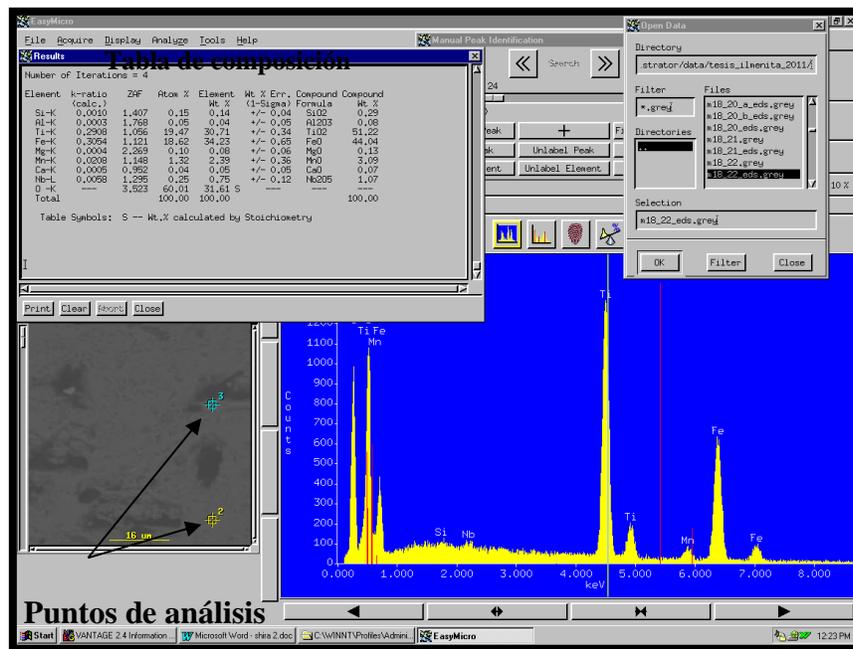


Figura 15: Imagen del análisis químico, tabla de composición, puntos de análisis y espectro

#### 4ta Etapa: Tratamiento estadístico

Para realizar el tratamiento estadístico de los análisis morfológicos y químicos, las muestras fueron agrupadas por cuencas de la siguiente manera:

Tabla 7: Muestras agrupadas por cuencas

Cuencas	Análisis Morfológico	Análisis Químico
Río Guaniamo	m18, m19, 20, m27, m28, m29	m18, m28, m29
Río Suapure	m2, m10, m11, m12, m26	m11, P_1
Río Cuchivero	m13, m14	m13, m14
Río Parguaza	m3, m5, m6	m3
Río Aro	m1, m7, m8, m9, m21, m22	m1

#### 2.3.1 Tratamiento estadístico del análisis morfológico

Las descripciones morfológicas obtenidas de cada muestra fueron agrupadas por cuencas y analizadas a través de histogramas de frecuencia (realizados en el software Microsoft Office Excel 2007), tomando en cuenta la geometría de los granos según la tabla de Zingg (1935), y la esfericidad y redondez según la tabla de Krumbein & Pettijhon (1938). Estos histogramas llevaron a determinar la morfología

de los granos más predominante por cuenca y establecer posibles números de fuentes de proveniencia.

### **2.3.2 Tratamiento estadístico del análisis químico**

Como fue descrito anteriormente en el estudio químico con el MEB, cada grano fue sometido a tres análisis puntuales, estas tres composiciones fueron promediadas obteniendo un valor por grano. De estos resultados se determinó: el tipo de mineral (ilmenita, magnetita u otro) y las concentraciones de los elementos mayoritarios y minoritarios ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ) y de traza (V, Cr, Ni, Zr, Nb y Ta). Estas concentraciones llevaron a determinar los elementos que presentaban variabilidad de porcentaje dentro de la composición química del mineral y fueron tomadas en cuenta principalmente para identificar los tipos de ilmenitas y magnetitas.

Las variaciones fueron evaluadas mediante histogramas de frecuencia, diagramas de dispersión y estos fueron realizados mediante el software Microsoft Office Excel 2007, también se realizaron diagramas de correlación multivariadas y diagramas de cluster mediante el software GCDkit 3.00.

#### **5ta Etapa: Comparación de análisis morfológicos y químicos**

La última fase de la investigación, consistió en realizar cinco tipos de comparaciones: 1) comparación morfológica entre las cuencas, 2) comparación química entre las cuencas, 3) comparación morfológica vs química entre las cuencas, 4) comparación química entre las muestras de las cuencas y las muestras de otros autores y 5) comparación química entre las muestras de las cuencas y otras de la literatura.

**1) Comparación morfológica entre las cuencas (Guaniamo, Suapure, Cuchivero, Parguaza y Aro);** es utilizada para verificar la morfología más predominante entre las cuencas.

2) **Comparación química entre las cuencas (Guaniamo, Suapure, Cuchivero, Parguaza y Aro)**; es utilizada para determinar los tipos de ilmenitas por cuenca y verificar si existe relación entre las cuencas.

3) **Comparación morfológica vs química entre las cuencas (Guaniamo, Suapure, Cuchivero, Parguaza y Aro)**; determinar si existe alguna relación entre la morfología y la composición química de los granos.

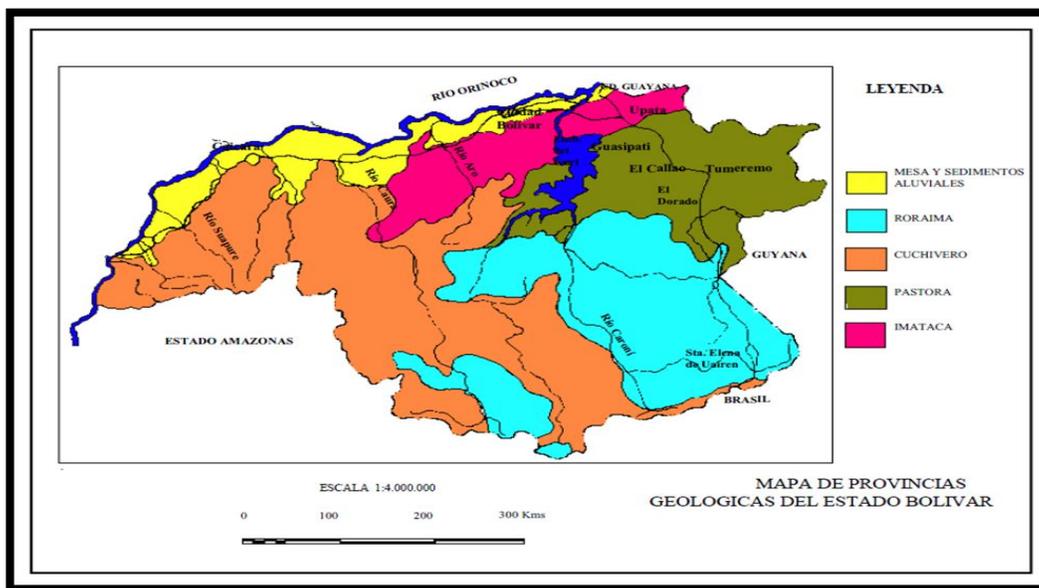
4) **Comparación química entre las muestras de las cuencas y las muestras de otros autores**; determinar si existe alguna relación entre la composición química de las muestras de las cuencas (Guaniamo, Suapure, Cuchivero, Parguaza y Aro) y las muestras de Cerro Impacto, Granito de los Pijiguaos y Kimberlita de Gerais, Basil, con el fin de poder determinar algunas posibles fuentes de proveniencia.

5) **Comparación química entre las muestras de las cuencas (Guaniamo, Suapure, Cuchivero, Parguaza y Aro) y otras de la literatura (Kimberlita de Guaniamo de Kaminsky, Carbonatita de Jacupiranga, Cerro siete cabezas, Paraguay, Granito de Potrerillo, Argentina)**; para este punto se realizó una base de datos con la composición química de ilmenitas y magnetitas provenientes de diferentes tipos de rocas en el mundo, estos datos fueron comparados con los obtenidos en esta investigación, con el fin de poder determinar algunas posibles fuentes de proveniencia.

## 2 GEOLOGIA REGIONAL

El siguiente capítulo mostrara una breve reseña de la geología regional de la zona, describiendo el Escudo de Guayana a través de las provincias que lo conforman: Imataca, Pastora, Roraima y especialmente Cuchivero, zona donde se desarrolla la presente investigación.

El Escudo de Guayana se localiza al sur del Río Orinoco y ocupa aproximadamente el 50% de la superficie de Venezuela, está constituido por cuatro provincias geológicas (Figura 16): Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima, la zona de estudio se encuentra localizada en la Provincia de Cuchivero. Las rocas del escudo de Guayana están entre las más antiguas del país, como por ejemplo: granulitas y charnockitas del Complejo de Imataca de 3.41 Ga y otras más jóvenes como kimberlitas eclogíticas de Guaniamo de 0.711 Ga, que registran en buena parte una evolución geotectónica similar a la de otros escudos precámbricos en el mundo, con al menos ruptura de supercontinentes en 2.4-2.3 Ga (Guayanensis), 1.6-1.5 Ga (Atlántica-Caura), 0.8-07 Ga (Rodinia) y 0.2 Ga (Pangea) (Mendoza, 2005).

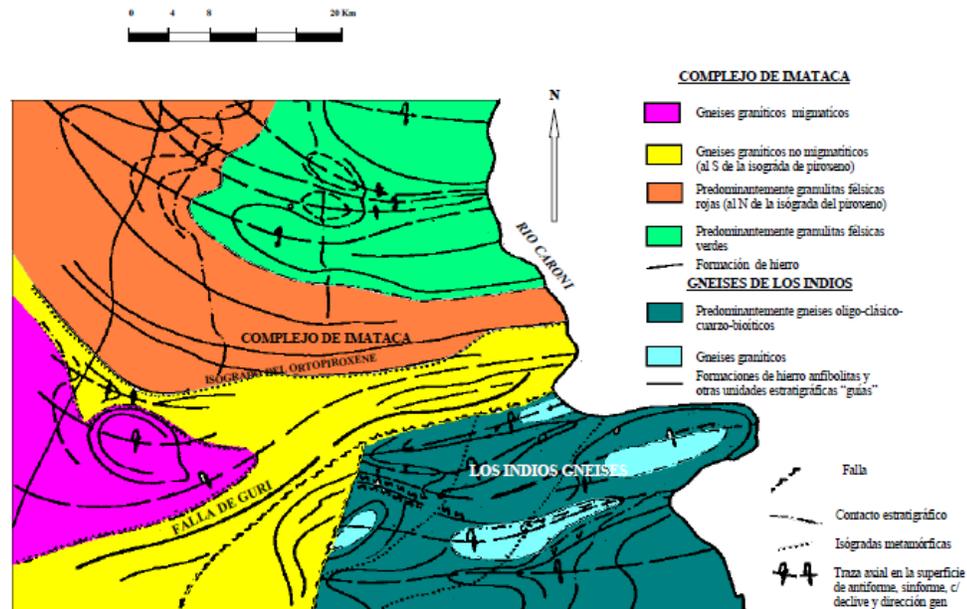


**Figura 16:** Mapa de Provincias Geológicas del Escudo de Guayana. Tomado de (Mendoza, 2005)

## 2.1 Provincia de Imataca

La Provincia de Imataca se extiende en dirección SW-NE desde las proximidades del Río Caura hasta el Delta del Orinoco y en dirección NW-SE aflora desde el curso del Río Orinoco hasta la Falla de Guri por unos 550 Kms y 80 Kms, respectivamente (Mendoza, 2005).

Litológicamente la Provincia de Imataca está formada por gneises graníticos y granulitas félsicas (60%-75)%, anfibolitas y granulitas máficas, y hasta ultramáficas (15%-20)%, y cantidades menores complementarias de formaciones bandeadas de hierro (BIF), dolomitas, charnockitas, anortositas, granitos intrusivos más jóvenes y remanentes erosionales de menos metamorizados y más jóvenes Cinturones Rocas Verdes – Tonalita, Trondjemitas Granodioritas (CRV-TTG) gnéísicos (El Torno-Real Corona) (Figura 17). El metamorfismo registrado en estas rocas decrece desde la Mina de Hierro de El Pao, con granulitas de dos piroxenos en charnockitas, anortositas y granulitas máficas y hasta ultramáficas (que sugieren temperaturas de 750 °C-850 °C y moderadas a elevadas presiones de 8 a 8.5 Kbs, equivalentes a menos de 30 Km de presión de roca), hacia la zona de Guri, con anfibolitas, granulitas y migmatitas, rocas



**Figura 17:** Mapa geológico esquemático del Complejo de Imataca al oeste de río Caroní. Tomado de (Dougan, 1972)

graníticas, con granate-cordierita-sillimanita (que implican temperaturas de 650°-700°C y presiones de 4 a 7 Kbs, o sea menores de 20 Kms de espesor de rocas]). Estas rocas de alto grado metamórfico se interpretan como evolucionados primitivos Cinturones de rocas verdes (CRV) y complejos graníticos potásicos y sódicos, varias veces tectonizados y metamorfizados hasta alcanzar las facies anfibolita y granulita y sufrir luego parcialmente metamorfismo retrógrado (Mendoza, 1.974).

Ascanio (1.975), postuló que parte, al menos, del Complejo de Imataca está formado por varias fajas tectónicas que representan microcontinentes que por deriva chocaron unos con otros con obducción, quedando separados entre sí por grandes corrimientos y fueron denominadas por el autor como: La Encrucijada, Ciudad Bolívar, Santa Rosa, La Naranjita, La Ceiba, Laja Negra y Cerro Bolívar (Figura 18).

Rodríguez (1.997), destacó los tipos de rocas graníticas, charnockíticas y migmatíticas asociadas a cada una de estas fajas tectónicas y su importancia en usos ornamentales e industriales.

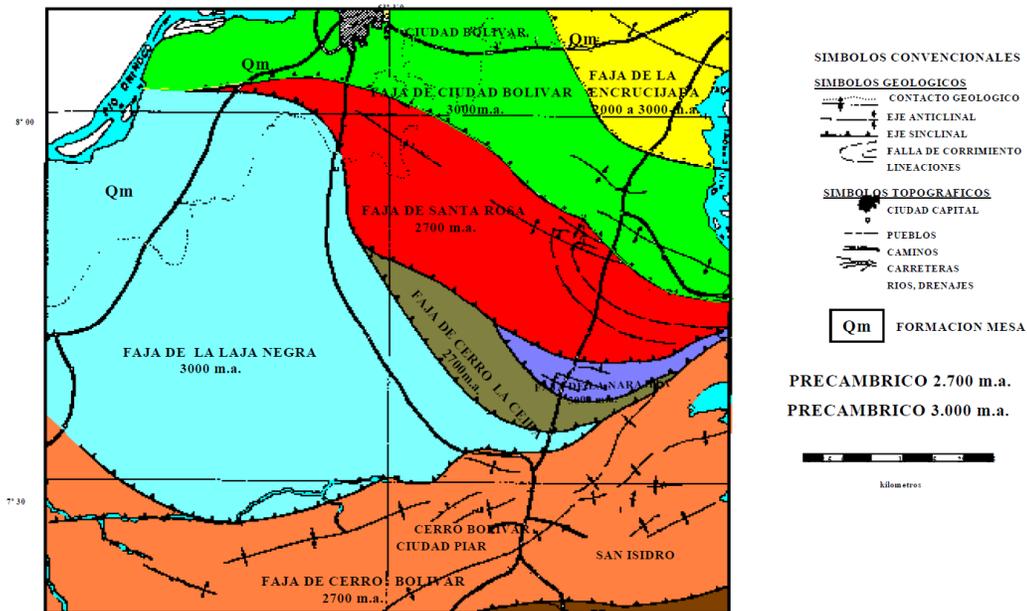


Figura 18: Complejo de Imataca fajas tectónicas. (Ascanio, 1975)

### **Edad de Complejo de Imataca**

Algunos gneises, considerados sin evidencia alguna como metasedimentarios, fueron datados en roca total por Rb/Sr y Pb/Pb como en 3.7-3.4 Ga (Montgomery, 1.976). Como se ha referido antes, rocas del Complejo de Imataca fueron tectonizadas y deformadas, intrusionadas y metamorizadas alrededor de los 2.8-2.7 Ga (Migmatita de La Ceiba) y luego durante la orogénesis Transamazónica cuando fueron metamorizadas de nuevo hasta alcanzar la parte superior de la Facies Anfibolita y la Facies Granulita de dos piroxenos (Sidder & Mendoza, 1.995).

Circones recogidos en las arenas del Río Orinoco al Oeste inmediato de Ciudad Bolívar arrojaron dos poblaciones de edad U/Pb en esos circones: una próxima a los 2.8 Ga y otra mayoritaria y dominante de alrededor de los 2.1-2.0 Ga; pero circones de > 3.4 Ga no fueron encontrados en esa zona (Sidder y Mendoza, 1.995).

Datos más recientes (Teixeira y otros, 2002), para granulitas granatíferas bandeadas por Pb-Pb dieron  $3.229 \pm 29$  Ma y para migmatitas de La Ceiba, por Pb-Pb, se obtuvieron una edad de  $2.787 \pm 22$  Ma. La edad Sm-Nd extrema más antigua de Imataca es 3.41 Ga en un gneis charnockítico y la más joven de 2.6 Ga en rocas graníticas del Complejo de Imataca. Algunos gneises en Guri dieron edades de solo  $2.022 \pm 166$  Ma, edad de reactivación Transamazónica. Para estos autores (Teixeira y otros, 2002) el Complejo de Imataca es un bloque alóctono que se juxtapuso o montó sobre el bloque Maroni-Itacaiunas (vale decir Pastora) durante el Paleoproterozoico.

### **2.2 Provincia de Pastora**

La Provincia Pastora, se extiende desde la Falla de Gurí al Norte hasta las proximidades del Parque Nacional Canaima al Sur (Km 95 carretera El Dorado-Santa Elena), por el Este hasta los límites con la Zona en Reclamación del Esequibo y al Oeste hasta el Río Caura. (Mendoza, 2005).

Según Mendoza, (2005), la Provincia de Pastora o provincia del oro, está formada por dos Cinturones de Rocas Verdes (CRV), el primero delgado y el más antiguos que está tectonizado, tipo Carichapo formados en/o cerca de un arco de islas

en una zona de convergencia. El segundo, más ancho y más joven y menos tectonizado y metamorfizados, tipo Botanamo, formado en la cuenca delante del arco de islas y complejos graníticos sódicos, como el Complejo de Supamo, siendo toda la secuencia intrusionada por granitos potásicos o “sensu estricto”, dioritas y rocas gabroides con escasos y no bien definidos complejos máficos-ultramáficos, ofiolíticos, tipo Yuruan-Uroy, e intrusiones de diques anulares como Nuria y sills de diabasas y rocas asociadas norítico-gabroides con algo de cuarzo. Los Cinturones de Rocas Verdes más antiguos, muestran tendencias estructurales próximas a NS (N 10° E a 20° O), mientras que los Cinturones de Rocas Verdes más jóvenes, casi siempre muestran tendencias en ángulo recto con las anteriores, próximas a E-O (N 70°-80° E). En la región de Guasipati-El Callao aflora una buena sección del Supergrupo Pastora (Menéndez, 1968, 1972), El Cinturones de Rocas Verdes más antiguo, está compuesto por el Grupo Carichapo y la Formación Yuruari. El Grupo Carichapo está constituido por las formaciones:

- Cicapra, predominantemente komatítica.
- Florinda, basáltico tholeítica a komatítica.
- El Callao, típicamente basáltico-andesítica toleíticas.

Rocas metasedimentarias y metavolcánicas de El Torno-Real Corona, al Oeste del Río Aro fueron correlacionadas por Kalliokoski (1965) con el Grupo Carichapo. La presencia de basaltos komatíticos pudiera sugerir alternativamente, que el Cinturón de Rocas Verdes de Pastora se formó sobre una pluma de calor del manto superior en una placa oceánica, formando parte de un arco de islas oceánicas, más primitivas, con menos sedimentos asociados, con abundancia de basaltos toleíticos oliviníferos o magnesianos. Los Cinturones de Rocas Verdes más antiguos de Pastora son posiblemente correlacionables con el Cinturón de Rocas Verdes del Birrimian de África Occidental (Mendoza, 2005).

Rocas del Supergrupo Pastora más el Grupo Botanamo son correlacionadas con aquellos cinturones (CRV) del Supergrupo Barama-Mazzaruni de Guyana, el Grupo Marowijne y el Grupo Coeroni de Suriname, la Serie Paramaca (Grupos Orapú y Bonidoro) de la Guayana Francesa y el Grupo Vila Nova de Brasil (Sidder y

Mendoza, 1.995) y el CRV de Parima-Cauarame del Alto Orinoco-Surucucú de Brasil (Tassinari y otros, 2.000).

La secuencia total supera los 11.000 m. de espesor, las rocas ultramáficas ocupan 1-2% de los antiguos CRV de Guayana, basaltos y rocas gabroides hasta un 75%, basandesitas y flujos de lavas andesíticas alrededor de un 15-17% y rocas volcánicas félsicas y piroclásticas un 8% (Renner & Gibbs, 1.987).

### **Formaciones del Supergrupo Pastora:**

- **La Formación El Callao:** tiene más de 3.000 m de espesor y está litológicamente formada por casi exclusivamente lavas basálticas, bajas en potasio y altas en hierro, a flujos de lavas andesíticas con un predominio transicional entre ambas, basandesitas, con estructuras almohadilladas altamente espilitizadas, con cantidades menores de brechas de flujo al tope, levemente metamorfizadas, cuarcitas, cherts ferruginosos y manganesíferos y esquistos talcosos o basaltos komatíticos-toleiticos aparecen en pequeños volúmenes en algunas localidades. Cerca del contacto de las rocas de El Callao con las rocas graníticas del Complejo de Supamo, presentan hornblenda color azul-verdosa y plagioclasa andesina de facies Anfibolita y a medida que nos alejamos del contacto observamos esquistos de color verde más claro, con clorita y albita, de la Facies Esquistos Verdes. Geomorfológicamente, la Formación El Callao ocupa las colinas y montes más altos (300 a 600 m.s.n.m.) que meteorizan a suelos lateríticos muy arcillosos de color rojo intenso (Mendoza, 2005).

- **La Formación Cicapra:** presenta un espesor de unos 2.000 m de paquetes alternantes, rítmicamente compuesto cada uno de tobas básicas submarinas, grauvacas turbidíticas y limolitas volcanogénicas, tobas líticas, tobas brechoides, aglomerados volcánicos y en el tope cherts hematítico-manganesíferos. Estas rocas están metamorfizadas a la facies de esquistos verdes, con esquistos porfirobásticos formados de actinolita-epidota-biotita-albita, con poco cuarzo. De hecho muchas de estas rocas tienen composición química komatítica y basalto komatítica (Mendoza, 2005).

- **La Formación Florinda:** Litológicamente está compuesta de metabasaltos almohadillados, toleiticokomatíticos o magnesianos, intercalados con rocas ígneas posiblemente intrusivas alteradas con abundante talco y carbonatos, de composición komatítica y que se describieron originalmente (Menéndez, 1968) como serpentinitas de Currupia. Según Menéndez (1.994) algunas de las lavas komatíticas muestran textura espinefex, preservada localmente hasta en zonas anfibolíticas.

- **La Formación Yuruari:** según Menéndez (1.968, 1.994) suprayace, concordantemente, a las formaciones El Callao y Cicapra. Sin embargo, la Formación El Callao está por encima de la Formación Yuruari, en contacto de falla inversa de ángulo bajo a intermedio. Está compuesta litológicamente de filitas, esquistos y metatobas félsicas, metalutitas negras de hasta 50 m de espesor. Los esquistos y filitas no parecen ser metasedimentarios, sino más bien tobas y lavas félsicas (dacíticas y riódacíticas) metamorfizadas. Cerca del contacto de las formaciones Yuruari-El Callao se observan pequeñas intrusiones pórfídicas félsicas en las lavas de El Callao. Se ha interpretado que tales felsitas intrusivas en El Callao son comagmáticas y coevales con las felsitas de Yuruari. El espesor de esta formación, es de por lo menos 1.000 m y geomorfológicamente ocupa colinas bajas y sabanas, con vegetación tipo chaparros, con suelos lateríticos de colores amarillentos a algo rojizos.

#### **Formaciones del Grupo Botanamo**

Benaim (1.972) definió al Grupo Botanamo al Sur de la Región de Guasipati, en el CRV de El Dorado-Marwani, como constituido por las formaciones Caballape y Los Caribes.

- **Formación Caballape:** esta formación yace discordantemente sobre rocas del Supergrupo Pastora y en general no son cortadas por intrusiones de granitos del tipo Complejo de Supamo, es decir que claramente son de edad post-Pastora y post-Supamo. El LEV (1997) publica una columna con granitos del Complejo de Supamo reactivado en el Grupo Botanamo. En la zona de El Callao-Tumeremo, Quebrada Caballape, aflora una buena sección de grauvacas gradadas, limolitas y conglomerados (80)% con cantidades menores de tobas, brechas y flujos piroclásticos

de composición andesítica a riódacítica que según Benaim (1.972) corresponde a la parte inferior o basal de la Formación Caballape. Esta secuencia fue intrusionada por sills de gabros y fueron conjuntamente plegados, replegados y metamorfizados con ella.

- **Formación Los Caribes:** consiste en una intercalación de filitas grises y verdosas que gradan a rojas, que son las más abundantes y se interestratifican con areniscas rojas, con conglomerados polimicticos, limolitas y algunas tobas félsicas. El paso de la “Formación Caballape” del Rio Botanamo a la Formación Los Caribes fué transicional y gradacional y así parece ser también el cambio de una atmósfera cada vez menos reductora a una atmósfera cada vez más oxidante en la medida que nos acercamos a rocas con edades cercanas a los 2.0 Ga como es el referido caso.

### **Complejo Supamo**

Según, Mendoza (1.975), como un conjunto de rocas graníticas, intrusivas, y/o reactivadas, en rocas del Supergrupo Pastora, con alto contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$ , tales como tonalitas, trondjemitas, granodioritas cuarzo-monzonitas, gneises y migmatitas equivalentes. Las rocas graníticas con normal a alto contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  y bajo a normal de  $\text{Na}_2\text{O}$ , o granitos “sensus estricto”, fueron consideradas por esos autores, como granitos más jóvenes, evolucionados e inclusive intrusivos en el Complejo de Supamo y hasta intrusivos removilizados en los Cinturones de Rocas Verdes más jóvenes como el de Botanamo. Los granitos del Complejo de Supamo, generalmente, forman domos expandidos y arqueados contra los apretados y replegados sinformes de los cinturones, como los domos de El Manteco, Santa Justa y otros. Asociados a estas rocas existen una serie de plutones pequeños y pórfidos ricos en cuarzo. Geomorfológicamente forman áreas bajas y planas, sabanas, con escasa vegetación y suelos muy arenosos, ricos en cuarzo y en vetas de cuarzo estériles, que desarrollan suelos arenosos de color blanco grisáceo a amarillento.

### **2.3 Provincia de Roraima**

La Provincia Geológica de Roraima se extiende desde los límites del Parque Nacional Canaima, hacia el Km 95 cerca de la Piedra de la Virgen, hasta Santa Elena

del Uairen en dirección NS y desde el río Venamo hasta las proximidades del río Paragua en dirección EW. Esta provincia está compuesta por rocas del Grupo Roraima con intrusiones de diabasas y rocas gabronoríticas cuarcíferas a dioríticas cuarcíferas (Asociación Avanavero) (Mendoza, 2005).

En general, Roraima carece de marcado tectonismo (sinclinales suaves muy abiertos y de muy bajo buzamiento) con algún fallamiento, incluso fallas de arrastre como en el Tepuy de Parú, frente a Kakuri, Alto Ventuari en el Estado Amazonas, relacionados a la Orogenia Nickeriana y de levantamientos epirogénicos. Briceño y otros (1.989) concluyen que los tepuis son el producto de inversión topográfica de remanentes de sinclinales de ejes con inclinación en ambas direcciones y las áreas bajas alrededor de los tepuis corresponden a erosionados anticlinales (Mendoza, 2005).

Según (Mendoza, 2005), el Grupo Roraima está dividido principalmente en 4 formaciones: Uairén, Kukenan, Uaimapué y Mataui.

- **La Formación Uairén:** aflora en y cerca de Santa Elena del Uairén, al final de la Gran Sabana y presenta un espesor de unos 800 a 900 m. Su contacto inferior es discordante sobre tobas meteorizadas del tipo Volcánicas de Caicara, pertenecientes a la Formación Pacaraima que se extiende hacia Brasil como Formación Surumú y forma la divisoria de aguas entre Venezuela y Brasil en esa región. Esta a su vez se encuentra dividida en dos miembros: un miembro inferior de unos 600 m de espesor, compuesto de areniscas cuarcíticas de grano grueso, bien escogidas, con estratificación cruzada y festeonada, intercaladas con lentes conglomeráticos de matriz silicea y con escasas limolitas arcillosas y el miembro superior, de unos 100 m a 300 m de espesor, formada por areniscas cuarcíticas de grano medio, con abundante estratificación cruzada y escasos conglomerados intercalados.

- **Formación Kukenan:** se encuentra concordante y supradacente a la Formación Uairén, de un espesor máximo de 100 m, integrada de paquetes alternantes, compuesto cada uno de tope a base de areniscas feldespáticas, limolitas feldespáticas y lutitas o arcillitas.

- **Formación Uaimapué**, se encuentra concordante y supradacente a la Formación Kukenan, con un espesor máximo de 250 m, que puede ser separada también en dos miembros, uno inferior similar litológicamente a la Formación Uairén, constituido por areniscas de grano fino a grueso con estratificación cruzada y conglomerados, intercalados con delgadas capas de limolitas y arcillitas; y de un miembro superior, formados por arcosas, jaspes, limolitas y tobas vitreas, de variados colores (rojizos, verdes, crema-amarillentos y grises). Las tobas vitreas han sido tomadas como capas guías dentro de la estratigrafía de Roraima y dateadas extensamente en Suriname, Guyana y Venezuela.

- **La Formación Mataui**: se encuentra concordante y supradacente a la Formación Uaimapué, es la unidad más joven del Grupo Roraima, que ocupa gran parte de los elevados y verticales tepuis, formados por ortocuarcitas y areniscas cuarzo-feldespáticas con estratificación cruzada, marcas de oleaje y areniscas masivas, con algunos horizontes muy delgados de areniscas arcillosas o lutáceas. El espesor de esta formación puede ser mayor a los 1.000 m. En el Estado Amazonas en el Grupo Roraima no se observan casi conglomerados y al parecer están totalmente ausentes jaspes y tobas vítreas.

### **Ambientes de Depositación**

Las rocas de Roraima fueron depositadas en ambientes mayormente fluviales, deltaicos, a localmente marino costeros, lacustrinos, en canales de ríos de baja sinuosidad y llanuras aluviales, distributarios deltaicos encima de lagos interdelticos, lagunas costaneras a bahías interdelticas, playas sin barras y llanuras intramareas (Sidder y Mendoza, 1.995).

La Estratificación cruzada, rizaduras y orientación de guijarros de los conglomerados indican que los sedimentos para la Roraima de la Gran Sabana fueron transportados desde fuentes localizadas al NE, E y SE. Las cuencas de sedimentación fueron varias, limitadas por fallas con basamentos emergentes entre ellas simultáneas y también separadas en el tiempo (Ghosh, 1985)

Las rocas sedimentarias, facies molasa, de Roraima ocurrieron después de la Orogénesis Transamazónica, en una corteza relativamente estable. En efecto, el

espesor del escudo no alcanzó su máximo de estabilización y cesación de la deformación y magmatismo, sino que más bien siguió un proceso pasivo de fallamiento y deslizamiento de la corteza continental (intrusiones del Grupo Cuchivero y relacionadas) con una subsecuente subsidencia general y sedimentación que se extendió por varios cientos de millones de años hasta alcanzar su casi estabilización. Las areniscas de Roraima registran este largo período de subsidencia y sedimentación continental a marino costera que comenzó en la parte oriental, Suriname - Caroní, mientras Imataca y Cuchivero permanecían como tierras altas y progresivamente fue migrando del Este hacia el Oeste con sedimentación solo en el Oeste del Caroni-Amazonas de la parte superior de Roraima, la Formación Mataui y sus equivalentes, incluso sedimentada después del también anarogénico Granito Rapakivi de El Parguaza (Mendoza, 2005).

Las diabasas y rocas asociadas, cuarzo gabroides y norítico-gabroides hasta cuarzo dioríticas y granófiros, forman como una especie de ejambre de diques y sill intrusivas en Roraima y ocurren emplazados a lo largo de las zonas de debilidad tectónica tales como los contactos inferior (Roraima/Supamo) e intraformacionales (Uairén/Kukenan, Kukenan/Uaimapué, Uaimapué/Mataui) con edades próximas a las edades de las tobas félsicas (volcanismo bimodal típico del Proterozoico), o sea de unos  $1.670 \pm 14$  Ma por Rb/Sr roca total a  $1.640 \pm 58$  Ma, roca total, en Suriname (Mendoza, 2005).

Estas rocas máficas no metamorfozadas denominadas primeramente como Asociación Intrusiva en Roraima, hoy se conocen como Asociación Avanavero y se extienden intrusivas en las partes basal a media de Roraima desde el Río Paragua a la Gran Sabana, Guyana, Suriname, posiblemente Guayana Francesa y en el Escudo Reguibat, con 1.600 Ma, de Africa Occidental. Así como tales diabasas no intrusionaron al granito rapakivi de El Parguaza, tampoco alcanzaron a intrusionar a las rocas de Roraima en Amazonas, porque son posteriores a tales intrusiones registradas por lo tanto sólo en la parte Oriental del Escudo (Mendoza, 2005).

## 2.4 Provincia de Cuchivero

Esta Provincia incluye rocas volcánicas riolíticas y tobas asociadas, comagmáticas con granitos calco-alcinos de la Asociación Cuchivero; areniscas, conglomerados, limolitas, lutitas y tobas del Grupo Roraima; *sills*, diques, apófisis, stocks de rocas diabásico-cuarzo-gabronoríticas de la Asociación Avanavero, el Granito *rapakivi* del Parguaza y complejos alcalinos como el de La Churuata y rocas asociadas, así como intrusiones de carbonatita (cerro Impacto) y de lámprofiros y kimberlitas eclogíticas (quebrada Grande). La Provincia de Cuchivero parece extenderse hacia el sur-sureste en el estado Amazonas, formando gran parte de las rocas de un Proterozoico no diferenciado, (Sidder & Mendoza, 1.995) y continua en Brasil como parte de la Provincia Ventuari-Tapajós (Mendoza, 2005).

Las provincias de Imataca y Pastora, aflorantes al este del río Caura, están en contacto discordante y de falla, el denominado Frente Tectónico Caura, con la provincia Cuchivero, aflorante al oeste del río Caura, que en parte es la zona de encuentro o sutura de tres provincias geológicas con rocas, metamorfismo, tendencias estructurales, recursos minerales y edades completamente diferentes, y de ambientes geotectónicos contrastantes (Mendoza, 2005).

Mendoza (1.974), define el área del río Suapure como la sección más completa de la Provincia Cuchivero con el nombre de Supergrupo Cedeño (SC) formado por el Grupo Cuchivero (Formación Caicara, Granito de Santa Rosalía, Granito de San Pedro - Guaniamito), metabasitas y el Grupo Suapure (Granito de Pijiguo y Granito *rapakivi* del Parguaza). Discordantemente sobre el Supergrupo Cedeño yacen rocas sedimentarias del Grupo Roraima.

### Asociación Cuchivero

El Grupo Cuchivero, ahora denominado Asociación Cuchivero, fue definido por (Ríos, 1972), está definida por rocas volcánicas riolíticas de la Formación Caicara, ahora Volcánicas de Caicara, y los granitos biotíticos de Santa Rosalía y hornbléndicos de Guaniamito y San Pedro (Mendoza, 1974). En general, la Provincia de Cuchivero equivale o forma parte de la Provincia Ventuari-Tapajós, que ocupa una porción occidental del Cratón Amazónico y está formada por una serie de arcos

magmáticos de edad 1,98-1,88 Ga y que se caracteriza por un marcado *trend* tectónico NW-SE desde los ríos Cuchivero-Ventuari hacia el río Tapajós, y consiste esencialmente de rocas granitoides calco-alcalinas (Tassinari et al., 2000) y su basamento en el sur del Escudo de Guayana, en Venezuela, son gneises y migmatitas tonalíticos, similares a los del Complejo de Supamo (2,24 Ga en granodioritas de Las Bonitas y Bártica), pero recrystalizados y que dan edades de solo 1,75 Ga a 1,83 Ga para los gneises de Minicia - Macabana y las Cuarzo-dioritas de Atabapo, respectivamente (Mendoza, 2005).

### **Asociación Suapure**

El “Grupo” Suapure, cambiado por Asociación Suapure, fue definido por Mendoza (1974), como compuesto por el Granito de Pijiguaos y el Granito rapakivi del Parguaza, excelentemente expuestos en los domos de Los Pijiguaos, a pocos kilómetros al oeste del río Suapure, en el paso de San Pedro. Estudios posteriores del M.E.M. indicaron que el Grupo Suapure lo constituyen el Granito rapakivi del Parguaza y todas sus facies: subvolcánicas, como el Granito de Pijiguaos, los Pórfidos riocáciticos del Guayapo; hipabisales o de profundidad intermedia, como la Granodiorita del Sipapo; y plutónicas, como cuarzo-sienitas y anortositas a rocas muy como bauchitas. Luego se incluyó por su edad y composición mineralógica en la Asociación Suapure al Granito de Guaniamito (Mendoza et al., 1977).

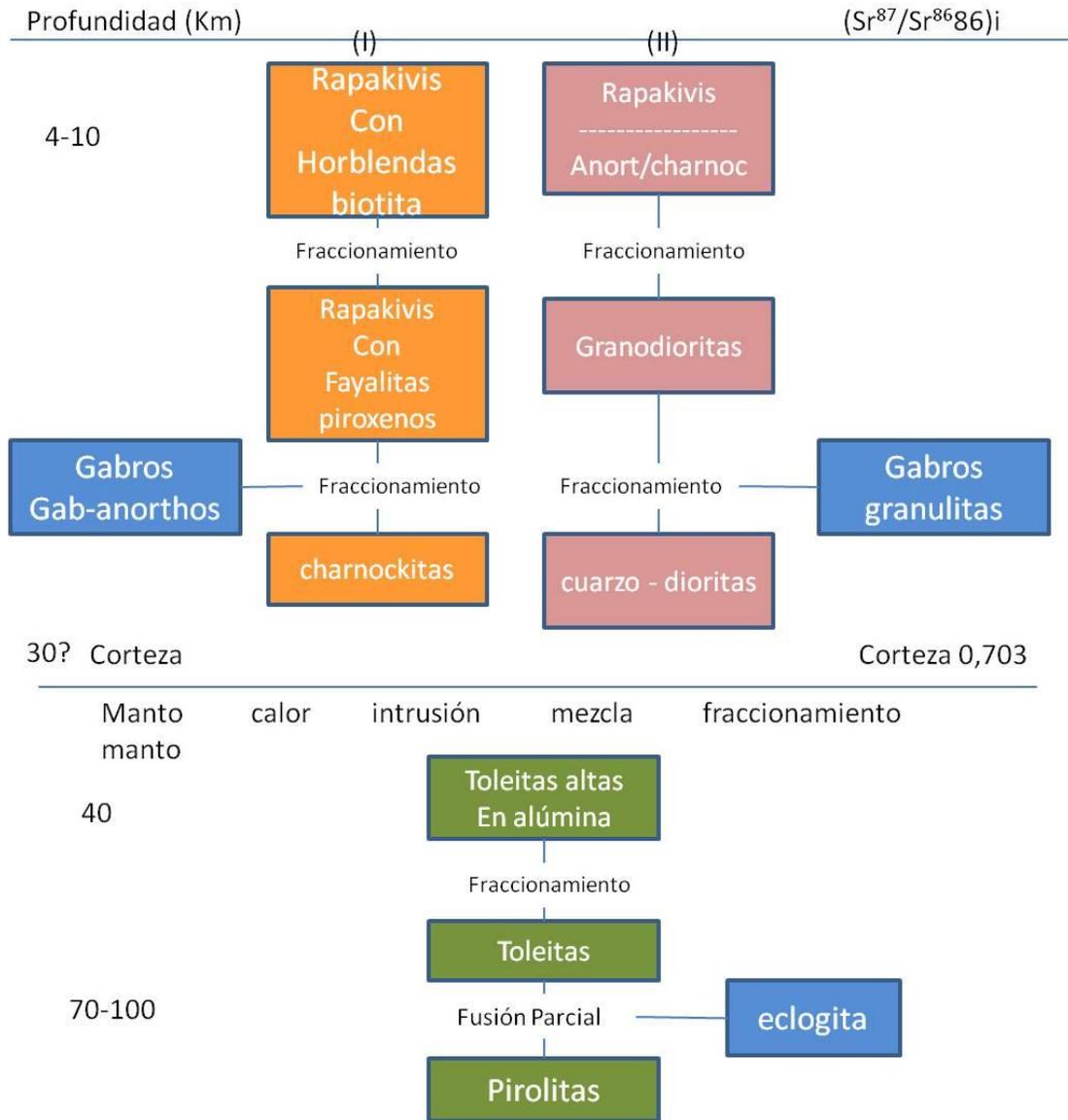
El Granito de Pijiguaos aflora en la mitad inferior de los domos del mismo nombre, en contacto no transicional con el Granito Rapakivi del Parguaza (GRP). Es un granito de grano fino, equigranular, aspecto algo recrystalizado parcialmente homogéneo por el GRP, muy rico en cuarzo y microclino, con textura moteada en la que se observan dos o más generaciones de cuarzo, posiblemente correspondientes con las pulsaciones o intrusiones inmediatas posteriores del GRP (Mendoza, 2005).

### **Granito Rapakivi del Parguaza**

El granito rapakivi del Parguaza es una roca masiva, de color gris, de grano muy grueso, con textura inequigranular rapakivi, tipo wiborgita, con bajo a moderado contenido de cuarzo (5%-20)% alto de microclino-pertita (25%-55)%, moderado de

oligoclasa (15%-30)% y notorio de minerales máficos enriquecidos en FeO (biotita 3%-17%, hornblenda 1-24% ± clinopiroxeno) con cantidades menores de magnetita, ilmenita, circón y fayalita. Son rocas metaluminosas a peraluminosas, de afinidad toleítica, ricas en Fe, K, Rb, Ni, Th, F y REE, muy fraccionadas (Figura 19) (Mendoza, 2005).

El granito rapakivi del Parguaza muestran zonamiento inverso (con rocas más félsicas hacia dentro del Plutón y más máficas en los bordes y ocupa una gran superficie desde Los Pijiguaos al este hasta Puerto Ayacucho al oeste y desde el río Orinoco al norte hasta la confluencia con el río Ventuari en Amazonas, al sur. El Plutón tiene forma elíptica, con un eje N-S de 250 km y un eje E-W de 120 Km (Mendoza, 2005).



**Figura 19:** Evolución magmática de Granitos Rapakivis del Parguaza. Tomado de Mendoza (2005)

### Evolución del Escudo de Guayana

A continuación un breve resumen sobre la evolución tectónica del escudo de Guayana, según Mendoza (2005):

a) **Orogenia Guriense, > 3.4 Ga**, formación de primitivos Cinturones Rocas Verdes – Tonalita, Trondjemitas Granodioritas (CRV-TTG).

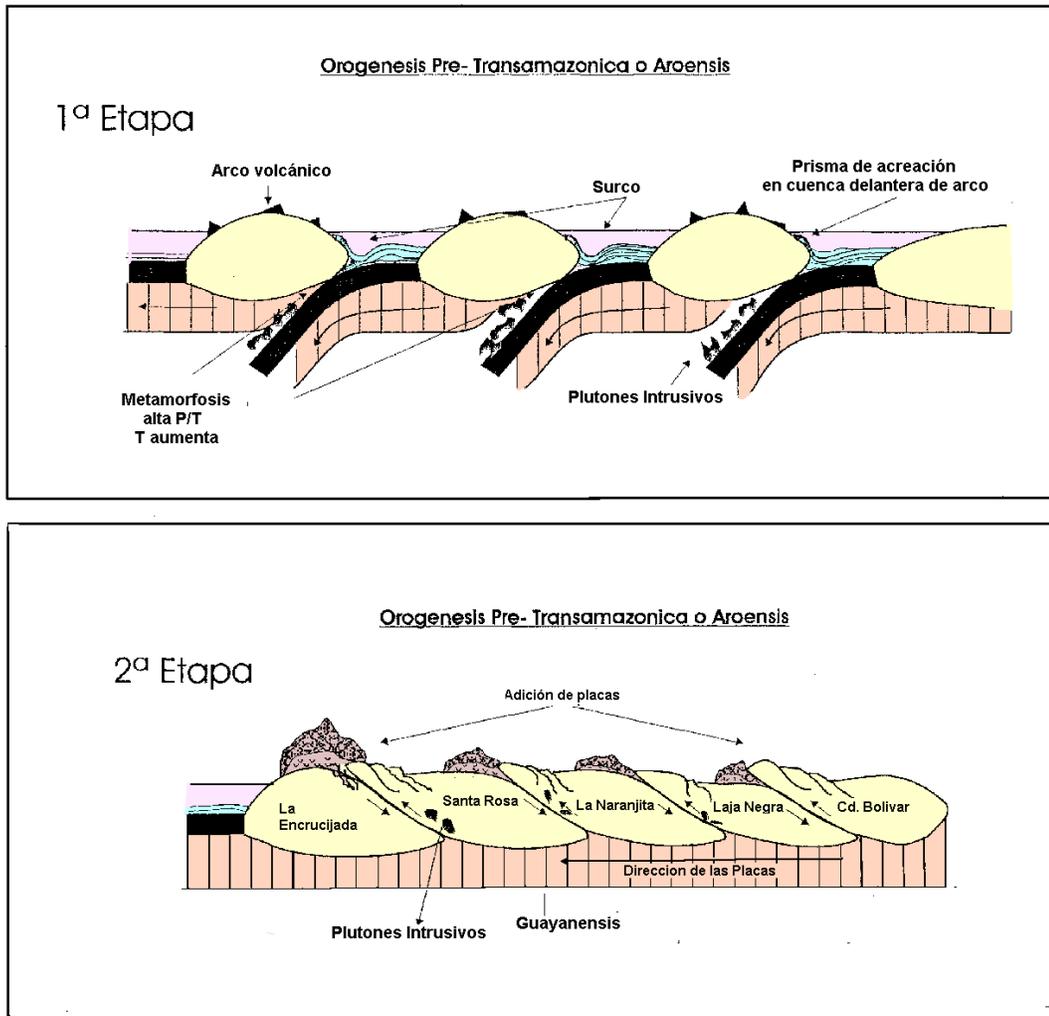
**b) Orogénesis Pre-Tránsamazónica o Aroensis: 2.96 Ga – 2.85 Ga,** anfibolitización. Granulitización y migmatización de a). Aglutinación, collage, de un gran supercontinente que designamos con el nombre de Guayanesis o Kenorano hacia 2.5 Ga (Condie & Sloan, 1998).

**c) Disrupción o rifting del supercontinente Guayanesis: 2.4 Ga -2.3 Ga.** Intrusiones de magmas basálticos, anarogénicos, emplazados del manto superior a la corteza Imataca. Estas rocas aún no han sido plenamente identificadas.

**d) Orogénesis Transamazónica:** desarrollo de los océanos Pastora, Barama - Mazzaruni etc, formándose los CRV de Pastora, Botanamo y equivalentes y rocas graníticas TTG de Supamo, Báltica y equivalentes; subducción, cierre de esos océanos; colisión de los CRV-TTG con las rocas granulíticas, migmatíticas y anfibolíticas de Imataca-Kanukú, etc: de 2.3 Ga -1.95 Ga, granulitización de a) y b) de rocas de Imataca, formando parte del aglutinamiento y formación de otro gran supercontinente denominada Atlántica (Rogers, 1.996). Rocas TTG de Supamo también intrusieron al Complejo de Imataca en 2.22 Ga en La Esperanza.

**e) Al final de la orogénesis Transamazónica o Evento Orocaima: 1.98 Ga-1.88 Ga,** FEV, rocas graníticas intrusivas del NO Estados Bolívar y Amazonas. Evento tectonotermal suave que no afectó casi al Complejo de Imataca, aunque intrusiones de granitos más jóvenes de este evento también cortaron al Complejo de Imataca.

**f) Colisión de Imataca-Pastora (parte del Supercontinente Atlántica) con el arco magmatico de Cuchivero:** 1.85-1.80 Ga. Ampliación del Supercontinente Atlántica con Cuchivero, Báltica, etc. La Zona de Sutura se denomina Frente Tectónico Río Caura.



**Figura 20:** Evolución geodinámica de Imataca (1ª etapa) por compresión entre placas oceánicas con cambio de subducción a la izquierda y (2da etapa) sucesiva sobre posición o aglutinación de los arcos o microcontinentes formando parte del supercontinente Guayanensis o Valvaara o Kenoriano. Tomado de (Mendoza,2005)

**g) Sedimentación de facies molasoides del Supergrupo Roraima:** Inicio de fracturamiento del supercontinente Atlántica-Caura y emplazamiento de las rocas básicas de la Asociación Avanavero. No se conocen sin embargo remanentes de Roraima sobre Imataca, aunque si existen rocas básicas intrusivas equivalentes de Avanavero en Imataca.

**h) Disrupción y rifting mayor del gran supercontinente Atlántica-Caura:** 1.60 Ga-1.35 Ga, con el emplazamiento de material del manto a la corteza, su mezcla o contaminación con material basal costral granulítico-charnockítico del tipo Complejo de Imataca y la diferenciación de ese magma híbrido o contaminado para dar origen a los granitos rapakivis de El Parguaza, Surucucú y equivalentes.

**i) Desarrollo de pequeños mares, sedimentación de rocas carbonático-dolomíticas** y algunas sedimentarias samíticas y pelíticas clásticas, con pocas y escasas volcánicas dacítico-andesíticas intercaladas. Gran parte de esta secuencia fue erosionada después de la orogénesis siguiente Nickeriana o Grenvilliana. Emplazamiento de algunos complejos máficos-ultramáficos y alcalinos en áreas continentales hacia 1.4 Ga-1.3 Ga. Algunas dolomitas, de edad no establecida aún, aunque asumida Arqueozoica, aparecen en el tope del Complejo de Imataca. Sin embargo las dolomitas de edad Grenville o Nickeriana fueron, aparentemente erosionadas en el Escudo de Guayana.

**j) Orogénesis Nickeriana:** cierre de los mares, nueva colisión de placas y aglutinamiento de bloques hacia 1.2-1.0 Ga, milonitización y reactivación de Fallas como la de Guri, FEV, metamorfismo retrógrado de b) y d). Esta orogénesis equivale en tiempo a la Orogénesis Grenville cuya fase final de colisiones múltiples y aglutinamientos condujo a la formación del supercontinente Rodinia (1.0 Ga).

**k) Disrupción o rifting del supercontinente Rodinia:** reactivación de grandes fallas y cruces de fallas, a través de las cuales se emplazaron complejos carbonáticos (Cerro Impacto), lamprófiros (0.85 Ga) y kimberlitas eclogíticas (0.71 Ga) de Quebrada Grande, Guaniamo. Al final de este evento, mejor desarrollado al SE de Brasil, Cratón San Francisco y Africa Occidente, conocido como Brasiliano-Pan Africano, se formó otro nuevo supercontinente, Gondwana, hacia 0.55Ga,-0.45Ga como la parte sur del futuro supercontinente Pangea. Gran cantidad de pegmatitas y aplitas intrusivas en Imataca podrían ser de edades de las orogénias Nickeriana y Brasiliana.

**l) Después de la Orogénesis Herciniana** con Ciclos de Wilson de unos 200 Ma se separa el supercontinente Pangea en bloques continentales y comienza a formarse

el Océano Atlántico. De ello tenemos algunos diques de rocas gabroides a norítico-diabásicas intrusivos en el Complejo de Imataca. La Falla de Guri actúa como una falla de transformación en la parte oceánica y como una falla transcurrente en la parte continental.

### **Falla de Guri**

Según Mendoza (2005), la falla del Guri es el rasgo megatectónico más relevante del Escudo de Guayana que separa las provincias de Imataca (al Norte de Guri) de Pastora (al Sur). Esta es una falla muy antigua, cuya evolución se postula como sigue:

#### **1. >2.400 M.a. Rift continental de Guri**

Comienzan a separarse Imataca y Kanukú y entre ellos se va formando y desarrollando un océano donde se originaron los CRV de Pastora y Barama-Mazzaruni.

#### **2. 2.150-1.960 M.a. Climax de la Orogénesis Transamazónica**

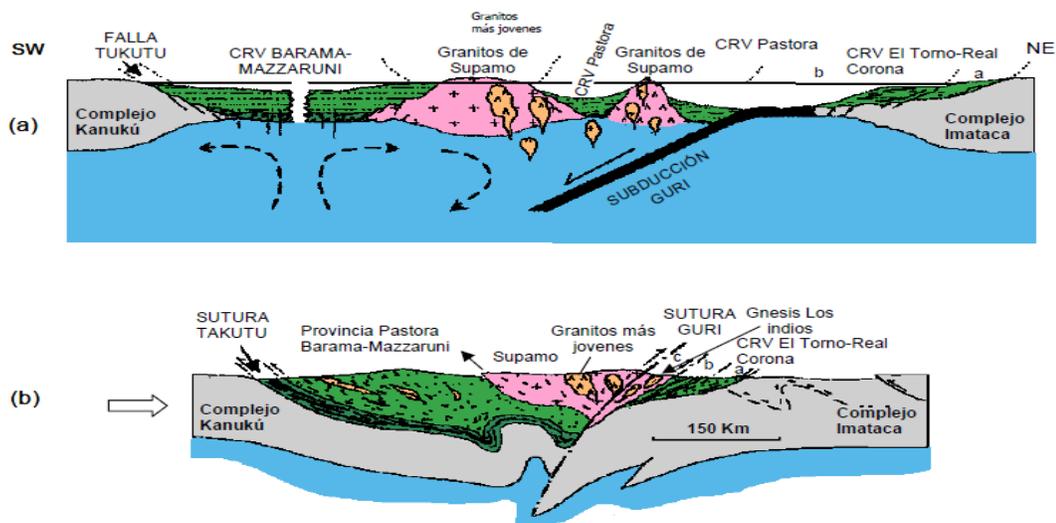
Cierre del océano Pastora. Choque de placas de Pastora versus Imataca. Guri actúa como una zona de sutura. Se produce la granulitización de las rocas de Imataca y metamorfismo Facies Esquistos Verdes a Anfibolita en los CRV más antiguos de Pastora (Figura 21).

#### **3. 1.900-1.800 M.a Final Orogénesis-Transamazónica**

Choque de tres o más placas continentales (Imataca, Pastora, Cuchivero). La zona del triple choque de placas origina el Frente Tectónico Caura y fracturas paralelas (Caroní, Cuhivero, Parguaza, Cabruta, etc.) que desplazan a la Falla de Guri, siendo la parte Sur, en Amazonas, de rocas tipo Cuchivero, metamorfozadas al nivel de la FEV.

#### **4. 1.200±200 M.a. Orogénesis Nickeriana**

Choque del megabloque Imataca-Pastora-Cuchivero-Parguaza-Roraima con el megabloque Rio Negro-Jurena (Brasil), Mitú-Garzón (Colombia). Se produce la intensa removilización, cizalla y cataclasis (seudotaquilitas) de la Falla de Guri, metamorfismo retrogrado bajo FEV, algunas intrusiones de aplitas y pegmatitas.



**Figura 21:** Estructura domica de los granitos sódicos del Complejo Supuamo y los sinformes de CRV de Pastora y Botanamo, b) cierre del océano y colisión de los CRV de Pastora y Botanamo contra el continente Imataca. La zona de colisión está representada por la Falla o Sutura del Guri al NE y de Takutu al SW. (Tomado de Mendoza, 2005)

#### 5. 800-300 M.a. Cruce de fallas Cabruta-Guri se emplazan Carbonatitas

En el cruce de fallas Cabruta y prolongación de Guri se emplazaron carbonatitas y cerca de esa intersección en la falla Cabruta se emplazaron kimberlitas eclogíticas diamantíferas intrusivas en la Provincia Cuchivero en 711 Ma y lámprofiros de 850 Ma.

#### 6. 210-190 M.a. Apertura Océano Atlántico

Guri se comporta como una falla de transformación en la parte oceánica y como falla inversa de ángulo alto (Imataca sobre Pastora) en la parte continental. La Falla de Guri se continúa o está alineada con la Falla Sassandra-Trou del Escudo Leo en Africa Occidental. A su vez Sassandra-Trou se continúa o es equivalente con la Falla Zednes en el Escudo Reguibat de Africa Occidental. A lo largo de esta gran falla se emplazaron diabasas, rocas gabroides y posiblemente rocas ultramáficas del manto superior.

7. 150 M.a. Levantamiento, erosión, quietud tectónica: Guri se ha comportado desde entonces como una falla pasiva, inactiva.

### **3 GEOLOGÍA LOCAL**

#### **3.1 Cuencas de los ríos Cuchivero – Guaniamo**

Las regiones de los ríos Cuchivero, Aro y Paragua, concentran un grupo de rocas ígneas, esquistos metalavas y metatobas félsicas, cuarcitas micáceas y metaconglomerados del Grupo Cuchivero. El río Cuchivero nace en la vertiente noroeste de la altiplanicie de Icutú, en la serranía de Guamapí de la sierra de Maigualida, drena en una cuenca de aproximadamente 16.000 km<sup>2</sup> de extensión, y tiene una longitud de 305 km, mantiene un rumbo predominantemente norte-noroeste hasta su desembocadura aguas abajo de Caicara del Orinoco. En su recorrido recibe por el oeste o margen izquierda, al río Guaniamo, su principal afluente y por el este, al Sariapo (Mendoza, 2000)

En la zona oeste del estado Bolívar, la secuencia metavolcánica ha sido nombrada Formación Caicara (Ríos, 1972) y los cuerpos intrusivos se han llamado, de acuerdo a sus características: Granito de Guaniamito, Granito de Santa Rosalía y Granito de San Pedro (Mendoza, 1972). Estas rocas podrían pertenecer a un ciclo magmático común (Mendoza, 2000). Asimismo en las colinas a los costados del camino Santa Inés - Morichal Negro, poblados situados al sur de Caicara del Orinoco, se encuentra la Formación Caicara de edad Mesoproterozoico, que está constituida por un conjunto de rocas metavolcánicas predominantemente félsicas, tales como riolitas y riolitas porfídicas con matriz de grano fino a medio, seguidas en orden de abundancias por riolitas y dacitas porfídicas. La composición mineralógica es muy similar en toda la región; cuarzo (30-60)%, en cristales subhédricos a anhédricos y como relleno de espacios intercrystalinos, feldespato (25-60)%, como microclino y microclino perítico, y plagioclasa (albita y andesina). La biotita es el principal constituyente ferromagnesiano (hasta un 5)%. Como minerales accesorios se distinguen: epidoto, muscovita, pirita y óxidos de hierro. La unidad está en contacto intrusivo con los granitos de Santa Rosalía, Guaniamito y San Pedro. Los contactos son nítidos y se observa un marcado cizallamiento y efectos de metasomatismo (potásico principalmente) a lo largo de ellos en la secuencia volcánica intrusionada.

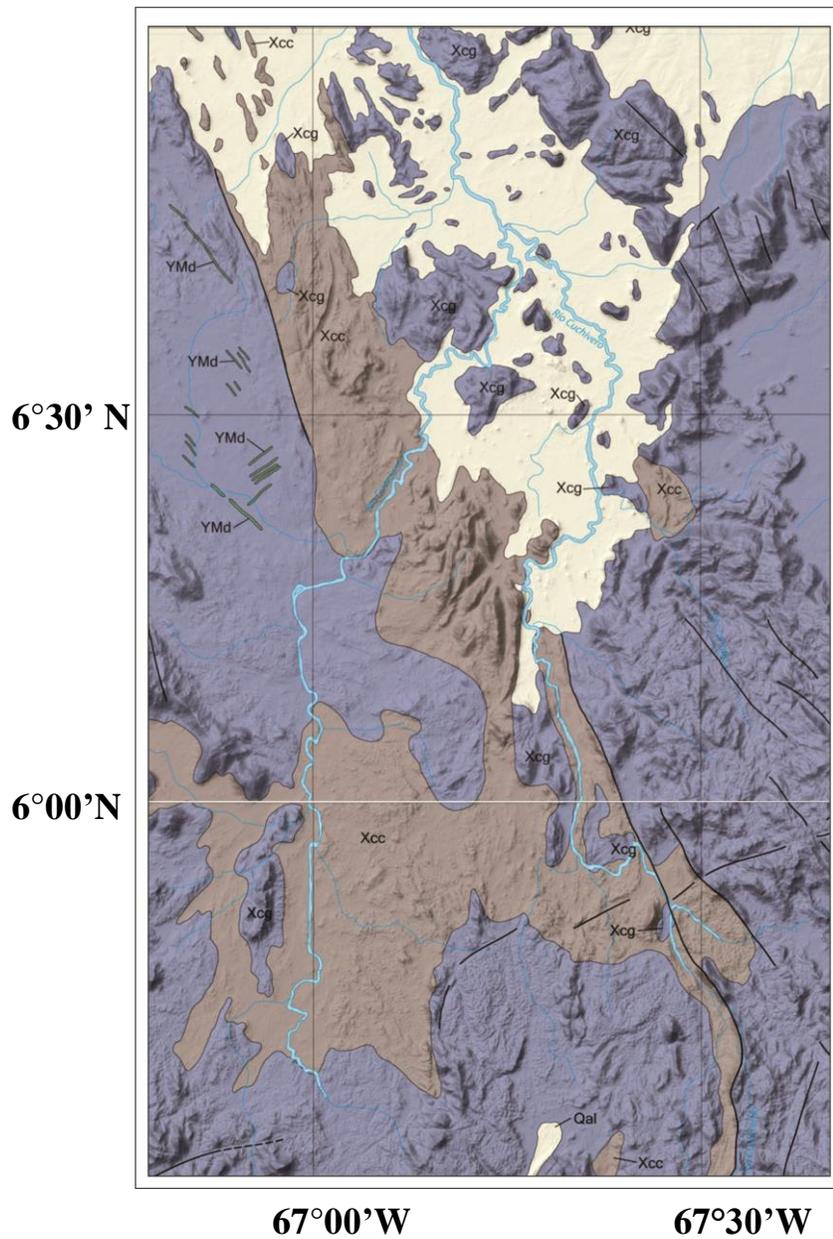
Se encuentra localmente en contacto de falla con el Granito del Parguaza (Mendoza, 1972).

El Granito de Guaniamito, por su parte, aflora extensamente en los cerros El Tigre, Cacarraño, Las Vainillas y El Chingo, y en ríos como el Guaniamo y la quebradas La Magdalena, situados al oeste del río Cuchivero. La unidad está constituida por rocas de composición granítica, ricas en minerales félsicos en gran parte con textura gnéisica, de grano medio a grueso, holocristalinas, porfídicas, que hacia las zonas de contacto con las rocas volcánicas muestran indicios de metasomatismo y deformación mecánica (Rios, 1972). Hacia las zonas centrales de los afloramientos disminuye el carácter gnéisico. La roca está constituida por cuarzo (10-30)%, feldespato (25-65)%, biotita (1-8)% y menores cantidades de muscovita o sericita. Como accesorios comunes se encuentran titanita, epidoto, hornblenda, circón y magnetita (Mendoza, 2005).

El Granito de Santa Rosalía aflora extensamente en los valles de los ríos Cuchivero y Guaniamo, y soporta las mayores elevaciones de la región. Es un granito biotítico, color rosado a gris, de grano fino a grueso. Su composición mineralógica, bastante constante en todas las localidades, consiste de: cuarzo (35)%, biotita como principal componente máfico (5)% y cantidades menores de hornblenda, epidoto, clorita y opacos. Este granito es intrusivo en las rocas volcánicas de la Formación Caicara. En el área del río Suapure, el Granito del Parguaza es intrusivo en el Granito de Santa Rosalía; se caracteriza por contenidos relativamente altos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Rb}/\text{Sr}$  y bajos contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{K}/\text{Rb}$ . La unidad es fuente probable de casiterita, columbita y de tantalita (Mendoza, 2005).

**Tabla 8: Evolución Geológica estructural de Guaniamo (modificada por Channer, 2001)**

Edad M.a	Eventos	Estructuras
3-Actual	Terrazas y aluviones cuaternarios.	Levantamiento de todo el Norte de Sur América, incluido Guaniamo, con fallamiento gravitacional normal.
150-30	Intrusiones de Carbonatitas?? Y Kimberlitas peridotíticas??? Por descubrir	En el SE de Brasil el trend Kimberlitas-carbonatitas de edad Cretácico es notorio. En el Norte del Escudo o se erosiono o no ha sido descubierto aun.
210-200	Apertura Pangea: emplazamiento de diques de diabasas tholeíticas.	En esta parte del Escudo siguen trends N-NW mientras en otras partes es el NE
600-545	Orogénesis Brasiliana ¿emplazamiento de aplitas y granitos pegmatíticos?	Evento termal en esta parte norte del escudo pero que fue muy activo tectónicamente en el SE de Brasil y NW de África.
750-700	Emplazamiento de diques y sills de kimberlitas eclogíticas diamantíferas de Guaniamo	Son atectónicas, sin desarrollo de fábrica penetrativa, aunque pueden estar algo falladas como los lamprófiro.
750-545	Disrupción del supercontinente Rodinia: emplazamiento de diques de lamprófiro.	Los lamprófiro están algo deformados por efectos de fallamiento
1.000-950	Consolidación del supercontinente Rodinia	
1.200-1.000	Orogénesis Nickeriana=Grenville. Colisión de grandes bloques continentales: formación de granulitas, charnockitas, migmatitas, anortositas, etc.	Colisión de Norte América – Báltica vs Sur América – África y otros continentes. Reactivación de fallas y desarrollo de trenes N-NE
1.400-1.300	Sedimentación parte Superior Supergrupo Roraima discordante sobre Grenitis rapakivis de El Parguaza	Sedimentación molaoside, post-orogénica o anorogénica como los granitos rapakivis, continental-borde continental pasivo.
1.600-1.400	Disrupción supercontinente Atlántica o Columbia y emplazamiento Asociación Anorogénica AMCG: anortositas, mangueritas, charnockitas, Granitos Rapakivis de Parguaza, granito de Guaniamito, Granito de Puente palo, sienita el toco y facies equivalentes.	Formación de largos y amplios rifts, sobre una zona de subducción o underplating, que permitieron el emplazamiento de material del manto diferenciado que mezclado con material costral dio origen el evento Rapakivi de carácter mundial. Algunos granitos, como Guaniamito y sienitas como el Toco desarrollan gneises por efecto de la Falla Cabruta.
1.770-1.650	Asociación Avanavero: “metabasitas” intrusivas en rocas de Cuchivero pero no en granito de El Parguaza	Fracturas de distensión, llegando algunas anchas como Qbda Grande e incluso mas anchas como el rift Cabruta-Venturi
1.930-1.790	Ranitos Arco magmático Cuchivero (granitos S. Rosalia, San Pedro)	Idem
1.980-1.930	Comienzo magmatismo Arco Magmático Cuchivero con volcánicas y piroclásticas F. Caicara	Arco Magmático de borde continental activo, foliado N-NW
2.100-1.950	Orogénesis Transamazónica: formación del Supercontinente Atlantica/Columbia	Suturas GURI y KANUKU: cierre de océanos Pastora, Barama-Mazzaruni, etc. Colisión de CRV Pastora-Botanamo, etc contra C. de Imataca.



Leyenda Mapa Geológico Guaniamo – Cuchivero



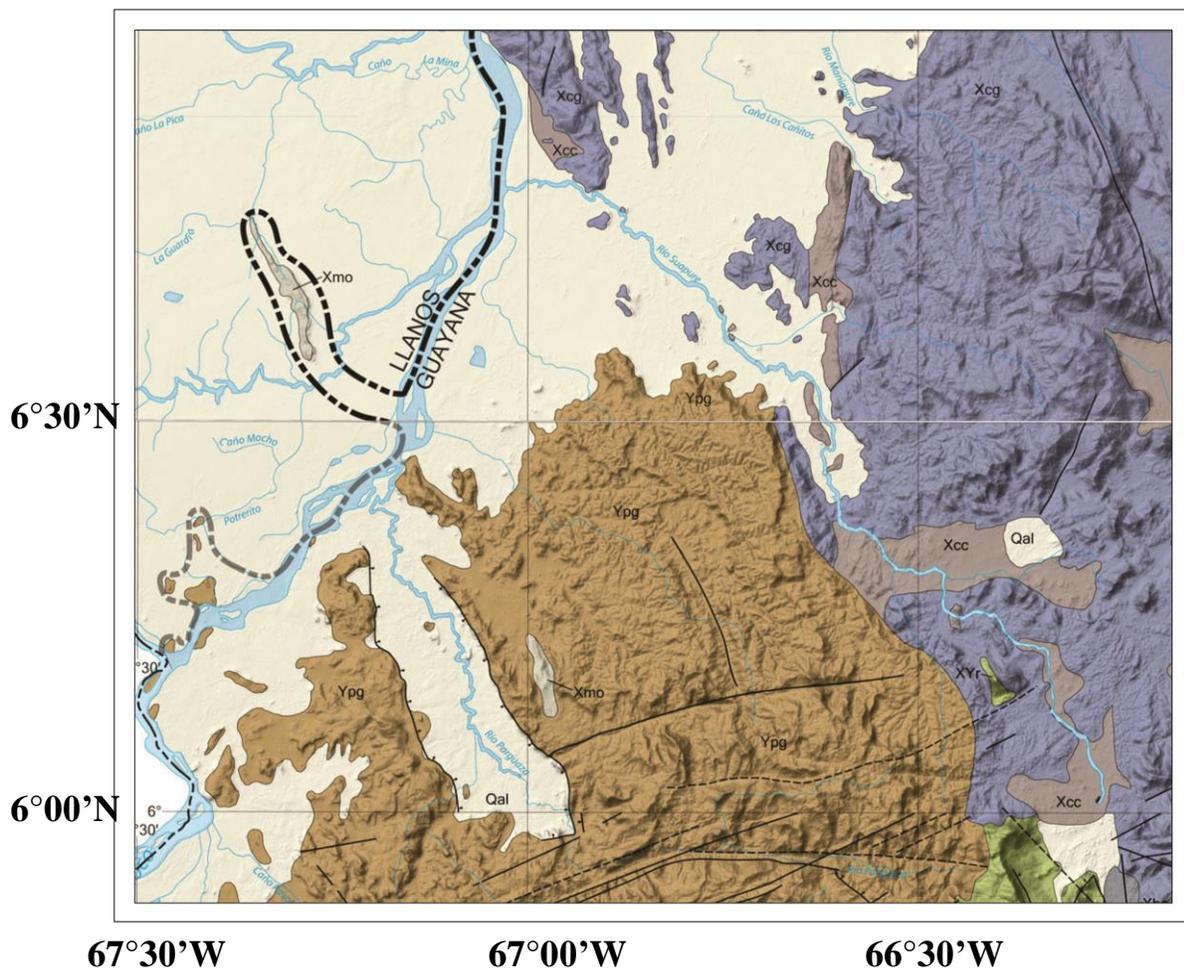
**Figura 22:** Mapa Geológico de Guaniamo- Cuchivero (tomado de la U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1109. Publicado 2006 en línea)

### **3.2 Cuenca del río Suapure**

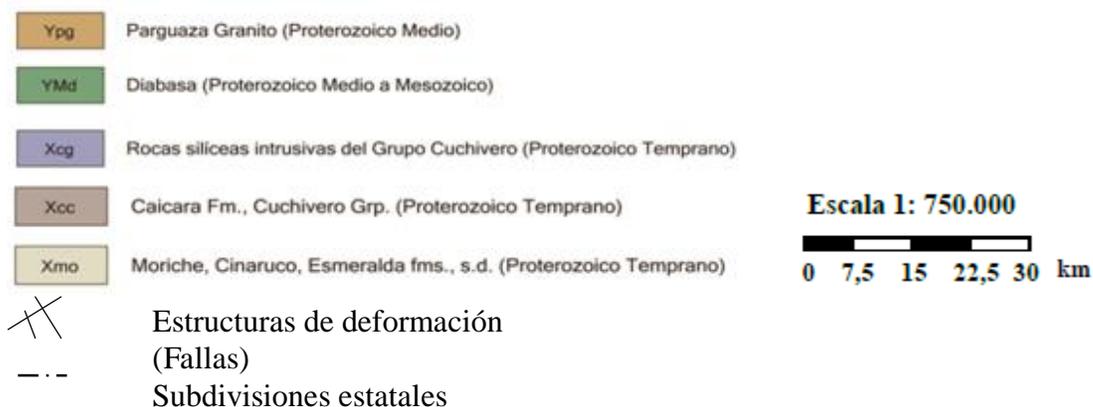
La cuenca del río Suapure, tiene un área aproximada de 8.000 km<sup>2</sup> y nace en la serranía de Yutajé en el área limítrofe entre los estados Bolívar y Amazonas. Discurre en dirección sureste-noreste sobre un basamento geológico conformado por rocas graníticas y volcánicas pertenecientes a la Provincia petrotectónica de Cuchivero, con algunas variaciones producto del control que imponen las estructuras geológicas del área (Figura 23). Sus principales afluentes son los ríos Blanco, Turiba y Perro de Agua; los caños La Peineta, Los Pijiguaos, Trapichote, La Miel, La Ceiba y la quebrada La Guacamaya (Rondón, 2007).

El Grupo Suapure, constituyente del Supergrupo Cedeño, nombres propuestos por Mendoza (1974), para incluir en el primer caso, dos unidades de rocas ígneas ácidas, Granito de Pijiguo y Granito de Parguaza, que afloran desde Los Pijiguaos hasta Puerto Páez, en dirección este-oeste y desde Los Pijiguaos hasta el río Ventuari, en sentido norte-sur. El Granito de Pijiguo es un granito leucocrático (5% máficos) de color rosado salmón, grano fino, de aspecto subvolcánico, expuesto en la base del Domo de Pijiguo, en contacto no reaccional con el Granito rapakivi del Parguaza. Aflora a lo largo de las quebradas El Paují, El Caballo y Caña Brava en el área del río Suapure. Estudios en imágenes de radar arrojan que este granito se extiende por las partes bajas de los ríos Parguaza, Villacoa y Ventuari. Mineralógicamente consiste en feldespato potásico ± pertita (30 - 35)%, plagioclasa albítica (25 - 30)%, cuarzo (25 - 30)% y biotita marrón (1 - 3)% con apatito (0 - 4)% y opacos (1 - 3)% como accesorios más frecuentes, y epidoto y clorita como secundarios. Aflora como lajas por debajo del Granito del Parguaza, se desconoce su edad absoluta, pero debe ser similar (o más antigua) a la de este último, algunos autores consideran que debe representar el "techo" del batolito del Parguaza. El Granito de Pijiguo además contiene xenolitos de cuarzo-latita (de la Formación Caicara) y metabasita. El Granito de San Pedro (Grupo Cuchivero) aflora entre El Budare y Pijiguo, 3 km al oeste del paso de San Pedro en el río Suapure, este nombre es introducido para designar unas rocas graníticas leucocráticas, de aspecto subvolcánico, de edad proterozoico temprano a medio, de grano fino, masivo a moderadamente foliado, compuesto de

cuarzo cataclástico (25)%, feldespato potásico y perita (50)%, plagioclasa sódica (20)%, con cantidades pequeñas de máficos como biotita, clorita, epidoto y opacos, y otros constituyentes menores como apatito, titanita y circón. Este granito representa una facies transicional de grano fino del Granito de Santa Rosalía, esta facies se observa generalmente hacia el borde de la masa granítica. en contacto con la Formación Caicara y a veces toma el aspecto de un contacto transicional desde el granito de grano grueso de Santa Rosalía, al granito leucocrático de grano fino de San Pedro y a las volcánicas de la Formación Caicara, esta transición se observa en la localidad de la Mariposa, por otra parte en la localidad de Bebederos el granito de San Pedro es claramente intrusivo en las volcánicas félsicas de la Formación Caicara y además se encuentran xenolitos de rocas riolíticas dentro del granito (González de Juana et al., 1980).



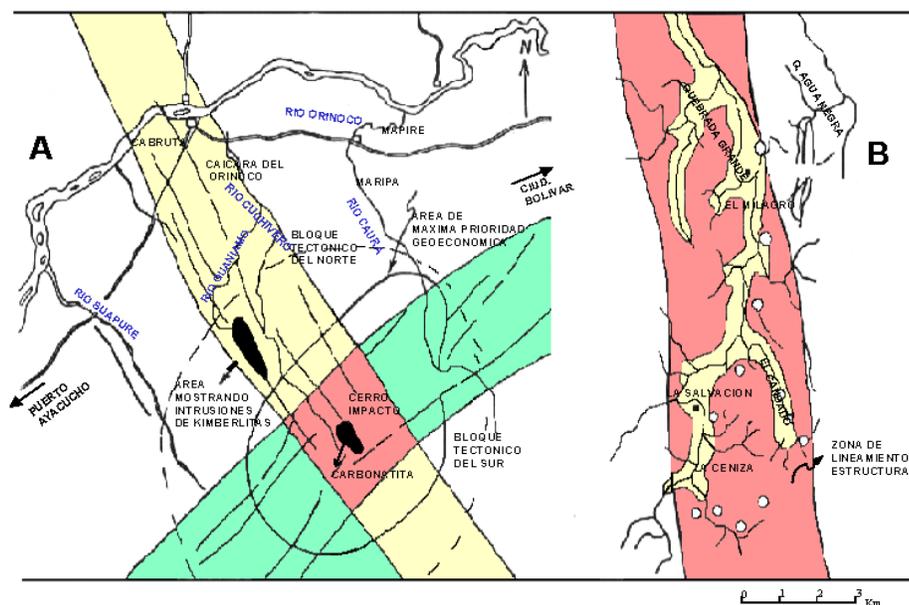
Leyenda Mapa Geológico Suapure – Parguaza



**Figura 23:** Mapa Geológico Suapure – Parguaza (tomado de la U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1109. Publicado 2006 en línea)

Elevadas anomalías aéreas radiométricas y magnéticas de trabajos contratados por Codesur en 1.970 permitieron identificar el Cerro Campana, cuerpo alargado elipsoidal dentro de una gran estructura circular, tipo impacto meteórico, en el límite del Municipio Cedeño con el Estado Amazonas, como una carbonatita que fue nombrada desde entonces como Cerro Impacto. Esta carbonatita se emplazó en la intersección de dos grandes zonas de falla (N 70° E de Guri con N 20° W de la Falla de Cabruta, después de la colisión continental que produjo hasta granulitas y anortositas en Santa Marta (Colombia) y se conoce como orogénesis Nickeriana, Orinoquense o K'Madkú (equivalente a la Grenvilliana) (Mendoza, 2005).

La Carbonatita de Cerro Impacto, en particular Cerro Norte, presenta algún interés para Nb, Th y Ce también con valores importantes de Ba, P, Zn, Pb y cantidades menores de Mo, Bi, Sn, Ag, Au y Be, con una geometría de unos 3 Km de largo por 1 Km de ancho, las condiciones óptimas para la acumulación de REEs en carbonatitas se logra por lixiviación meteórica bajo condiciones climáticas tropicales. Los REE se originan por la descalcificación de carbonatos primarios, apatito y perovskita, en presencia de oxígeno e iones de P y F, a partir de minerales residuales con REEs supergénicos estables bajo condiciones tropicales lluviosas con intensa meteorización. La Carbonatita de Cerro Impacto, sufrió gran meteorización en condiciones de climas tropicales lluviosos desde hacen por lo menos unos 20 Ma, es intrusiva en un basamento de rocas de Cuchivero y del tipo Complejo de Supamo y se correlaciona con la Carbonatita de Seis Lagos (Mendoza, 2005).



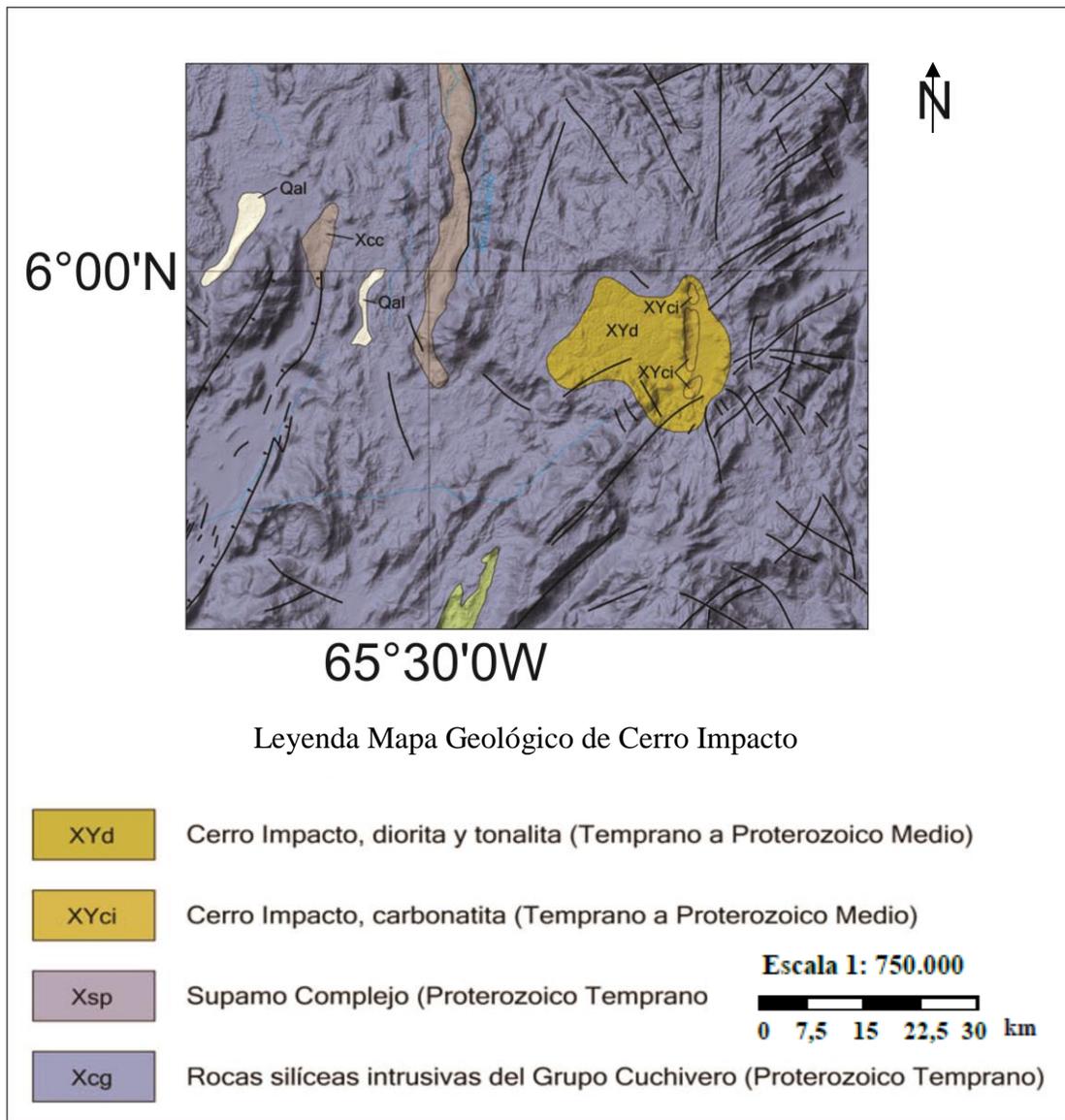
**Figura 25:** A) megafractura que controlaron el emplazamiento de Carbonatitas y Kimberlitas en la provincia geológica Cuchivero y B) localización estructural o controlada de kimberlitas en el área de Quebrada Grande, Guaniamo, Distrito Cedeño, Estado Bolívar (Tomado de Rodríguez, 1997)

Sidder (1.995), basado en una posible asociación de la Carbonatita de Cerro Impacto con las kimberlitas de Guaniamo y en una datación inadecuada en kimberlitas meteorizadas de Guaniamo que daban una edad de  $1.732 \pm 82$  Ma (Nixon y otros, 1.992), concluyó que la edad de la Carbonatita de Cerro Impacto debería estar entre 1.800 y 1.650 Ma.

En efecto, por una parte las carbonatitas pueden ser de cualquier edad aunque las más abundantes son menores a los 200 Ma, es decir después de la disrupción de la Pangea y el inicio del Océano Atlántico, seguidas de las carbonatitas relacionadas al evento mundial de la orogenesis Grenville (1.200-900 Ma) y finalmente al Proterozoico Medio Hudsoniano (1.800-1.600 Ma) y solo la carbonatita de Lac Shortt NO Abitibi, Canadá alcanza a ser Arqueozoico ( $2.692 \pm 5$  Ma). De acuerdo con lo referido la Carbonatita de Cerro Impacto se emplazó desde el manto superior hasta la corteza, nivel granitos/volcánicas de Cuchivero, una vez que el cruce de grandes

fallas fueron reactivadas, re-cizalladas y ampliadas durante y después de la Orogénesis Nickeriana y después de las orogénesis Brasiliano-Pan Africana a Herciniana, de edad Mesozoico como la postuló Mendoza et al. (1.977) coincidiendo con la edad Mesozoica para la Carbonatita de Seis Lagos (González et al., 2000).

Desde el punto de vista petrográfico, el estudio litológico del Cerro Impacto es muy poco satisfactorio, debido a que las rocas frescas que se han encontrado proceden únicamente de las cercanías inmediatas al Cerro Impacto y éste a su vez, se halla totalmente recubierto de un manto laterítico y de suelos residuales que impiden la observación directa de las rocas que los han generado. Por consiguiente, el estudio de su génesis y de las relaciones con las rocas que circundan el cerro se hace imposible hasta que no se disponga de sondeos profundos. Hacia el oeste, en el área de la confluencia de los ríos El Sabueso e Impacto, afloran rocas dioríticas y graníticas; hacia el sur del cerro se encuentran rocas graníticas fuertemente deformadas por cizallamiento; al norte, entre los cerros Impacto y Norte, se han localizado rocas dioríticas y graníticas y finalmente, en la falda oeste del cerro norte, se halló una roca meteorizada, posiblemente traquítica alcalina (Colvée P. & Szczerban E., 2005).



**Figura 26:** Mapa geológico de Cerro Impacto. Tomado de la U.S. Geological Survey Open File Report 2006-1109. Publicado 2006 en línea

## 4 MARCO TEÓRICO

### 4.1 Minerales Pesados

Son definidos como aquellos minerales que presentan una densidad mayor  $2,85 \text{ g/cm}^3$  (Mange & Wright, 2007). Según Milovski et al., (1982) los minerales pesados pueden dividirse convencionalmente en tres grupos: ligeros (hasta  $3,0 \text{ g/cm}^3$ ), medios (de  $3,0$  a  $4,0 \text{ g/cm}^3$ ) y pesados (más de  $4,0 \text{ g/cm}^3$ ). También los minerales pesados son comúnmente divididos en dos grupos basados en las propiedades ópticas: opacos y no opacos (tabla 6) (Boggs, 2009). Los minerales pesados opacos incluyen: magnetita, ilmenita, hematita, limonita, piritita y leucoxeno. Los minerales pesados no opacos abarca un gran grupo de más de 100 minerales, que incluye: olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno, anfíboles, granate, epidoto, clinozoisita, zoisita, cianita, sillimanita, andalucita, estaurolita, apatito, monacita, rutilo, esfena (titanita), turmalina y circón, que son particularmente comunes. (Boggs, 2009).

**Tabla 9:** *Minerales pesados detríticos en areniscas. Tomado de Boggs,(2009)*

<b>Minerales pesados No opacos</b>	
Ultraestable	rutilo, turmalina, zircon, anatasa
Estable	apatito, granate pobre en Fe, estaurolita, monacita, biotita
Moderadamente estable	epidoto, cianita, granate rico en Fe, sillimanita, esfena, zoisita
Inestable	horblenda, actinolita, augita, diopsido, hipersteno, andalucita, olivino
<b>Minerales pesados Opacos</b>	
Estables a Moderadamente estables	magnetita, ilmenita, hematita, limonita, piritita, leucoxeno

Los minerales pesados se han utilizado para determinar áreas fuentes y trayectorias de transporte de sedimentos. La clave del uso de los minerales pesados como trazadores naturales reside, tanto en su comportamiento hidrodinámico, debido a su densidad, como a en su potencial de preservación, dada su resistencia a la meteorización (Pettijohn, 1975).

#### 4.2 Estabilidad de los minerales pesados

La estabilidad de un mineral pesado depende del pH del ambiente químico, sin embargo el Eh y la composición iónica del fluido de poro también influyen en la estabilidad de los minerales pesados. La estabilidad relativa de los minerales pesados varía en los ambientes ácidos extremos y en los ambientes alcalinos (Tabla 7). Esta diferencia en el comportamiento, es ilustrada por la respuesta del apatito y el granate bajo condiciones ácidas; durante la meteorización ácida el apatito es altamente inestable, de igual manera el granate es sensible a las condiciones de pH ácidos y su estabilidad depende del tipo de granate; los que tienen una alta concentración de Fe y Mn tienden a ser los más inestables (Pettijohn, 1975).

**Tabla 10:** Características más resaltantes de algunos minerales pesados. Tomado de: Hulburt & Klein (1991)

Mineral	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad	Ocurrencia - Asociaciones
Rutilo	4,30	Muy estable	Granitos, sienitas, anfibolitas, eclogitas
Circón	4,60	Muy estable	Granito, granodiorita, sienita-monacita
Apatito	3,10	Estable	Pegmatitas y filones de origen hidrotermal
Granate	3,60	Estable	Gneises, kimberlitas, pegmatitas, granitos, peridotitas, serpentinitas
Casiterita	6,80	No definida	Granitos, microgranitos, pegmatitas, riolitas, filones hidrotermales
Hematita	5,30	Estable	FBH*, granitos, sienitas, riolitas, traquitas
Ilmenita	4,70	Estable – Moderado	Gneises, gabros, noritas, anortositas. Accesorio en pegmatitas y sienitas
Magnetita	5,20	Estable	Accesorio en dioritas, peridotitas
Pirita	5,02	Estable	Sulfuros y filones hidrotermales

\*FBH – Formaciones bandeadas de hierro.

#### **4.3 Procesos controladores de la composición de los minerales pesados**

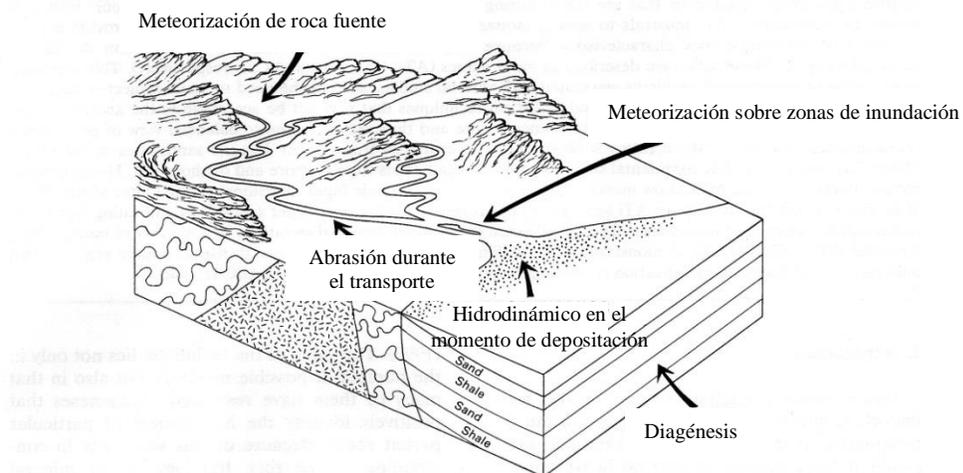
La composición de las arenas es el resultado de una compleja interacción entre la procedencia y los factores que operan durante el ciclo de sedimentación (Figura 19). Muchos minerales tienen paragénesis muy específicas y limitadas, y por lo tanto proporcionan información fundamental sobre su procedencia, lo que no puede ser adquirido por cualquier otro medio, sin embargo, la composición de los minerales pesados no está controlada solamente por la composición mineralógica del área fuente. La señal de procedencia original es modificada por otros procesos durante el ciclo de sedimentación. Por esta razón el uso indiscriminado de asociaciones de minerales pesados para caracterizar y diferenciar procedencia puede producir conclusiones erróneas Morton & Hallsworth (1999).

Según Morton & Hallsworth (1999), los minerales pesados son afectados por tres procesos: selección física, abrasión mecánica y disolución.

- Selección Física: toma lugar como resultado de las condiciones hidrodinámicas operando durante el transporte y las etapas de depositación y ambos controlan en absoluto la abundancia relativa de los minerales pesados.
- Abrasión mecánica: toma lugar durante el transporte y causa la disminución del tamaño del grano, por una combinación entre fracturación y rodamiento.
- Disolución: causa la pérdida parcial o completa de minerales pesados en una variedad de condiciones geoquímicas durante varias etapas del ciclo de sedimentación, desde la meteorización de la fuente, exposición subaérea en ambientes sedimentarios no marinos, durante el enterramiento y finalmente durante la meteorización en los afloramientos. Las indicaciones más claras de los procesos de disolución es la presencia de texturas de corrosión sobre la superficie del grano tales como, hoyos de ataque químico, mamillas superficiales, facetas, bordes irregulares, terminaciones en sierra, y estructuras esqueléticas.

#### 4.4 Meteorización de la roca fuente

La meteorización de la roca fuente altera la información de proveniencia antes de que el sedimento entre en el sistema de transporte, este proceso es comúnmente considerado como una característica inherente de la proveniencia. A pesar de esto es importante evaluar los efectos de la meteorización con el fin de relacionar la composición de sedimento con la fuente. El grado en que los minerales pesados son meteorizados en el área fuente depende de tres factores: la composición del mineral pesado (controlado por la litología de la roca fuente), la configuración fisiográfica y el clima, los dos últimos controlan el grado en que el suelo se produce. Si el proceso de transporte de remoción del material meteorizado desde el área fuente es potencialmente más rápido que el proceso de generación de material meteorizado, se dice que la erosión es la meteorización limitada. En tales condiciones los detritos se eliminan rápidamente sin modificación significativa por la meteorización química y por lo tanto la huella de procedencia de la roca madre es probable que sea en gran parte transferida al sistema de los procesos de transporte, si en cambio la tasa de máxima meteorización excede la capacidad de los procesos de transporte para eliminar el material, entonces la erosión es limitada por el transporte (Figura 26)(Morton & Hallsworth, 1999).



**Figura 27:** Esquema de los procesos que operan durante el ciclo de sedimentación. Tomado de (Morton & Hallsworth, 1999)

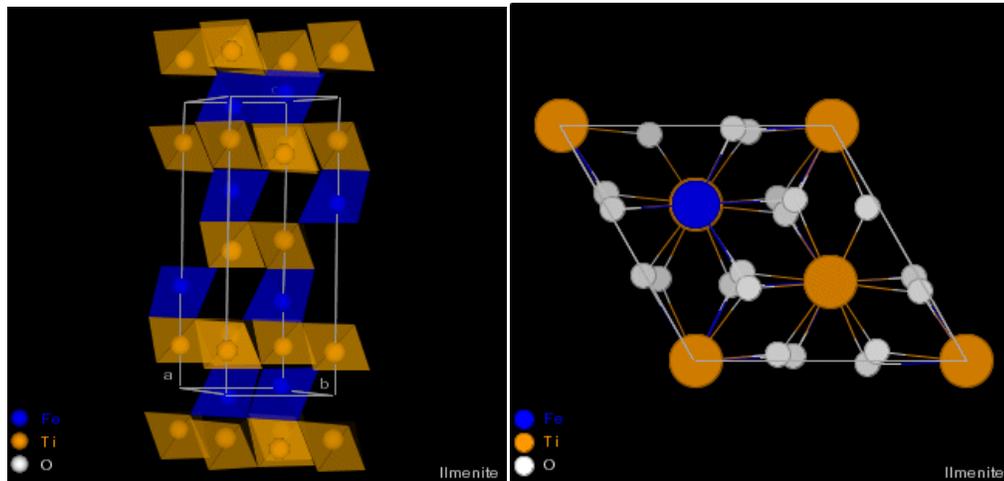
A continuación se realizará una breve reseña sobre las propiedades y ocurrencias de la ilmenita, magnetita y algunos minerales asociadas a estas.

#### **4.5 Mineral Pesado: Ilmenita $\text{FeTiO}_3$**

Es el mineral de titanio más común de la corteza terrestre. El más importante como mineral accesorio que se encuentra en casi todas las rocas intrusivas y extrusivas. De primordial importancia como mineral de titanio en noritas, gabros y anortositas (Elsner, 2010).

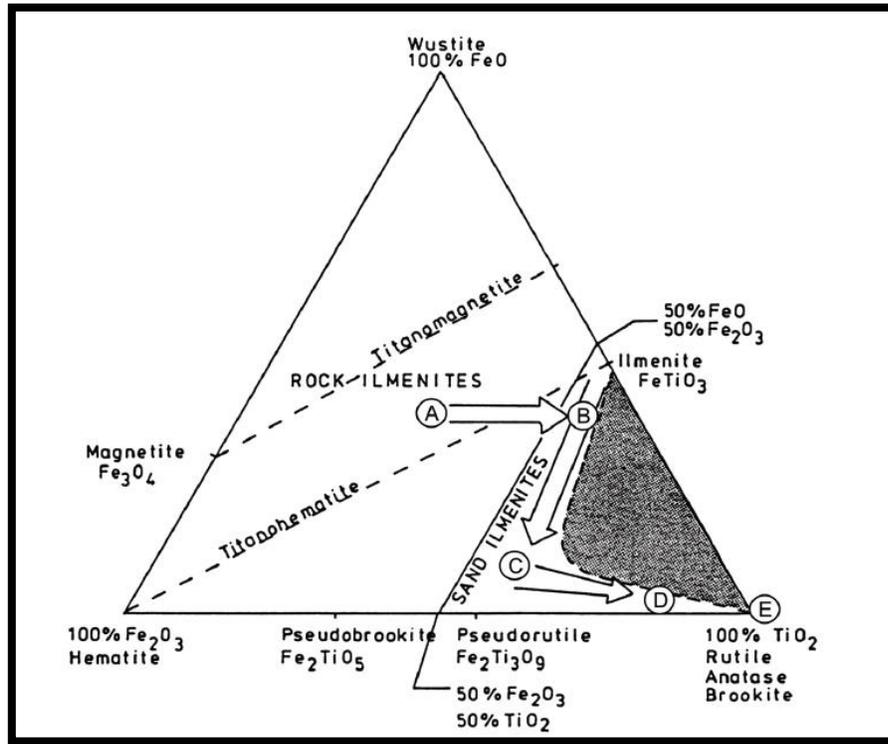
La ilmenita tiene una estructura hexagonal comparable con la del corindón, pero con dos elementos (Fe y Ti) que llevan a cabo roles similares. Posee una gravedad específica alrededor de 4,70-4,79, es menor que cuando coexiste con la magnetita, esto se reduce por la entrada de cantidades apreciables de las moléculas de geikelita o pirofanita en solución sólida (Deer et al., 1992).

La fórmula de la ilmenita puede ser expresada completamente como (Fe, Mg, Mn)  $\text{TiO}_3$ , aquí comienza una extensiva solución sólida entre ilmenita y geikielita (a 70%  $\text{MgTiO}_3$  mol) y entre la ilmenita y la pirofanita (por encima 64%  $\text{MnTiO}_3$  mol). La mayoría de las ilmenitas terrestres, lunares y condrícticos contienen hasta 5% moles de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y solo pequeñas cantidades de MgO y MnO. Una excepción ocurre en ilmenitas de kimberlitas y xenolitos ultrabásicos que frecuentemente contienen cantidades principales de moléculas de geikielitas y las moléculas de pirofanitas puede llegar a ser importante en ilmenitas de rocas ácidas diferenciadas y carbonatitas. Hay que destacar que, en la coexistencia de la ilmenita y magnetita en rocas metamórficas e ígneas, el Mn siempre se encuentra preferentemente en la ilmenita. Las traza de iones trivalentes Al, Cr y V son comunes, presumiblemente sustituyendo al  $\text{Fe}^{3+}$  (Deer et al., 1992).



**Figura 28:** Estructura cristalina ilmenita. <http://www.jcrystal.com>

Otro mineral importante es la titanomagnetita. Las dos espinelas magnetita ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$ ) y ulvoespinela ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ) son perfectamente miscibles a altas temperaturas. Además, parte del  $\text{Fe}^{2+}$  puede ser reemplazada isomórficamente por Ti, Mg, Mn, y otros elementos y parte del  $\text{Fe}^{3+}$  puede ser sustituido por Ti, Al, V, y Cr en la magnetita. A medida que disminuye la temperatura existe segregación entre la magnetita, ilmenita y ulvoespinela. La segregación completa en magnetita pura y ulvoespinela no tiene lugar. Además, la ilmenita se precipita en forma de laminillas en las caras octaédricas de la magnetita. Cuanto más lento es el enfriamiento, es más grueso la estructura de la segregación. La Figura 29, muestra la secuencia de meteorización de ilmenitas de rocas sólidas (A) a ilmenitas de sedimentos (B y C) y a leucoxenos de sedimentos (D) y finalmente cristalina, rutilo secundaria (Elsner, 2010).

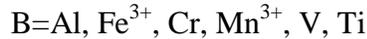


**Figura 29:** Representación del sistema triangular FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>, acordado por (GARNAR, 1978; Tomado de Elsner, 2010). No hay análisis conocidos de minerales de Ti en el campo negro.

Después de que la ilmenita se libera de la roca sólida y queda a la intemperie particularmente bajo condiciones de ambientes tropical húmedo, el Fe se va disolviendo y hay un ligero enriquecimiento de Ti. El estado final en el proceso de desgaste es el leucoxeno que consta predominantemente de óxidos de Ti y en un grado mucho menor los óxidos de Fe, es por esta razón que el proceso de meteorización se llama leucoxenización, esta se produce por encima del nivel del agua subterránea. La influencia de los ácidos húmicos juega un papel importante. El FeO es cada vez más oxidado a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el TiO<sub>2</sub> amorfo recristaliza como rutilo finamente cristalino, raramente anatasa o brookita. Esta mezcla mineral finamente cristalino que consiste predominantemente de TiO<sub>2</sub> se llama leucoxeno. La disolución de los óxidos de hierro induce el aumento relativo del TiO<sub>2</sub> y la reducción de la susceptibilidad magnética (Elsner, 2010).

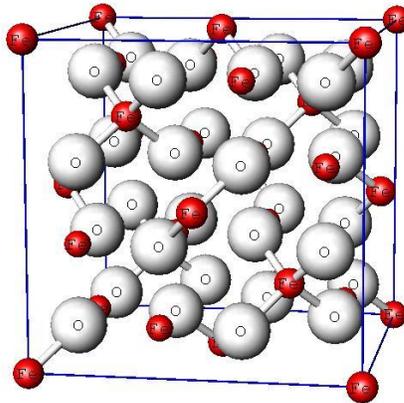
#### 4.6 Mineral Pesado: Magnetita $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Pertenece al grupo de la espinela, bajo la fórmula general  $\text{AB}_2\text{O}_4$  donde la frecuencia natural es:



En conformidad con la ocupación de la posición B, las espinelas son divididas en espinelas de aluminio, espinelas de Fe (III) y espinelas de cromo. Las espinelas de manganeso (III) y vanadio son raras. La magnetita más común es de hierro (III) (Figura 30) (Elsner, 2010).

Debido a la incorporación preferida de los elementos Mg, Mn, Zn, Ni, Cr, Ti, Al, V en la red de espinelas, la magnetita natural casi siempre tiene diferentes porcentajes de estos elementos. El Co se encuentra raramente (Elsner, 2010).



**Figura 30:** Estructura cristalina de la Magnetita. <http://www.geocities.jp>

La magnetita es un importante mineral en el triángulo mixto  $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$  (Figura 29). Esto explica porque la magnetita frecuentemente ocurre en rocas magmáticas y metamórficas en conjunción con la ulvoespinela ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ) y titanomagnetita (solución sólida entre la magnetita y ulvoespinela) así como también la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) y la goetita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ). Dependiendo de la temperatura de cristalización, el rango de enfriamiento, la disponibilidad de oxígeno, composición del magma y presión de la roca, estos minerales se producen ya sea por separado uno de otro o compuestos homogéneos fijos o como inclusiones uno dentro del otro (Elsner, 2010).

#### **4.7 Formación de Depósitos y Ocurrencia**

Según Melgarejo (2003), la magnetita puede formarse bajo condiciones magmáticas, metamórficas, sedimentarias e incluso en condiciones biogénicas. Las más importantes condiciones de formación son las siguientes:

- Cristalización temprana a partir de magmas básicos en rocas plutónicas (dioritas, gabros, etc) así como también rocas volcánicas (basaltos de apariencia oscura debido a la fina dispersión de la magnetita)
- Debido a la diferenciación, precipitación gravitatoria de elementos como el Fe y V de magmas ultrabásicos y básicos. Globalmente estos procesos dan lugar a la formación de importantes magnetitas intramagmáticas y depósitos de titanomagnetitas.
- Contacto neumatólítico con Ti y P libre en rocas paragenéticas con minerales de skarn y sulfuros.
- En pegmatitas ocasionalmente en grandes cantidades. Por ejemplo gabro-pegmatitas de la Península de Kola – Rusia.

La magnetita también está presente en:

- Los productos de exhalación de volcanes.
- En rocas marina-exhalativas-hidrotermales-sedimentarias en depósitos de hierro, tipo Lahn-Dill
- Rocas hidrotermales – metasomáticas en el punto de contacto de rocas alcalinas.
- Rocas sedimentarias de la formación bandeada de hierro en el Precámbrico (itabirites) de escudos antiguos.
- Rocas de metamorfismo de contacto resultado del metamorfismo de sideritas, chamosita o thuringita.
- Rocas de metamorfismo regional debido a la reducción de la hematitas.
- Fisuras alpinas.
- Placer de minerales pesados.

#### **4.8 Alteración de la ilmenita y magnetita**

La ilmenita se altera típicamente a leucoxeno, y solo en raras ocasiones se disuelve en puntos de reducción de capas rojas, mientras que la anatasa autigénica y la pirita de vez en cuando framboidal precipitan en espacios porosos adyacentes (Figura 29) (Mange & Wright, 2007).

Algunas investigaciones revelan que la ilmenita altera a leucoxeno tanto en condiciones reductoras como en oxidantes. Esto es consistente con el campo de estabilidad limitada de la ilmenita y el campo de estabilidad gama de óxidos de titanio tanto en condiciones oxidantes y reductoras (no alcalina). El hierro liberado durante la alteración de ilmenita a leucoxeno, suele dar lugar a la formación de pirita asociada en condiciones reductoras cuando el sulfuro está presente, pero se precipita como óxido o hidróxido de Fe rebordeando a los granos detríticos bajo condiciones de oxidación (Mange & Wright, 2007).

#### **4.9 Alteración de la magnetita**

Mange & Wright (2007), en su investigación hablan sobre granos de magnetita que se disolvieron bajo condiciones reductoras (ácido a neutro) en lugares de reducción de las areniscas de Bunter y las formaciones Skagerrak, con la excepción de casos raros donde los granos son protegidos por cemento temprano. La magnetita es ligeramente alterada bajo condiciones de reducción en la Formación de Odderup, aparece con varios huecos de disolución alrededor del grano, a lo largo de planos de separación y fisuras.

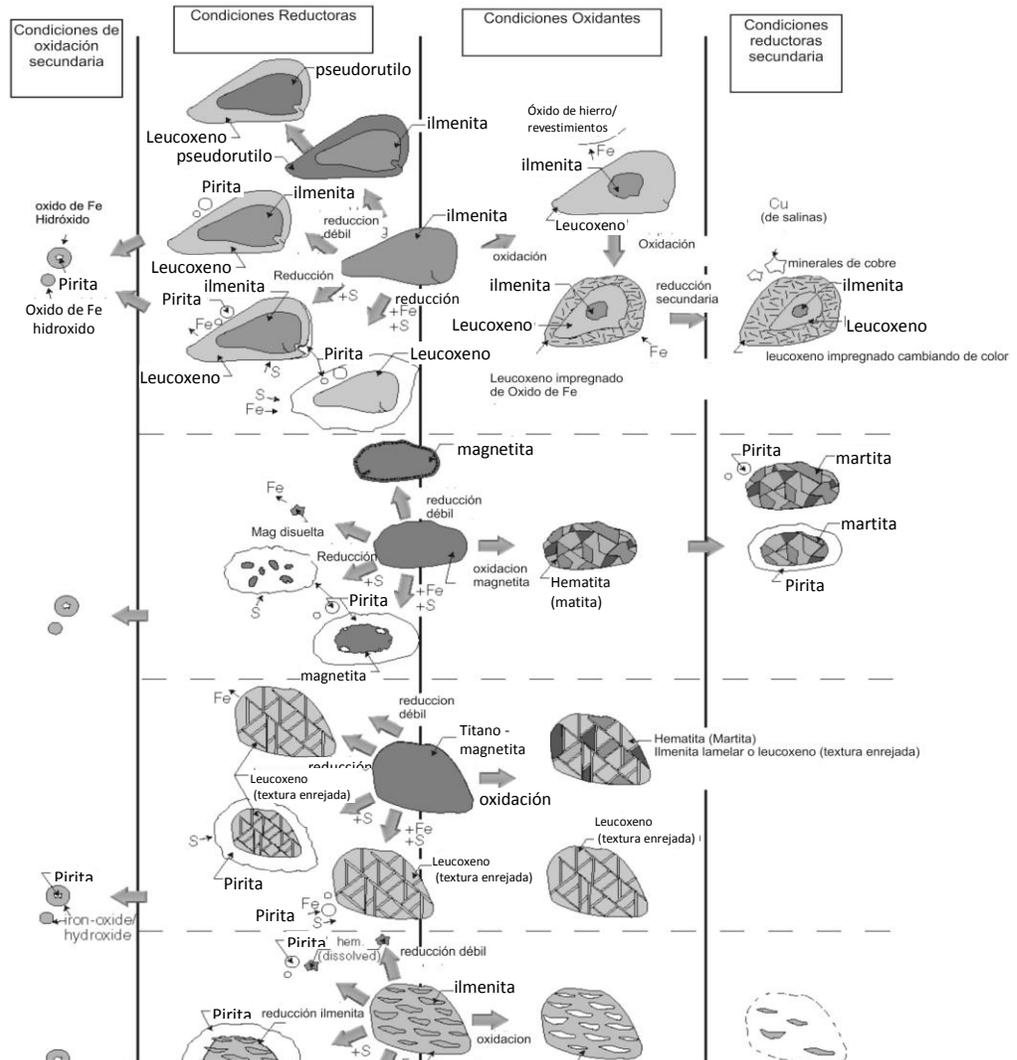
Miller & Folk (1955), sugieren que la ilmenita y magnetita son disueltos bajo condiciones locales de reducción después de la depositación.

Van Houten (1968), investigó minerales opacos en capas rojas, de edades comprendidas entre el Precámbrico y el Plioceno y observó que la magnetita se disolvió en la mayoría de las partes grises de capas rojas, pero las magnetitas derivadas de rocas volcánicas persistieron más que las magnetitas de fuentes no volcánicas.

## Alteración de la Ilmenita

### 4. Alteration of Ilmenite

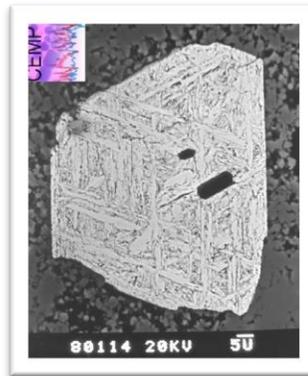
283



**Figura 31:** Evolución de los diferentes caminos de alteración de detritos de minerales pesados opacos; ilmenita, hematita, magnetita y titanomagnetita, en relación a los ambientes geoquímicos. (Mange & Wright, 2007)

heavy minerals, ilmenite, hematite, magnetite and titanomagnetite, in relation to the geochemical environments.

La magnetita es generalmente reemplazada completamente por la hematita bajo condiciones de oxidación. Los cristales de hematita crecen a lo largo de tres orientación cristalográfica, paralelas al (1 1 1) plano original del grano de magnetita, creando de este modo una textura llamada martita (Figura 32).



**Figura 32:** Grano de hematita con poco Ti, con textura martita solución sólida magnetita-ulvoespinela. Quaternary, Shagra Fm, Egypt. Tomado de <http://geography.lancs.ac.uk>

#### 4.10 Magnetitas e Ilmenitas de diferentes tipos de rocas

En rocas graníticas: la ilmenita y la magnetita, resultan ser unos excelentes indicadores de las condiciones redox en las que se producen los procesos de formación y evolución de los magmas graníticos. De esta forma, las rocas de asociaciones graníticas generadas a alta  $f_{O_2}$  suelen presentar magnetita, mientras que las de baja  $f_{O_2}$  suelen tener ilmenita, discriminándose así series con magnetitas y series con ilmenita. Así pues, en asociaciones toleíticas, alcalinas, calcoalcalinas y monzoníticas, el óxido más frecuente es la magnetita, aunque en algunos casos pueden coexistir ilmenita y magnetita, e incluso encontrarse solo ilmenita. Por el contrario, en rocas de asociaciones alúmino-potásicas, es la ilmenita el óxido de Fe y Ti más frecuente, aunque existen también paragénesis de ilmenita-magnetita. Estos minerales opacos pueden tener un crecimiento magmático o subsólidos, por lo que se

hace necesario el análisis microtextural preciso previo a cualquier interpretación petrogenética (Melgarejo, 2003).

Las magnetitas suelen contener pequeñas cantidades de Ti, Al, Mg y Cr. Las ilmenitas que coexisten con magnetita son más ricas en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que las que se encuentran aisladas. El contenido en Mn (pirofanita) de la ilmenita puede llegar a ser importante, observándose un aumento en el contenido en Mn de esta fase mineral en las distintas asociaciones graníticas con el incremento en el contenido en  $\text{SiO}_2$  de las rocas que los contienen. Esta variación parece deberse al incremento de la relación Mn/Fe de los magmas con la diferenciación (Melgarejo, 2003).

#### **4.11 Carbonatitas**

Las carbonatitas son rocas de carbonatos-silicatos que contienen sobre todo calcita o con menos frecuencia dolomita, raras veces ankerita, rodocrosita o siderita y menores cantidades de una variedad de silicatos, óxidos y otros minerales, en su origen depositados a partir de un fluido rico en carbonato (Pecora, 1956; Heinrich, 1966). Los macizos carbonatíticos son grandes fuentes, tanto reales como potenciales, de titanomagnetita, perovskita, magnetita, metales raros (especialmente Nb y Zr), tierras raras, apatita, flogopita y vermiculita, estroncianita, barita, fluorita, carbonato y materia prima del material cerámico (Melgarejo, 2003).

Las carbonatitas se encuentran asociadas, tanto espacial como genéticamente, a macizos alcalinos-ultrabásicos, aunque, a veces, se las puede encontrar en otro tipo de macizos. Por tanto, podemos decir que las carbonatitas tienen un carácter poliformacional y una firma común. Existen algunos macizos carbonatíticos desvinculados de intrusiones alcalinas (macizo de Txernigovski, en Ucrania). Las carbonatitas han sido clasificadas según la temperatura y la profundidad del emplazamiento, la composición de sus minerales esenciales, la composición de sus minerales accesorios característicos, o por sus peculiaridades geoquímicas. Frecuentemente, van acompañadas de melilita, monticellita, micas de apatito (glimmeritas), apatito, forsterita, magnetita, (foskoritas), etc. Todo ello indica la

existencia de grandes variaciones en la estructura y en la composición de los macizos carbonatíticos (Figura 33) (Melgarejo, 2003).

#### **4.12 Asociaciones minerales**

Según Heinrich (1966), geoquímicamente las carbonatitas están caracterizadas por concentraciones relativamente elevadas de los elementos P, Cl, F, Ti, Zr, Nb, grupos del Ce, S, Ba, y Sr, y concentraciones apreciables de Th y menores de U. sus agrupaciones características de minerales son:

Sulfuros: pirita, pirrotita, sulfuros de Pb y Cu, raras veces molibdenita.

Fluoruros: fluorita, sellaita.

Fosfatos: apatita, isokita, monacita.

Minerales de Ti: magnetita titanífera, ilmenita, brookita, anatasa, rutilo, leucoxeno, esfena, perovskita, betafita.

Minerales de Nb: pirocloro, columbita, betafita, pervoskita, magnetita titanífera, rutilo.

Minerales de Zr: zircón, baddeleyíta.

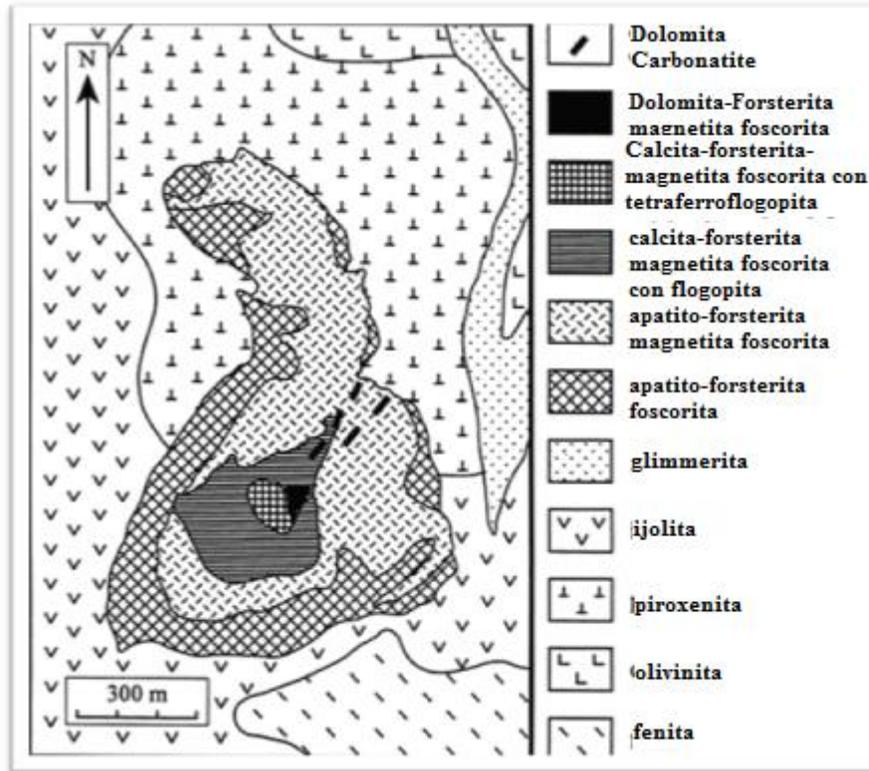
Minerales de Sr y Ba: barita, estroncianita, calcita estroncianífera.

Minerales de Ce: monacita, pirocloro, perovskita, sinquisita, parasita, bastnesita, sahamalita, otras carbonatitas de tierras raras, alanita, cerita.

Además, varios silicatos están diseminados, entre ellos ortoclasa, albita, piroxenos y anfíboles alcalinos, biotita-flogonita (o vermiculita), olivino, monticellita, condrodita, melilita y serpentina. También son muy corrientes la magnetita, hematita y óxidos de manganeso, así como la casiterita. Son abundantes un cuarzo posterior y calcedonia (Heinrich, 1966).

Las provincias carbonatíticas se localizan en los márgenes de plataforma, en zonas de unión de plataformas, en zonas plegadas y consolidadas, en zonas de falla transformante tipo rift, en los márgenes de zonas afectadas por fallas y en general en zonas afectadas por la tectónica. Las edades de estos complejos varían notablemente, abarcando desde el Arqueano al Proterozóico (Siilinjarvi, Finlandia, 2500 M.a); Ikhakhaoune, Argelia y Dubravinski, Rusia (1900 M.a); Corrat (India, 720 M.a), y

los volcanes carbonatíticos africanos actuales: oldoinyo Lengai (Tanzania) y Fort Portal (Uganda). Un 7% de estos complejos son Precámbricos, un 26% son Mesozoicos y un 36% son Cenozoicos (Melgarejo, 2003).



**Figura 33:** Relación geológica entre carbonatitas y foscoritas. Tomado de Amelin & Zaitsev (2002)

Los complejos con carbonatitas constituyen habitualmente la parte central de intrusiones circulares zonadas. Un corte horizontal de estos macizos a menudo presenta una morfología isométrica (circular o elipsoidal), pudiendo ser irregular debido a movimientos tectónicos. Un corte vertical muestra que los macizos carbonatíticos constituyen la práctica totalidad de las masas intrusivas cilíndricas, con unos contactos muy cortantes con el encajante. En algunos casos, los macizos con carbonatitas forman cuerpos lenticulares o en forma de veta (Siilinjarvi, en Finlandia; Txernigovski, en Ucrania y Dubravinski, en Rusia, entre otros) (Melgarejo, 2003).

Todos los tipos de macizos carbonatíticos se desarrollan mediante intrusiones multifásicas, correspondiendo la última de estas fases al emplazamiento de las carbonatitas. La estructura interna de los macizos carbonatíticos depende del grado de desarrollo de los diferentes estadios magmáticos.

Según Melgarejo (2003), el desarrollo de una diferenciación completa da lugar a las siguientes series:

1. Episodio ultrabásico: dunitas, peridotitas y piroxenitas.
2. Episodio alcalino:
  - a) Episodio foidolítico temprano: ijolitas-melteigitas y varias metasomatitas nefelínico-biotítico-piroxénicas, fenitas en el exocontacto.
  - b) Episodio melilítico: turjaítas y metasomatitas con melilitas.
  - c) Episodio foidolítico tardío: ijolitas-urtitas y las pegmatitas asociadas.
3. Episodio carbonatítico:
  - a) Episodio de skarn: metasomatita monticellítica-andradítica-amfibólica.
  - b) Episodio foskorítico: varias foskoritas forsteríticas, metasomatitas flogopítico-diopsídicas.

En minerales de la serie titanomagnetita-magnetita, se ha de tener en cuenta la presencia de las tan características texturas de descomposición (con ilmenita aislada y espinela con Zn), y altos contenidos en Nb y Ta (generalmente, con un relación Ta/Nb elevada). El contenido de Nb-Ta en estos minerales se debe a la presencia de pequeños cristales no radiactivos de pirocloro con Ta en su interior (Melgarejo, 2003).

Existe una fuerte interdependencia entre los contenidos de algunos elementos en las carbonatitas y la profundidad en la que se haya emplazado el macizo: desde macizos superficiales hasta meso-abisales, los contenidos de Ba y Sr disminuyen, mientras que los de Nb, Ta, Zr y Hf aumentan (Melgarejo, 2003).

#### **4.13 Estabilidad de minerales en carbonatitas lateríticas**

Las carbonatitas en áreas de alta humedad y combinado con altas temperaturas durante un largo período, desarrollan lateritas extremas de manera que sólo el mineral

primario más resistente sobrevive. La magnetita, pirocloro y la ilmenita son ligeramente afectadas durante la formación de la laterita de carbonatitas de las Minas Gerais y Goiás del cretácico, con el resultado de que estos minerales abundan en las lateritas. Aunque este tipo de meteorización se extiende hasta profundidades de 300m esto solamente es una etapa intermedia de desgaste laterítico. Tanto en Lueche y Bingo carbonatitas de Zaire, la magnetita y pirocloro son esencialmente preservado a pesar de la extensa y profunda meteorización. En Mrima, Kenya, el residuo de la meteorización de la carbonatita también contiene pirocloro y magnetita (Bell, 1992).

La descomposición de estos minerales en algunas carbonatitas no se ve necesariamente asociadas a rocas ígneas alcalinas o fenitas. En Cerro Impacto, la carbonatita ha sido completamente meteorizada pero están bien preservados el apatito, feldespatos, y otros minerales que pueden ser encontrados en fenitas meteorizadas. La naturaleza de estos minerales en carbonatitas altamente alterados en estos entornos está probablemente relacionado con una alta concentración de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  en aguas meteóricas y en menor medida el desarrollo de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a partir de accesorios de sulfuro. En adición, muchos cuerpos carbonatíticos tienden a desarrollar áreas de drenajes internos (Bell, 1992).

Las condiciones que tienen, más o menos, para todas las carbonatitas no explican la estabilidad del pirocloro y la magnetita en lateritas tipo Araxa y su inestabilidad en lateritas tipo Cerro Impacto. Una posible explicación puede ser la diferencia de edad (Bell, 1992).

En las carbonatitas que han sido objeto de extrema laterización, la mineralogía cambia con la profundidad. El perfil superior de la laterita consiste en su mayoría en insolubles óxidos de hierro férrico, óxidos de aluminio, arcillas, monacita supergénica, grupo de la crandallita minerales ricos en Ba, Nb, REEs, Sr y cerianita. En esta zona los minerales primarios tienden a desaparecer con la excepción de algunas trazas de circón y rutilo. El agua vadosa o de bajas temperaturas, soluciones hidrotermales pueden introducir cuarzo y calcita tipo caliche y apatito supergénico dentro de la laterita. Ambos minerales contienen  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ , y  $\text{Eu}^{3+}$  pero  $\text{Mn}^{2+}$  está ausente. En el desarrollo de los minerales que contienen tierras raras, por lo general

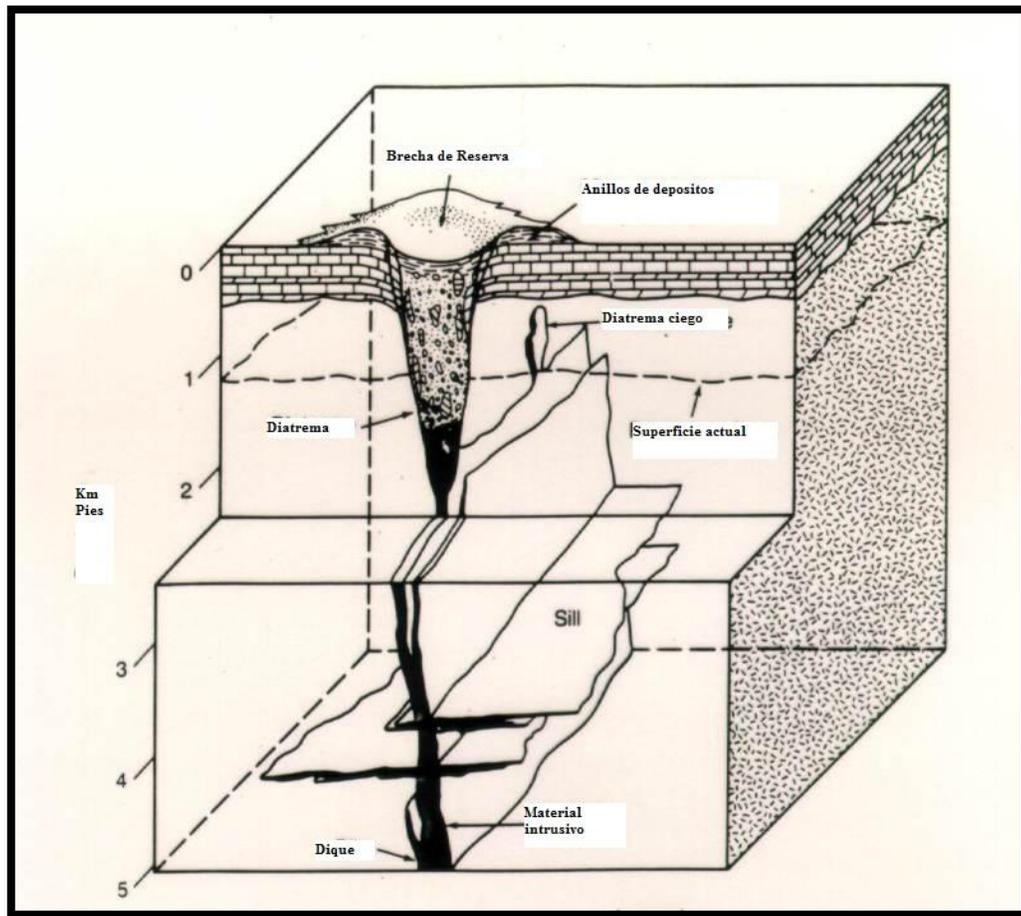
los LREEs son dominantes, pero en algunos casos los HREEs e Y están separados de los LREEs y se concentró de forma selectiva debido a su mayor capacidad migratoria (Bell, 1992).

#### **4.14 Kimberlitas**

Es una peridotita porfídica conteniendo minerales hidratados y carbonatados. En su composición entran olivino serpentizado, Cr-dióxido, enstatita, Mg-ilmenita, flogopita, granate piropero cromífero y algunas, contienen diamantes diseminados (Grande, 2009).

Las intrusiones de kimberlitas se producen en las etapas iniciales del rifting continental. Son magmas semi-sólidos originados en el manto superior a más de 160 km de profundidad su ascenso es diapírico hasta cierto nivel en la corteza. Allí, la elevada presión de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O que caracteriza a estos magmas produce un fenómeno explosivo y el magma asciende rápidamente para ser emplazado en o cerca de la superficie terrestre, en zonas de rifting. A menudo se producen extrusiones en forma de chimeneas brechadas o diatremas: estos son los famosos tubos kimberlíticos. El origen de estos magmas parece deberse a fenómenos metasomáticos que afectan al manto superior; en efecto, la presencia de elementos incompatibles como K (en la flogopita) y Ti (en la ilmenita), además de un exceso de volátiles, no concuerda con la composición de un manto primario normal de lherzolita granatífera. El metasomatismo en el manto superior sería el responsable del enriquecimiento en estos componentes anómalos, los cuales, en especial los gases, produciría luego los fenómenos explosivos y eruptivos observados (Grande, 2009).

Los tubos de kimberlita son de diámetro muy reducido, máximo 1,5 km, normalmente 300-400 m, pero alcanzan profundidades de hasta 2 km (Figura 34). Están rellenos de materiales provenientes del manto superior (xenolitos de eclogita y nódulos ultramáficos), así como rocas de la corteza inferior y superior, cementados por la propia roca kimberlítica brechada y muy alterada (Grande, 2009).



**Figura 34:** Esquema de un tubo o diatrema de Kimberlita Imagen tomada de:  
<http://www.nature.com/>

#### 4.15 Pegmatitas radioactivas

Los minerales de uranio y torio están diseminados en las pegmatitas graníticas, sieníticas y sieníticas foidales, y figuran entre sus minerales constituyentes en escasa proporción. Aunque los yacimientos pegmatíticos de minerales radioactivos son muy numerosos y muy variables en los detalles de su geología y en sus asociaciones mineralógicas, sólo unas pocas pegmatitas, tras exploración minuciosa, han resultado ser yacimientos interesantes de minerales radioactivos (Heinrich, 1966).

La mayor parte de las pegmatitas tienen una composición similar al del granito (incluyendo las monzonitas cuarcíferas y las granodioritas). Sin embargo, se

encuentran también del tipo sienítico, nefelino-sienítica. En general, sin embargo, los minerales de uranio presentan tendencia a aparecer más frecuente en las pegmatitas graníticas, mientras que los minerales de torio lo hacen en pegmatitas de composición sienítica y nefelino-sienítica (Heinrich, 1966).

Las pegmatitas, que por lo general se presentan en gran número en grupos bien definidos, solo se encajan en rocas ígneas intrusivas o en rocas con metamorfismo regional de los grados altos a intermedio. Los grupos son sigenéticos con grandes plutones o con los batolitos de rocas ígneas ácidas con los cuales las pegmatitas están relacionadas en tiempo, características geoquímicas y mineralógicas, posición y origen. Las pegmatitas pueden ser muy pequeñas, de la anchura de unos pocos centímetros, hasta cientos de metros. Algunas miden unos 30cm o menos de longitud, mientras otras pueden alcanzar varios kilómetros. Otras alcanzan profundidades de hasta cientos de metros y otras terminan a unos pocos metros bajo la superficie (Heinrich, 1966).

En casos ideales las pegmatitas se desarrollan como capas concéntricas alrededor de la unidad central o núcleo. Estas unidades son primarias, en el sentido de que representan los elementos originarios de la pegmatita formados por períodos sucesivos de cristalización desde las paredes al interior (tabla 11) (Heinrich, 1966).

**Tabla 11:** *Composición mineral en una sucesión típica de las zonas pegmatita (Heinrich, 1966)*

Zona	Minerales esenciales	Minerales accesorios
Zona de borde	Plagioclasa, cuarzo, moscovita	Turmalina negra, granate, magnetita, microclino
Zona de las salbandas	Cuarzo, plagioclasa, microclino, moscovita, biotita	Turmalina negra, granate, berilo, apatita
Zona intermedia externa	Microclino, cuarzo	Plagioclasa sódica, moscovita
Zona intermedia interna (margen del núcleo)	Cuarzo, microclino, plagioclasa sódica, moscovita, biotita	
núcleo	cuarzo	

## 2.1 Minerales radioactivos en las pegmatitas

El número de especies encontradas en las pegmatitas es muy grande, pero se debe distinguir entre las formadas como resultado del proceso pegmatítico, magmático e hidrotermales. Los óxidos están representados principalmente por la uraninita, aunque en raras ocasiones aparece también la torianita. La mayoría de los óxidos complejos múltiples radiactivos se han hallado en las pegmatitas, con la posible excepción de la davidita (tabla 12) (Heinrich, 1966).

El conjunto se caracteriza geoquímicamente por: U elevado; Th bajo a muy poco; Zr y tierras raras del Ce en cantidades muy pequeñas; Y poco frecuente; Nb-Ta raros o faltan por completo. Los minerales de óxidos complejos más difundidos son probablemente la euxenita y la samarskita; menos frecuentes son las fergusonitas y la policrasa, raras la itrotantalita, betafita, priorita, esquinita y ampagabeita (Heinrich, 1966).

**Tabla 12:** Lugares donde se presentan lo principales minerales radiactivos hipogénicos de las pegmatitas (Heinrich, 1966)

Mineral	Lugares principales en que se presentan
Óxidos: Uraninita	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Pegmatitas, no zonadas</li> <li>b) Paredes y zonas intermedias de las pegmatitas.</li> <li>c) Rellenos de fractura cuarzosos en pegmatitas complejas.</li> </ul>
<p>Óxidos complejos (niobatos, tantalatos) Fergusonita-formanita, samarskita-itrotantalita, euxenita-policrasa, esquinita-priorita</p> <p>Microlita</p>	<p>En los bordes del núcleo de otras unidades de sustitución en las pegmatitas complejas: tipo clevelandita o albita sacaroidea, tipo rico en biotita.</p> <p>Unidades de sustitución ricas en lepidolita en pegmatitas complejas.</p>
Fosfatos: monacita	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Zonas de las salbandas en pegmatitas zonadas.</li> <li>b) En unidades de sustitución de pegmatitas complejas</li> </ul>
Silicatos: torita, alanita, zircón, esfena	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Pegmatitas no zonadas</li> <li>b) En unidades de sustitución de pegmatitas complejas</li> </ul>

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentaran los análisis de los resultados obtenidos en la investigación y estos serán divididos por etapas para su mejor comprensión: la primera etapa se refiere a los análisis morfológicos y la segunda a los análisis químico, a su vez cada etapa está dividida por cuencas (Guaniamo y Suapure) y al final se establecerán las diferentes comparaciones establecidas en la metodología.

### 4.1 Cuenca del río Guaniamo

#### 4.1.1 Análisis Morfológicos

El análisis fué realizado a 102 granos de ilmenita correspondientes a puntos específicos en la extensión de la cuenca, de los cuales el 76% corresponden a arenas finas, 22% arenas medianas y el 2% arenas muy finas.

##### 4.1.1.1 Redondez y esfericidad

Los resultados obtenidos a partir del histograma de frecuencia basado en la redondez según la tabla de Krumbein y Pettijhon (1938), refleja una tendencia dominante de granos subangulosos en un 47% (Figura 35), el porcentaje restante se distribuye en un 25% a granos subredondeados y 28% a granos de cuya tendencia es mixta (de subangulares a subredondeados), pues no se observa uniformidad en los mismo.

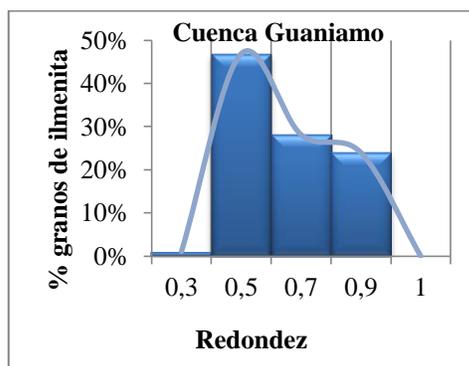
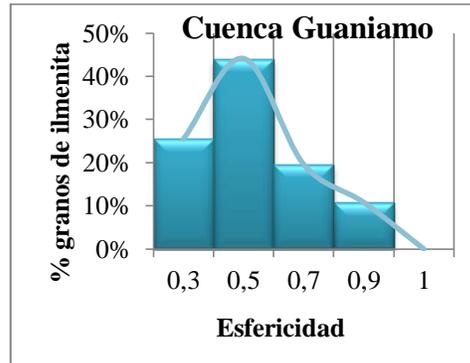


Figura 35: Histograma de redondez cuenca Guaniamo

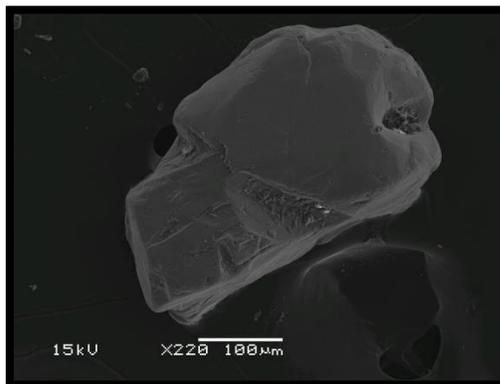
Al evaluar el histograma correspondiente a la esfericidad se observa una tendencia marcada de 70% para granos poco esféricos y un 30 % con tendencia a mayor esfericidad, en ninguno de los granos se identifica la absoluta esfericidad (Figura 36).



**Figura 36:** Histograma de esfericidad cuenca Guaniamo

Al comparar la esfericidad y la redondez se obtiene que la relación es directamente proporcional pues los granos subangulares son a su vez poco esféricos y los subredondeados presentan mayor esfericidad.

La fracción mixta que representa menos del 25% de la población, no está bien definida ya que toma en cuenta aquellos granos que posiblemente por acción del transporte han sido fragmentados después de un largo recorrido y por ende se encuentren zonas más redondeadas que otras (Figura 37).



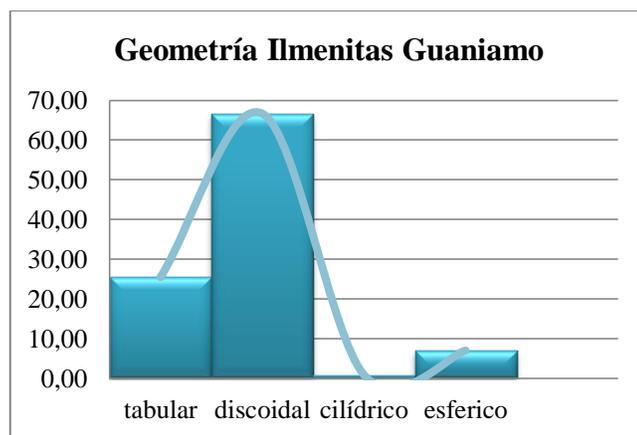
**Figura 37:** Grano de ilmenita que representa la fracción mixta subangular - subredondeado

Al asociar lo antes descrito con los hábitos característicos de las ilmenitas los del tipo prismático y bipiramidales corresponden a los primeros (subangulares y poco esféricos), y en general los granos amorfos a los segundos (subredondeados y con mayor esfericidad).

Otro aspecto importante que fue posible inferir de la relación esfericidad-redondez es la existencia marcada de dos posibles fuentes de aporte: una ubicada más cercana a la cuenca asociada a la mayor frecuencia de los granos y de tendencia subangular y la segunda fuente más distante por la afinidad de los granos hacia la redondez.

#### 4.1.1.2 Geometría de los granos

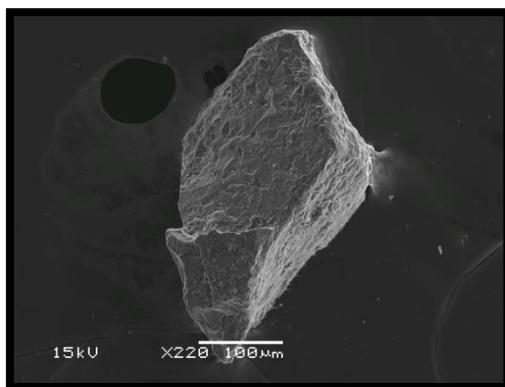
Siguiendo la clasificación de geometría de granos de Zingg (1935), se realizó un histograma de frecuencia en el cual se determinó que el 65% de los granos presentan formas discoidales y un 30% de granos tabulares (Figura 38).



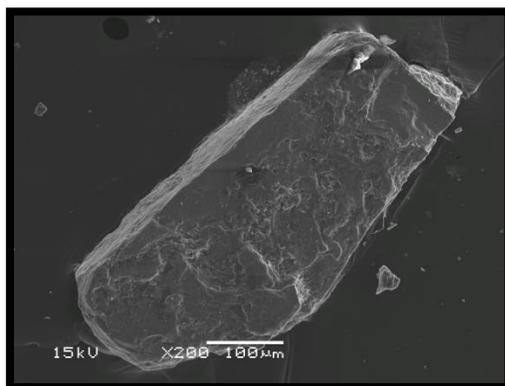
**Figura 38:** Histograma representativo de la geometría de las ilmenitas presente en el río Guaniamo

Los granos con geometría discoidal los cuales dominan pues el mayor porcentaje de ilmenitas estudiadas presentan un hábito original hexagonal bipiramidal que fueron afectados por el transporte, erosionando sus vértices y adoptando la forma discoidal (Figura 39), cuya característica dominante es que el tamaño de sus ejes es similar, ocurriendo un proceso similar con las ilmenitas con hábito original

prismático y que adoptan una geometría tabular, dominando el tamaño de uno de sus ejes (Figura 40).



**Figura 39:** Grano de ilmenita hábito bipiramidal del río Guaniamo



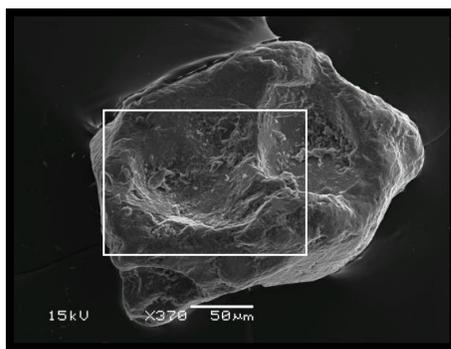
**Figura 40:** Grano de ilmenita hábito tabular del río Guaniamo

Es importante destacar que la población de granos angulares-subagulares indica que posiblemente estos granos provengan de una fuente más cercana que aquellos que son subredondeados, señalando la posibilidad de dos fuentes de proveniencia.

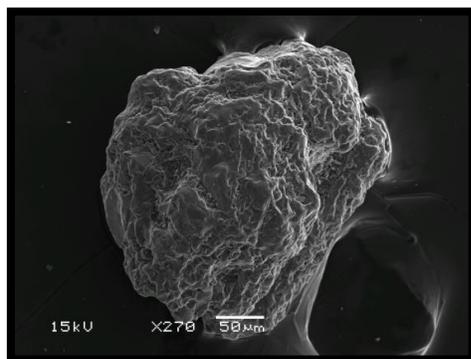
#### ***4.1.1.3 Microtexturas y relación granulométrica***

En general los granos han sufrido meteorización tanto en la roca de proveniencia, durante el proceso de transporte y en la zona de depositación, en esta cuenca es muy frecuente observar granos con microtexturas tales como: cráteres de impacto, gran variedad de fracturas, huellas de disolución, partículas adheridas al

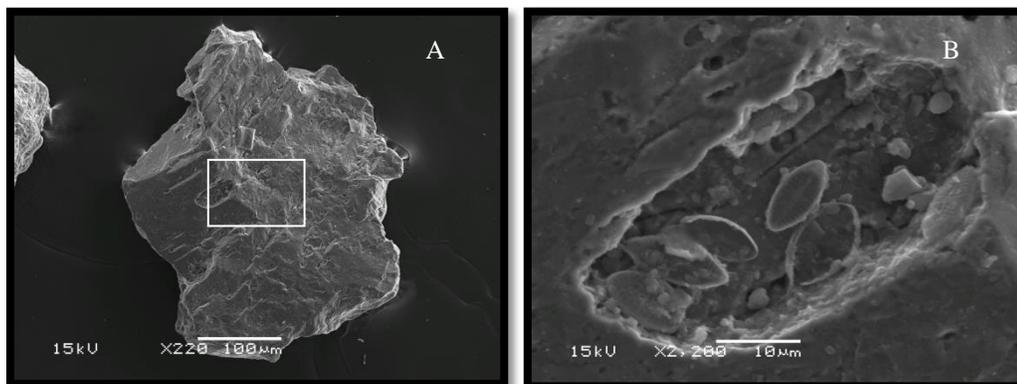
grano (diatomeas), marcas de abrasión, entre otros. También algunos granos presentaron texturas de exsolución entre la ilmenita y magnetita. En la cuenca del río Guaniamo los granos presentan diversidad de microtexturas, en un solo grano es posible observar varias microtexturas. Para los granos subangulares la microtextura más común son cráteres de impactos (Figura 41), también se observa en menor frecuencia en este tipo de grano huellas de disolución y que por ser subangulares podrían asociarse a una fuente mas cercana, ya que esta microtextura según Morton & Hallsworth (1999), puede ser originada en la roca fuente. En los granos subredondeados la microtextura más común eran huellas de impacto y poco frecuente huellas de disolución. También hay una población de granos muy meteorizados que en la mayoría de los casos se encontraban subredondeados (Figura 42). Una característica importante de esta cuenca es la presencia de partículas adheridas a los granos, particularmente diatomeas en gran abundancia, estos organismos están mejor preservados en las muestras que se tomaron en la cabecera del río (Figura 43). Por último, en algunos granos se observó la textura de exsolución tipo enrejado triangulares entre la ilmenita-magnetita (Figura 44).



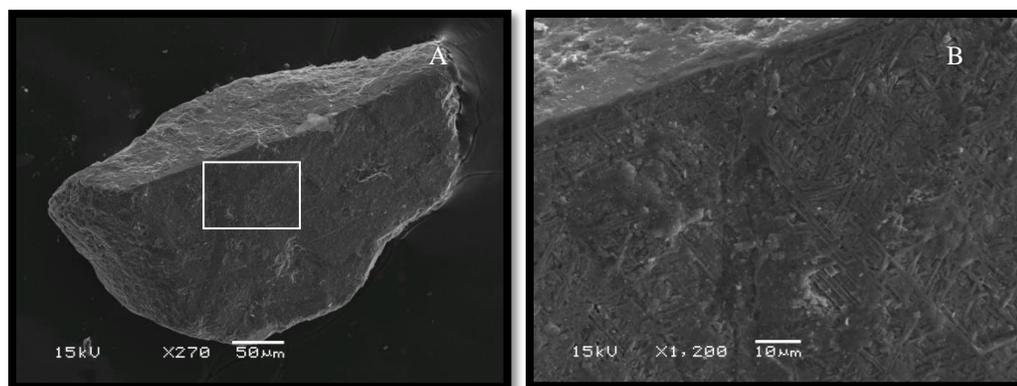
**Figura 41:** Grano de ilmenita con cráteres de impactos



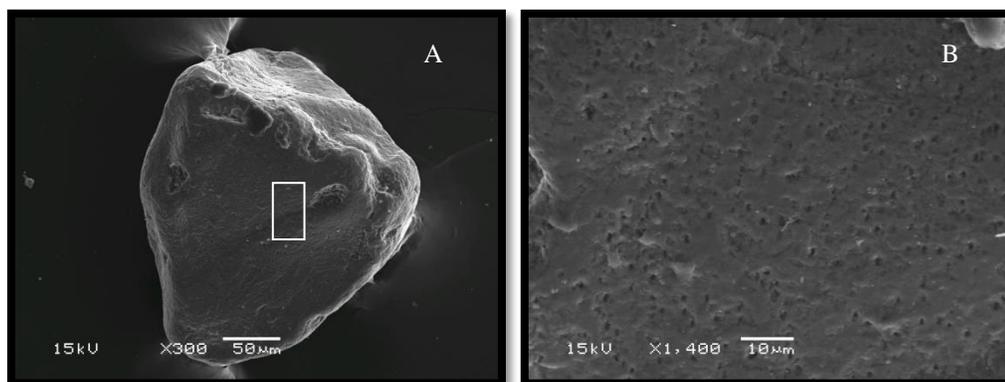
**Figura 42:** Grano de ilmenita muy meteorizada



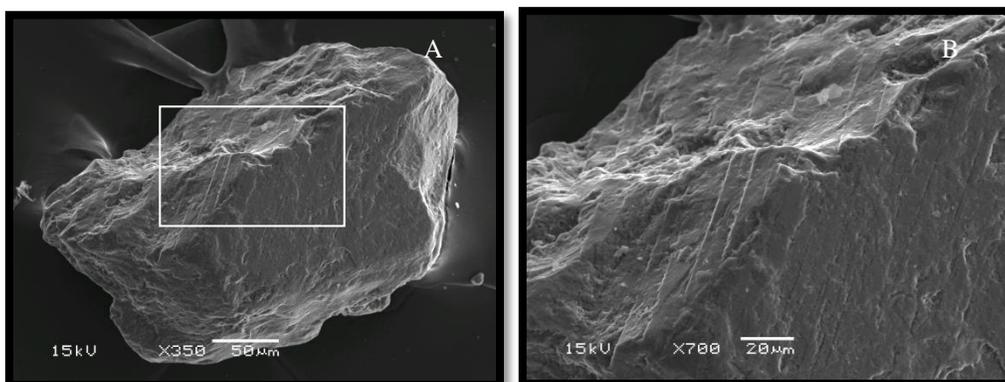
**Figura 43:** A) Grano de ilmenita río Guaniamo con diatomeas adheridas al grano;  
B) Ampliación de Diatomeas



**Figura 44:** A) Grano de ilmeno-magnetita con textura exsolución tipo enrejado triangulares; B) Ampliación textura de exsolución



**Figura 45:** **A)** Grano de ilmenita con huellas de disolución; **B)** Detalle de huella de disolución



**Figura 46:** **A)** Grano de ilmenita con facetas escalonadas; **B)** Ampliación de las facetas escalonadas

#### 4.1 Cuenca del río Suapure

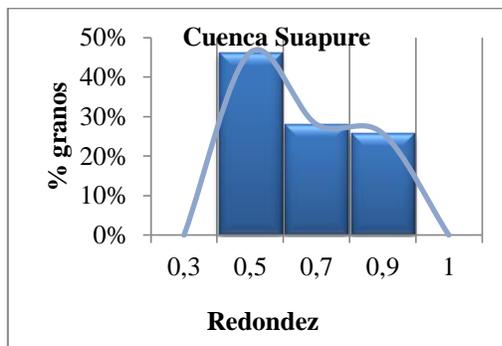
##### 4.1.1 Análisis Morfológicos

Se analizaron 104 granos de ilmenitas a lo largo de la cuenca, el 76% resultaron corresponder dentro de la escala granulométrica a las arenas finas, 22% arenas medianas y el 2% arenas muy finas.

##### 4.1.1.1 Redondez y esfericidad

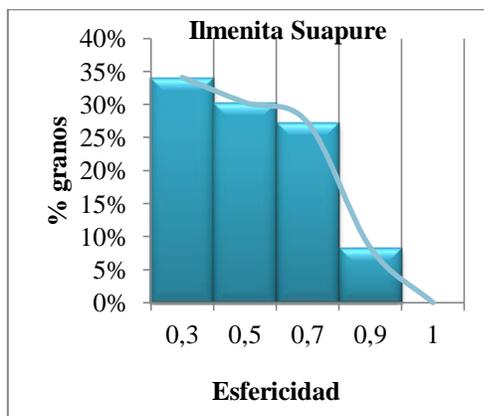
Los resultados obtenidos a partir del histograma de frecuencia basado en la redondez según la tabla de Krumbein & Pettijhon (1938), refleja una tendencia dominante de granos subangulares en un 46% (Figura 47), el porcentaje restante se

distribuye en un 26% de granos subredondeados y 26% a granos de cuya tendencia es mixta (de subangulares a subredondeados), ya que no se observa uniformidad en los mismos.



**Figura 47:** Histograma de redondez cuenca Suapure

Al evaluar el histograma correspondiente a la esfericidad, se observa una curva unimodal que tiene una mayor ocurrencia de granos poco esféricos, dicha curva va disminuyendo a medida que se acerca a la esfericidad (Figura 48).

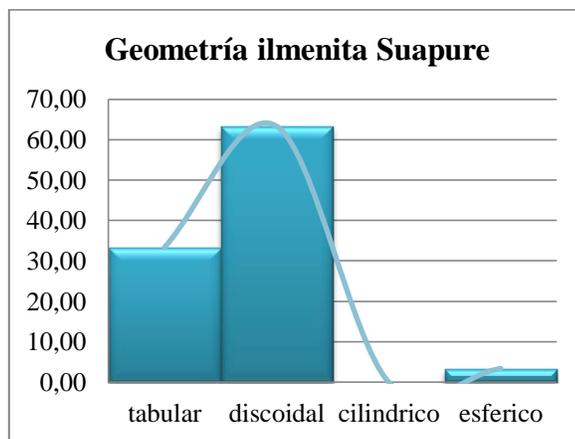


**Figura 48:** Histograma de esfericidad cuenca Suapure

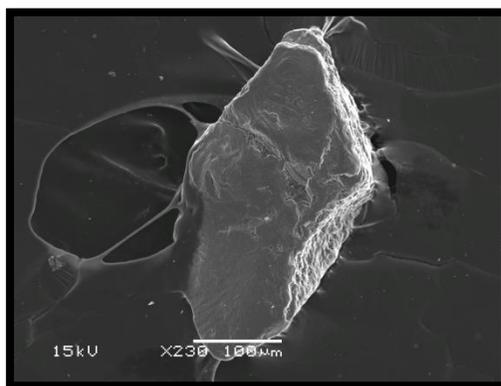
Al comparar la esfericidad y la redondez se obtiene que la relación es directamente proporcional pues los granos subangulares son a su vez poco esféricos y los subredondeados presentan mayor esfericidad.

#### 4.1.1.2 Geometría de los granos

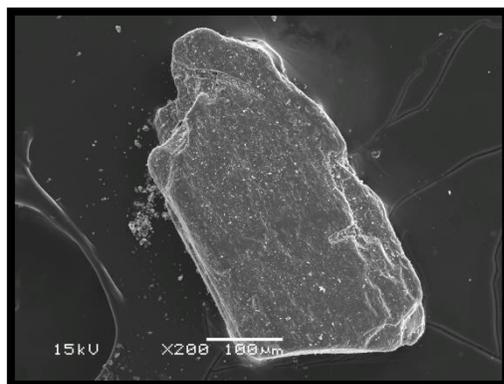
Al evaluar el histograma de geomericidad de las ilmenitas de Suapure (Figura 45), se observa que las forma con mayor frecuencia son aquellas de geometría discoidal con un 60% (Figura 50) y tabulares con 38% (Figura 51).



**Figura 49:** Histograma representativo de la geometría de las ilmenitas presente en el río Suapure.



**Figura 50:** Grano de ilmenita hábito bipiramidal del río Suapure.



**Figura 51:** Grano de ilmenita hábito tabular del río Suapure.

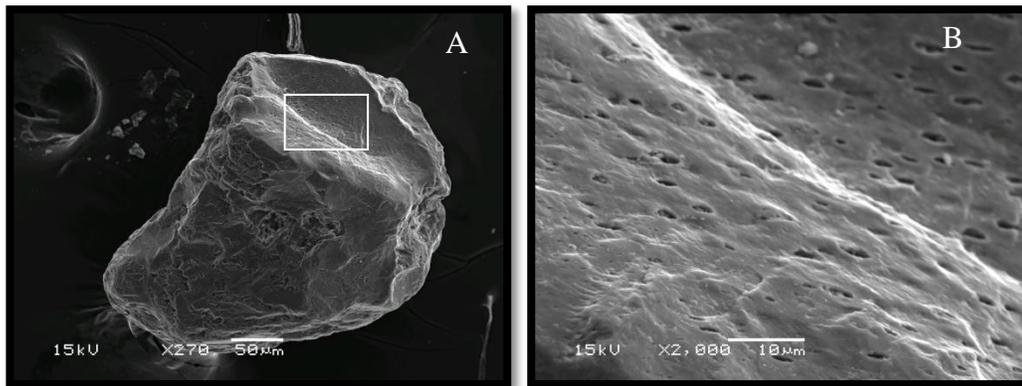
Al comparar estos resultados de redondez, esfericidad y geometría de los granos de la cuenca Suapure con los obtenidos en la cuenca de Guaniamo, se observa que morfológicamente tienen la misma tendencia, es decir, los granos con mayor frecuencia son aquellos subangulares poco esféricos y los de menor tendencia los subredondeados que presentan mayor esfericidad.

De esta manera se puede inferir de la relación esfericidad-redondez la existencia dos posibles fuentes de aporte: una ubicada más cercana a la cuenca asociada a la mayor frecuencia de los granos de tendencia subangular y la segunda fuente más distante por la afinidad de los granos hacia la redondez.

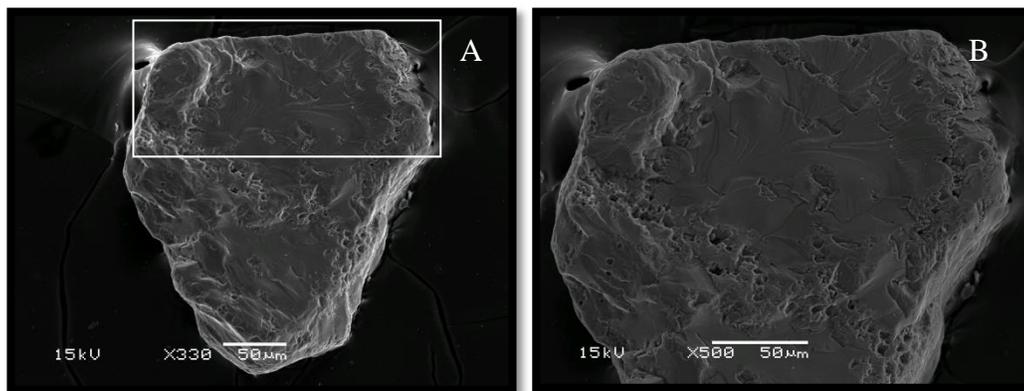
#### ***4.1.1.3 Microtexturas y relación granulométrica***

Los granos de ilmenita estudiados de la cuenca de Suapure, se observan gran variedad de microtexturas, sin embargo, las huellas de disolución (Figura 52) son muy frecuentes y están presentes en la mayoría de los granos, también fracturas concoidales (Figura 53), cráteres por impacto y una pequeña población de granos muy meteorizados.

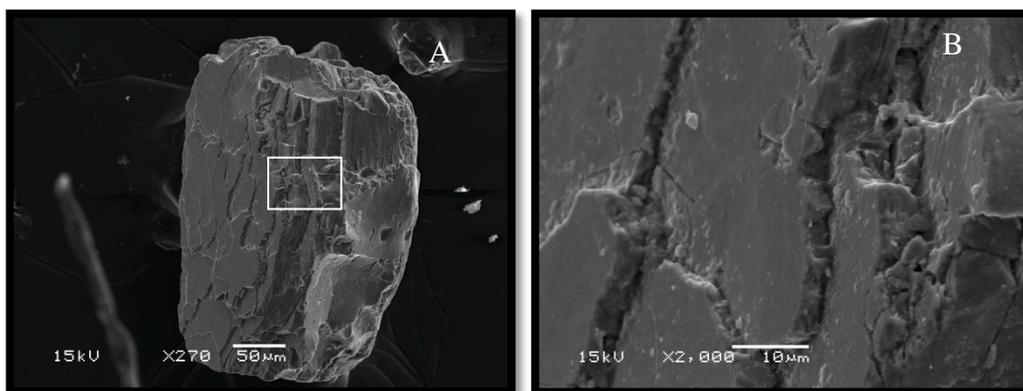
La mayoría de los granos subangulares presentaban microtexturas del tipo disolución y como se explicó anteriormente en la microtexturas de los granos de Guaniamo, este tipo de textura refleja la posibilidad de tener una fuente mas cerca al punto de muestreo, a su vez otra pequeña población de este tipo de granos presentaba cráteres de impactos. Los granos subredondeados presentaban principalmente cráteres de impacto. Los granos que estaban muy meteorizados se encontraban en ambas poblaciones.



**Figura 52:** **A)** Grano de ilmenita con huellas de disolución y a su vez huellas de impacto; **B)** Detalle de las huellas de disolución.



**Figura 53:** **A)** Grano de ilmenita con fracturas concoides. **B)** Detalle de las fracturas.



**Figura 54:** A) Grano de ilmenita con hábito tabular. B) Detalle del hábito.

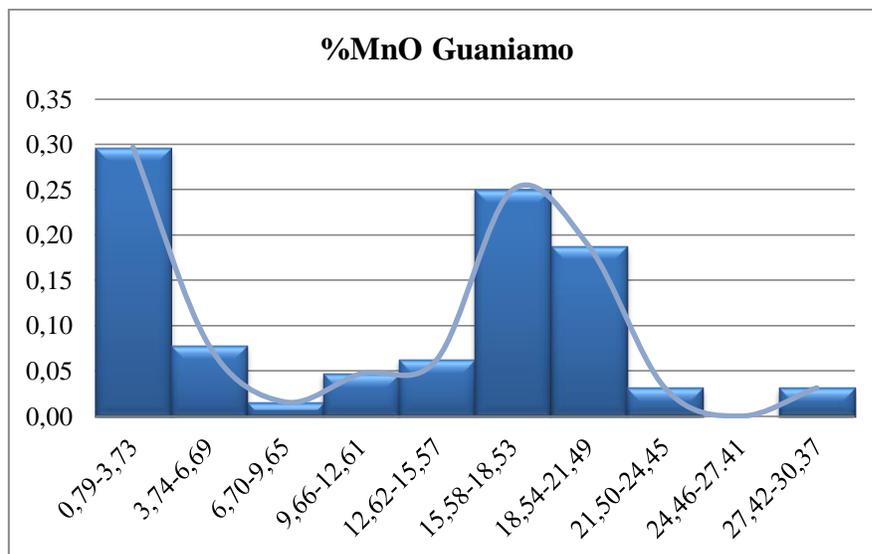
## 4.2 Análisis Químico cuenca de los ríos Guaniamo y Suapure

El análisis químico de las cuencas de los ríos Guaniamo y Suapure constó de 64 y 27 granos de ilmenita respectivamente y fue determinada la composición química de cada uno de estos granos (ver detalle Apéndice B).

Al observar en la composición química arrojada de cada grano, el porcentaje en peso p/p MnO y de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> varían notablemente, por esta razón se decidió evaluar principalmente estas variables a través de histogramas de frecuencia.

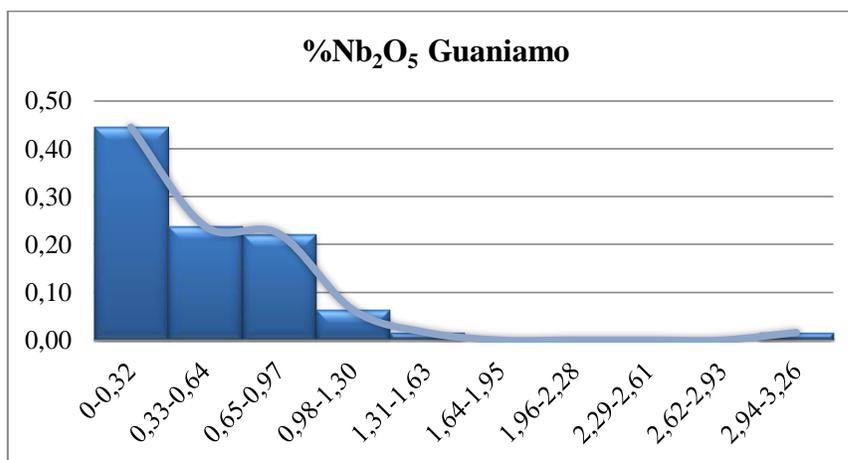
### 4.2.1 Análisis químico Guaniamo

Al estudiar el histograma % p/p MnO de la cuenca del río Guaniamo (Figura 55) se puede observar que se tiene una curva bimodal que refleja dos máximos bien marcados, el primero con la gran mayoría de los granos que tiene un % MnO de (0,79-3,73)%, el segundo que está entre (15,58-21,49)% MnO y posiblemente exista un tercero que son aquellos granos que poseen (de 27,42-30)% de MnO. Si se toma en cuenta esta variación en la composición de la ilmenita se puede decir que se tiene como mínimo dos posibles fuentes de proveniencia de este mineral.



**Figura 55:** Histograma de frecuencia % p/p MnO en ilmenitas de la cuenca del río Guaniamo

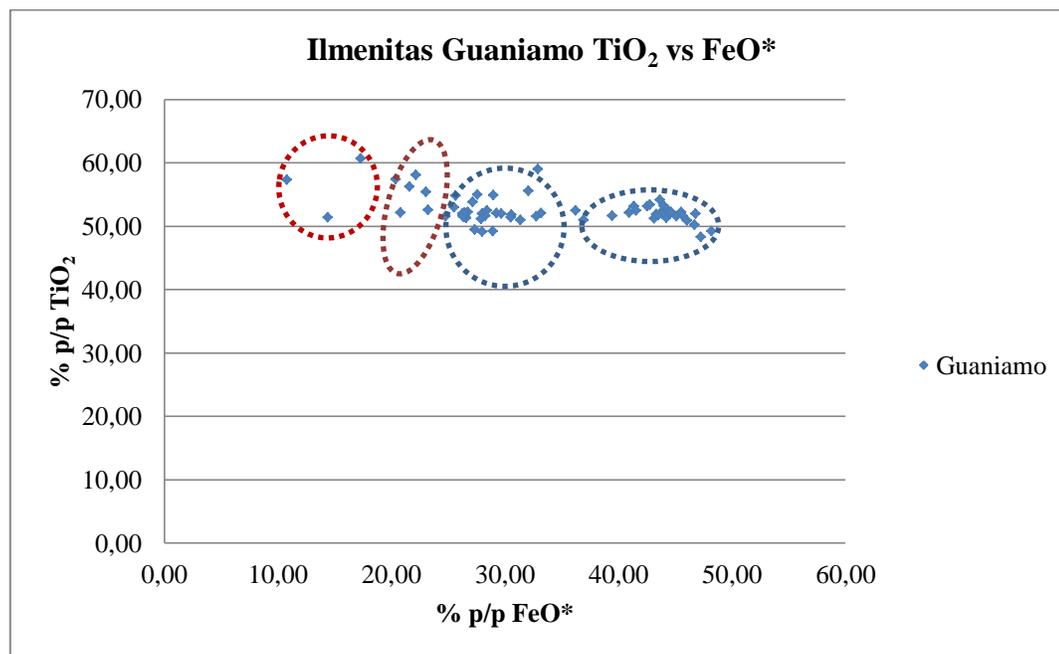
Si ahora se estudia el histograma % p/p Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 56), se observa una curva unimodal con la mayor frecuencia de granos en el intervalo (0-0,32)%, que sugiere una fuente dominante de proveniencia, una segunda fuente menos frecuente de (0,32-1,30)% y una posible tercer fuente que están en un rango de (2,94-3,26), este último grupo coinciden con aquellos granos que contienen concentraciones de aproximadamente 30% de MnO.



**Figura 56:** Histograma de frecuencia % p/p Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la cuenca del río Guaniamo

Al observar las tablas de composición de las ilmenitas (ver detalle Apéndice B), se identifica que aquellas ilmenitas con MnO entre (17-30)% corresponde al intervalo de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1,22-3,26).

Por otra parte, la relación obtenida entre % p/p TiO<sub>2</sub> vs FeO\* (FeO\*=FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Figura 57), refleja dos posibles poblaciones de ilmenitas (remarcadas en azul), una población que tiene aproximadamente 30% FeO\* y 50% TiO<sub>2</sub> y la otra población entre (40-50)% FeO\* y 50% TiO<sub>2</sub>. Hay la posibilidad de otras dos poblaciones (remarcadas en rojo) las cuales no se encuentran bien definidas, sin embargo, es necesario indicarlas: una población con aproximadamente 10% FeO\* y la otra con 20% FeO\*, ambas poseen entre (50-60)% TiO<sub>2</sub>. Al observar la composición química de estas dos poblaciones (Apéndice B), se identifica que estas ilmenitas corresponden principalmente con las que poseen una concentración de aproximadamente 20% MnO, esto refleja la posible sustitución de Fe<sup>+2</sup> por Mn<sup>+2</sup> en las ilmenitas.



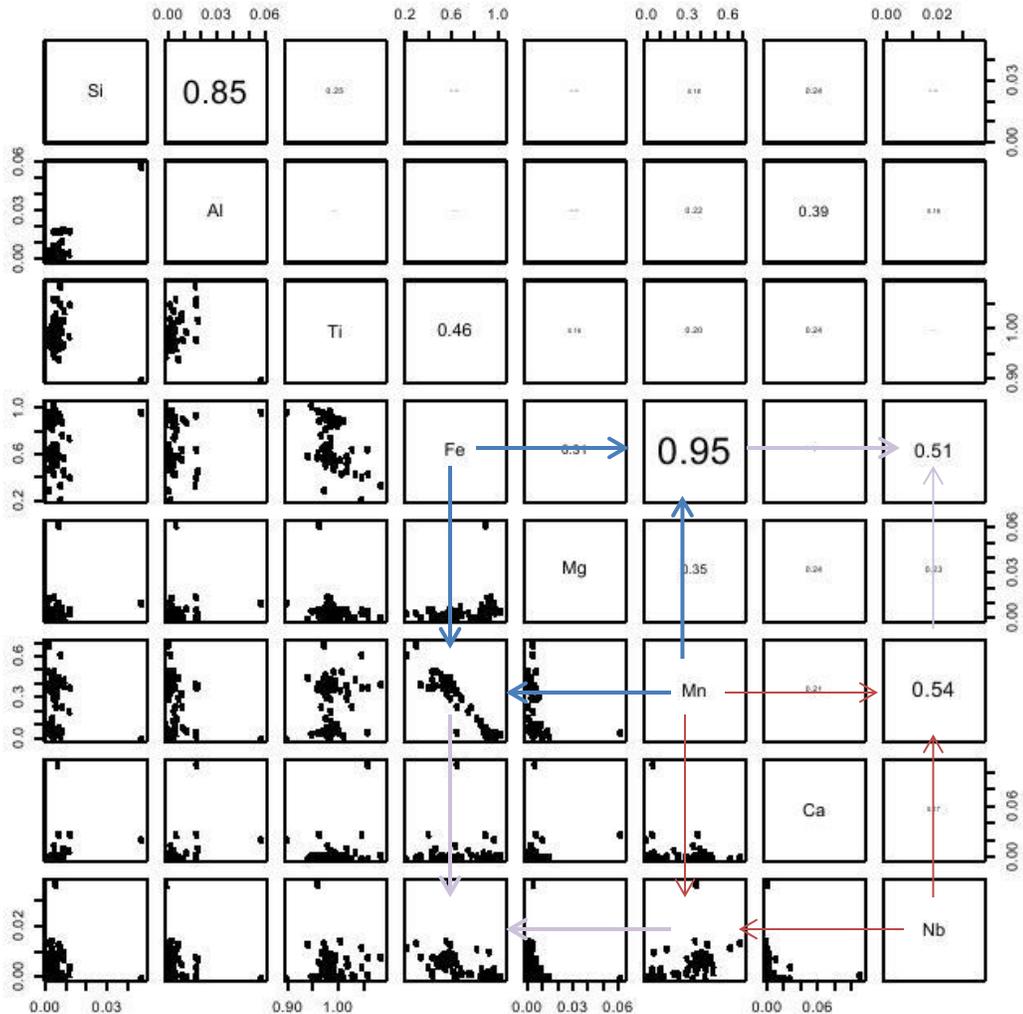
**Figura 57:** Diagrama FeO\* vs TiO<sub>2</sub> ilmenitas de Guaniamo

Al observar que existen posibles sustituciones entre algunos componentes de las ilmenitas, como por ejemplo: entre el Fe – Mn, Fe – Mg, o Ti – Nb, se realizó un

diagrama de correlación para las muestras de la cuenca de Guaniamo (Figura 58), en este es posible notar principalmente la afinidad que existe entre el Fe y Mn, la cual corresponde a un (0,95), este resultado señala efectivamente la idea planteada en párrafos anteriores referente a la posible sustitución entre estos elementos, a su vez se observa una alta correlación de (0,85) entre el Si – Al, esto podría esperarse ya que el Al puede sustituir al Si en los tetraedros de  $\text{SiO}_4$ .

En el caso de Ti-Fe la relación es baja ya que principalmente el Mn se encuentra sustituyendo al Fe.

Por otra parte, se observa la relación entre el Fe-Nb-Mn con un índice de (0,50), es importante acotar que en la estructura de la ilmenita el Nb sustituye principalmente al Ti, sin embargo, en este grupo de muestras no se ve esta relación posiblemente por la poca concentración de este óxido ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), contrario, se infiere que el Nb se encuentra sustituyendo al Mn y a su vez al Fe, esto debido a que se calculó la diferencia entre sus radios iónicos, el  $\text{Nb}^{+5} = 0,70 \text{ \AA}$ ;  $\text{Fe}^{+2} = 0,76 \text{ \AA}$  y  $\text{Mn}^{+2} = 0,80 \text{ \AA}$  y esta no es mayor al 10% en ambos casos (Nb-Mn y Nb-Fe), según Hulburt & Klein (1991), es posible un amplio intervalo de sustituciones si la diferencia de tamaño entre los iones (o átomos) es menor a un 15% aproximadamente.



**Figura 58:** Diagrama de correlación cuenca de Guaniamo

Por otra parte, fue necesario realizar otro tipo de diagrama donde se tomaran en cuenta todos los componentes químicos de cada grano de ilmenita y verificar si existe alguna relación entre estos; para ello se realizó un diagrama de cluster de la cuenca de Guaniamo y Suapure evaluando el contenido de Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mn, Mg, Nb.

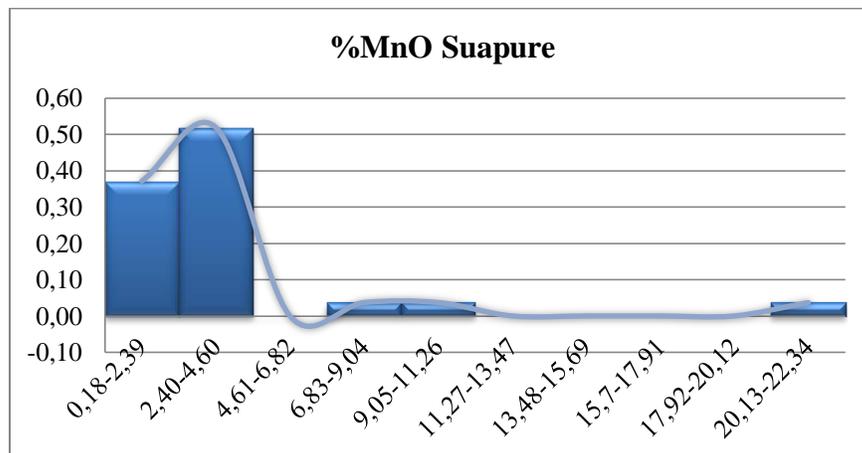
En el diagrama de cluster de la cuenca de Guaniamo (Ver Anexos), se pueden diferenciar principalmente tres grupos de granos: el primero marcado en color vinotinto, muestra la mayor cantidad de granos y al revisar las tablas de composición

de estos (Apéndice B), se aprecia que corresponden con aquellos que contienen principalmente %MnO entre (16-23)%, sin embargo, este grupo a su vez se divide en dos subgrupos y se diferencia principalmente por su contenido de CaO, el grupo 1.1 contiene entre (0-0,10)% CaO y el grupo 1.2 contiene entre (0,33-1,15)%CaO. El segundo grupo señalado en color amarillo, contiene todos los granos de la muestra m18 y algunos de las muestras m28 y m29. Estos granos se caracterizan principalmente por poseer concentraciones de MnO entre (1-3)%. También existe un posible tercer grupo señalado en color verde, que esta compuesto por dos muestra, aunque no es una población abundante se diferencia de los otros dos grupos por tener concentraciones de (30-32)% MnO. Al comparar estos resultados con los obtenidos previamente en los histogramas, el número de poblaciones coincide (mínimo dos poblaciones) y a su vez las diferencias entre estas (variación en la concentración de MnO).

Finalmente, para esta sección de Guaniamo se realizó una verificación del nivel de alteración de las ilmenitas, ya que según Deer et al., (2011), la meteorización de ilmenita en suelos, depósitos aluviales o durante la diagénesis conduce a la formación de pseudorutile. Los autores determinan este nivel de alteración mediante la fórmula del  $\#Ti = Ti/(Ti+Fe)$  y establecen unos rangos de alteración, de (0,5-0,6) ilmenita , (0,6-0,7) pseudorutilo y  $0,7 <$  leucoxeno. Las ilmenitas de Guaniamo se comportan de la siguiente manera (Apendice G) (muestras m18, m28, m29): el 50% de todos los granos corresponde a ilmenitas que tienen un  $\#Ti$  entre (0,5-0,6), 43% que están entre (0,6-0,7) (pseudorutilo) y 7% que son mayores a 0,7 (Leucoxeno). Es importante resaltar que todos los granos de la muestra m18 estan dentro del rango de (0,5-0,6), la mayoría de los granos de la m28 y m29 están distribuidas entre pseudorutilo y un pequeño porcentaje en leucoxeno, asi mismo es importante acotar que este grupo de leucoxeno corresponde con aquellas ilmenitas que contienen mas del 30% de MnO, es decir, que estas ilmenitas poseen una alta concentración de este elemento y a su vez se encuentran muy alteradas.

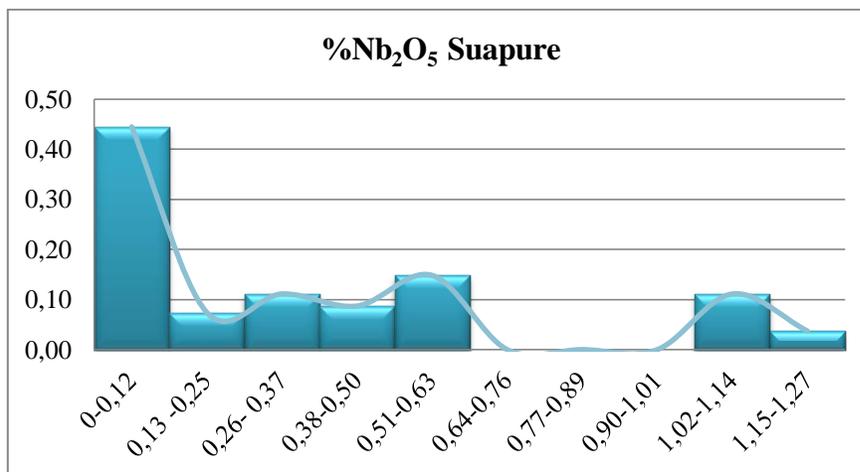
#### 4.2.2 Análisis químico Suapure

Al analizar el histograma de frecuencia % p/p MnO de la cuenca del río Suapure (Figura 59), se observa una curva unimodal con aproximadamente el 90% de los granos que presentan (0,18-5)% de MnO, el 10% restante se divide en 5% de aquellos granos que tienen (6,84-9,54)% de MnO y el otro 5% (20-23)% MnO.



**Figura 59:** Histograma de frecuencia % p/p MnO en ilmenitas de la cuenca del río Suapure

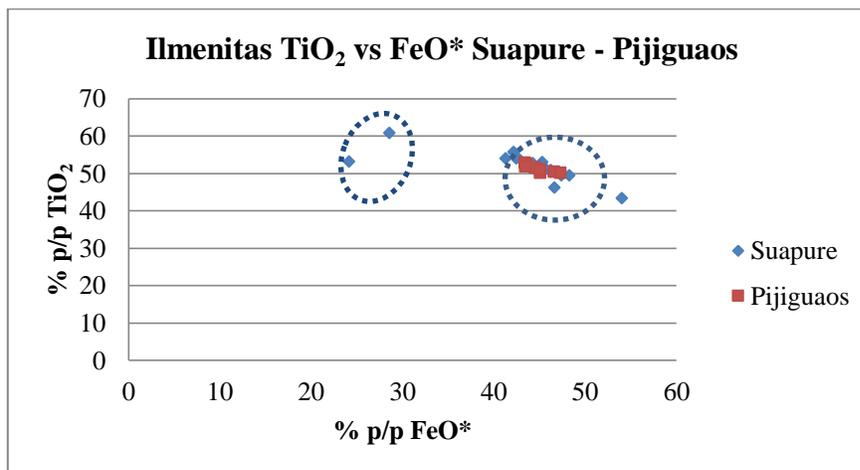
El histograma de % p/p Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 60), se observa una curva con una frecuencia de granos en el intervalo (0-0,12)%, que sugiere una fuente dominante de proveniencia, y una segunda fuente menos frecuente de (1,02-1,27)%.



**Figura 60:** Histograma de frecuencia % p/p Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en ilmenitas de la cuenca del río Suapure

Al observar las tablas de composición de las ilmenitas (ver Apéndice B), se identifica que aquellas ilmenitas con MnO entre (1,5-3,6)% corresponde al intervalo de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1,02-1,27)% y estos a su vez corresponden a la muestra P\_1 los cuales son minerales pesados provenientes de los suelos asociados al granito de los Pijiguaos.

El diagrama de TiO<sub>2</sub> vs FeO\* de la cuenca de Suapure (Figura 61), refleja claramente dos poblaciones de ilmenitas, la más común de concentraciones de FeO\* entre (40-50)% y la menos frecuente entre (20-30)% FeO\*, cabe destacar, que las ilmenitas provenientes del granito de Pijiguaos coinciden en su totalidad con la primera población mencionada, este resultado da una posible fuente de proveniencia.



**Figura 61:** Diagrama TiO<sub>2</sub> vs FeO\* ilmenitas de Suapure – Pijiguaos

Al igual que en Guaniamo, se realizó un diagrama de correlación entre los elementos que componen los granos de ilmenitas de la cuenca de Suapure (Figura 62) en el se observa principalmente la correlación entre el Ti-Fe con un coeficiente de correlación de (0,98), esto posiblemente se deba a que este grupo de ilmenitas a diferencia de las de Guaniamo no presentan grandes concentraciones de Mn, es decir, estos granos de Suapure contienen entre (0-3)% MnO, posiblemente es por esta razón que la correlación entre el Fe-Mn es de (0,34), muy baja comparada con la correlación que se observó en Guaniamo.

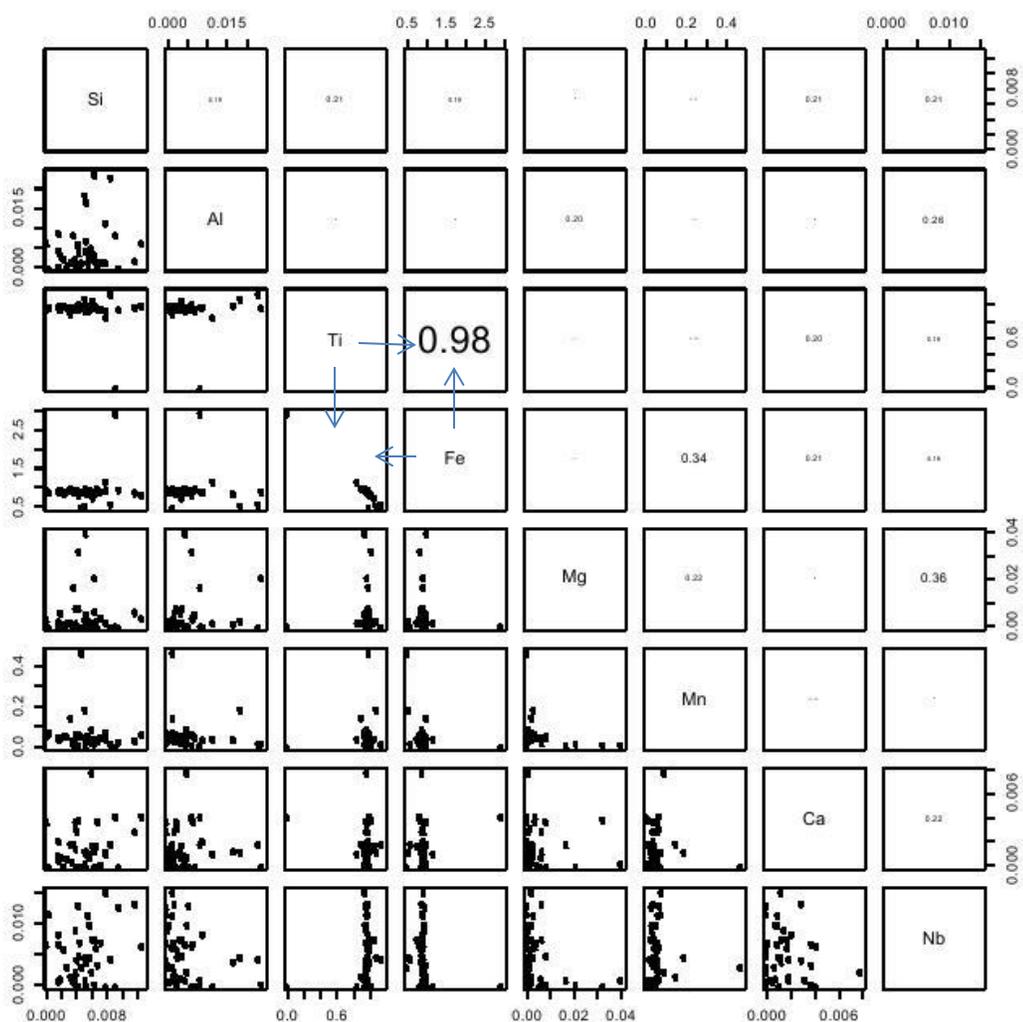


Figura 62: Diagrama de Correlación cuenca Suapure

#### **4.2.2.1 Análisis de Clúster Suapure**

Al igual que para la cuenca de Guaniamo el diagrama de clúster de la cuenca de Suapure (Ver anexos; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ) fueron valuados los mismos elementos, en el diagrama se puede observar principalmente un solo clúster resaltado en color vinotinto, el cual está dividido en dos grupos: el grupo 1.1 con la mayoría de los granos que contienen concentraciones de  $\text{TiO}_2$  entre (40-59)% a diferencia del grupo 1.2 que contienen entre (60-67)% de  $\text{TiO}_2$ . Básicamente este grupo de muestra se mantiene homogéneo con muy poca diferencia entre sus granos, en comparación a las muestras de Guaniamos las cuales si muestran diferencias notables en su composición.

De la misma manera que Guaniamo, se efectuó una verificación del grado de alteración de las ilmenitas de Suapure, dando como resultados los siguientes rangos de alteración: 93% entre (0,5-0,6) y 7% (0,6-0,7) (pseudorutilo). Comparando estos resultados con los obtenidos en Guaniamo, se observa que las muestras del alto Guaniamo se encuentran más alteradas que las muestras de Suapure y la m18, precisamente estas muestras son las que contienen mayor concentración de MnO y se infiere que a mayor contenido de MnO mas alterados se encuentran las muestras.

### **4.3 Comparación química entre las cuencas adyacentes**

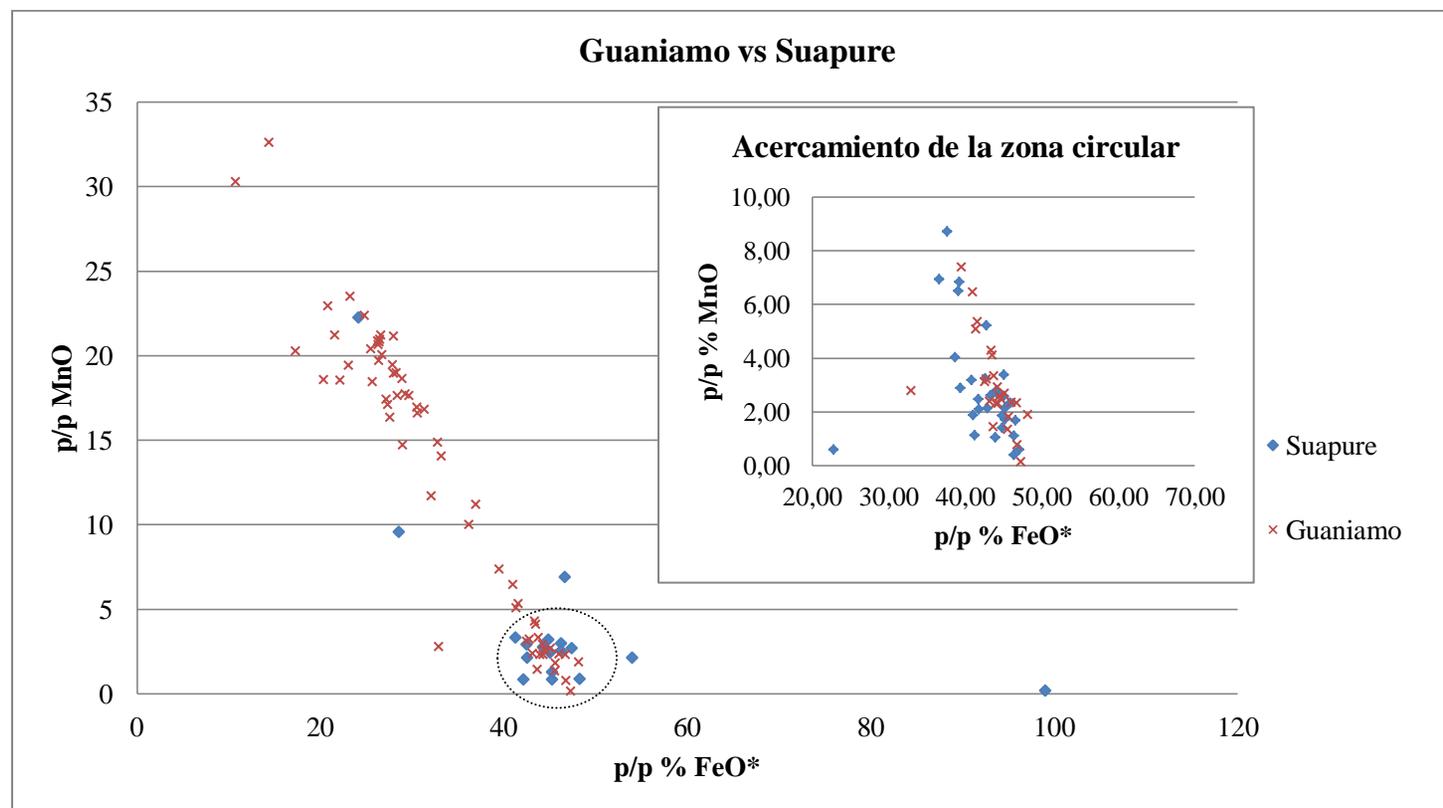
A continuación se realizará la comparación química mediante diagramas de  $\text{FeO}^*$  vs MnO entre las cuencas de Guaniamo y Suapure y a su vez con las cuencas adyacentes (Cuchivero y Parguaza).

#### **4.3.1 Comparación química entre Guaniamo y Suapure**

Al realizar la comparación entre las cuencas de Guaniamo y Suapure se observa que existe concordancia entre las muestras que tienen valores de MnO entre el (0-5)% (encerrados en el círculo), lo que se sugiere que estas muestras provienen posiblemente de la misma fuente, sólo un grano mostró una concentración de MnO por encima del 20% (Figura 63).

Geológicamente Suapure recibe aporte clástico de rocas graníticas de la Asociación de Suapure (Granito de Parguaza, Granito de los Pijiguaos con edades de

1531±39 Ma) y Asociación Cuchivero (Granito de San Pedro, Granito de Santa Rosalía con edades 1880±88 Ma y volcánicas de la Provincia Cuchivero de edad 1978±43 Ma), así mismo Guaniamo también recibe aporte de rocas graníticas de la Asociación de Cuchivero (el Granito de Santa Rosalía, Granito de San Pedro de edad 1880±88 Ma y el Granito de Guaniamito de edad 1425 Ma) y de las Kimberlitas eclogíticas de Guaniamo de 711 Ma.

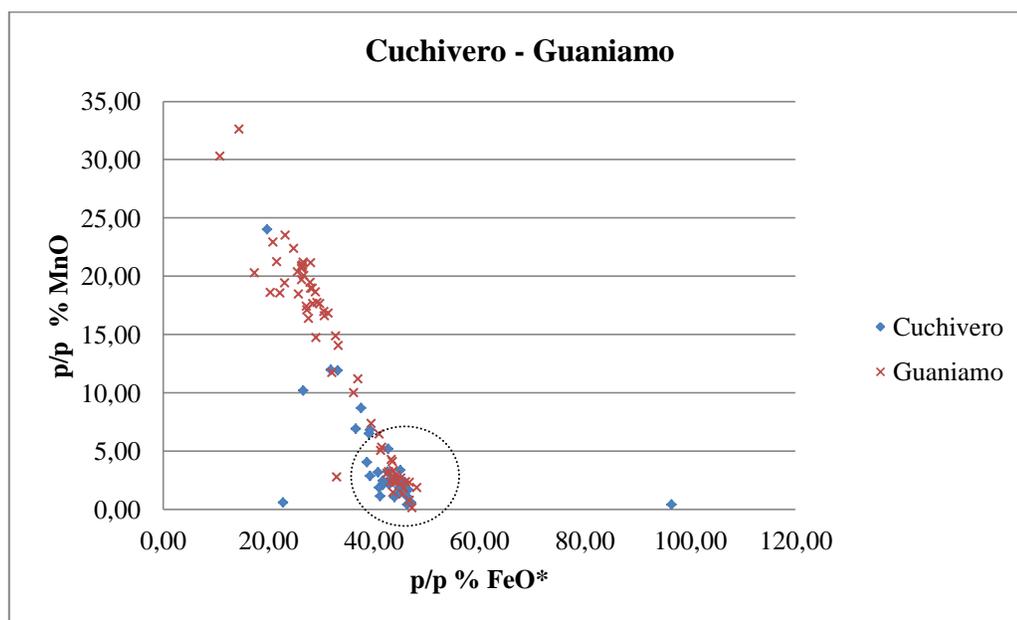


**Figura 63:** Comparación entre la composición química de la Ilmenita de Guaniamo y las ilmenitas de Suapure, diagrama FeO\* vs MnO.

#### 4.3.2 Comparación química entre Guaniamo y Cuchivero

Al observar el diagrama de FeO\* vs MnO de las cuencas de Cuchivero-Guaniamo (Figura 64), sabiendo que el río Guaniamo es afluente del río Cuchivero se observa que existe una mejor correlación entre ambas cuencas, siendo la mayoría de los granos los que poseen % MnO menor al 10%.

La cuenca de Cuchivero a su vez recibe principalmente el aporte de clásticos de rocas graníticas del Asociación de Cuchivero (Granito de Guaniamito, San Pedro y Santa Rosalia), por ende se podría decir que estas ilmenitas provienen posiblemente de una misma fuente.



**Figura 64:** Comparación entre la composición química de la Ilmenita de Guaniamo y las ilmenitas de Cuchivero, diagrama FeO\* vs MnO

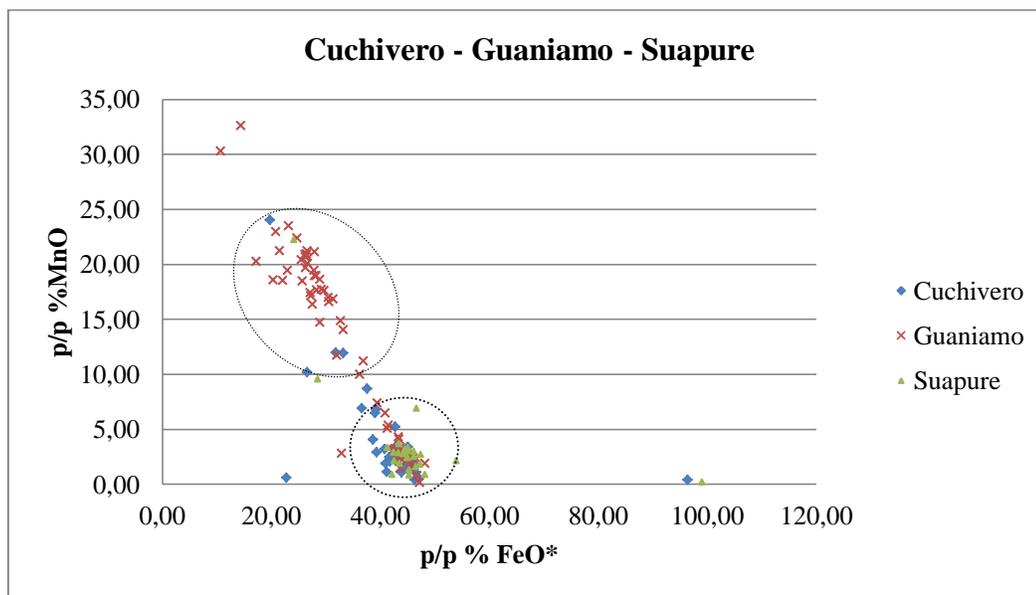
#### 4.3.3 Comparación química entre Guaniamo, Cuchivero y Suapure

Al analizar las tres cuencas en un mismo gráfico de FeO\* vs MnO (Figura 65), evidentemente se observa la correlación existente entre estas cuencas, donde la mayor proporción está concentrada en aquellos granos que presentan entre (0-5)%

MnO y la otra pequeña población definida por los granos que contienen entre (13-25)% MnO.

Las tres cuencas reciben aportes en común de los granitos de Santa Rosalia, San Pedro, Volcánicas de Caicara por esta razón, aquellas ilmenitas que contienen una concentración (0-5)% MnO las cuales son las más comunes y abundantes, posiblemente provengan de este tipo de rocas. En otro aspecto, aunque en el gráfico no está reflejado las muestras del granito de Pijiguaos (muestra P\_1), fueron incorporadas directamente en las muestras globales de Suapure, lo importante de estas ilmenitas es que forman parte de aquellas que contienen una concentración de MnO entre (0-5)% (Apéndice B, tabla 10).

Aunque no se puede afirmar hasta que se haga un estudio directo de ilmenitas que provengan de cada uno de estas rocas graníticas, aparentemente este minerales se comporta químicamente igual en estos tipos de roca, es decir, el MnO% no es mayor al 5%.



**Figura 65:** Comparación entre la composición química de la Ilmenita de Guaniamo, Cuchivero y Suapure, diagrama FeO\* vs MnO

#### **4.3.4 Cluster de todas las cuencas (Guaniamo- Suapure-Cuchivero- Parguaza)**

El diagrama de cluster de todas las cuencas (Ver Anexos), en el cual fueron evaluadas todas las muestras para observar su comportamiento y determinar si existe alguna semejanza con los resultados obtenidos en los histogramas anteriores; presenta tres poblaciones de granos que se diferencia claramente: el primer grupo señalado en amarillo corresponde principalmente a la mayoría de los granos, este grupo se divide en dos subgrupos: el grupo 1.1 en donde se encuentra la mayor cantidad de granos y se diferencia de los otros grupos por tener una concentración de MnO varia entre (0-3)%. El grupo 1.2, esta constituido por las muestras m28 y m29 donde los granos tienen concentraciones entre (10-20)% de MnO; ambos grupos poseen divisiones internas con pocas diferencias. El tercer grupo corresponde a los dos granos que son los únicos que contienen una concentración de (30-32)% de MnO y el 4to y último grupo corresponde a un solo grano de ilmenita que tiene una concentración de CaO de 11,13% . Estos resultados afectivamente se asemejan a los que se ha venido planteando hasta el momento, es decir, que posiblemente existen mínimo tres fuentes de proveniencia de estas ilmenitas.

#### **4.4 Comparación química entre las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las estudiadas en otros trabajos**

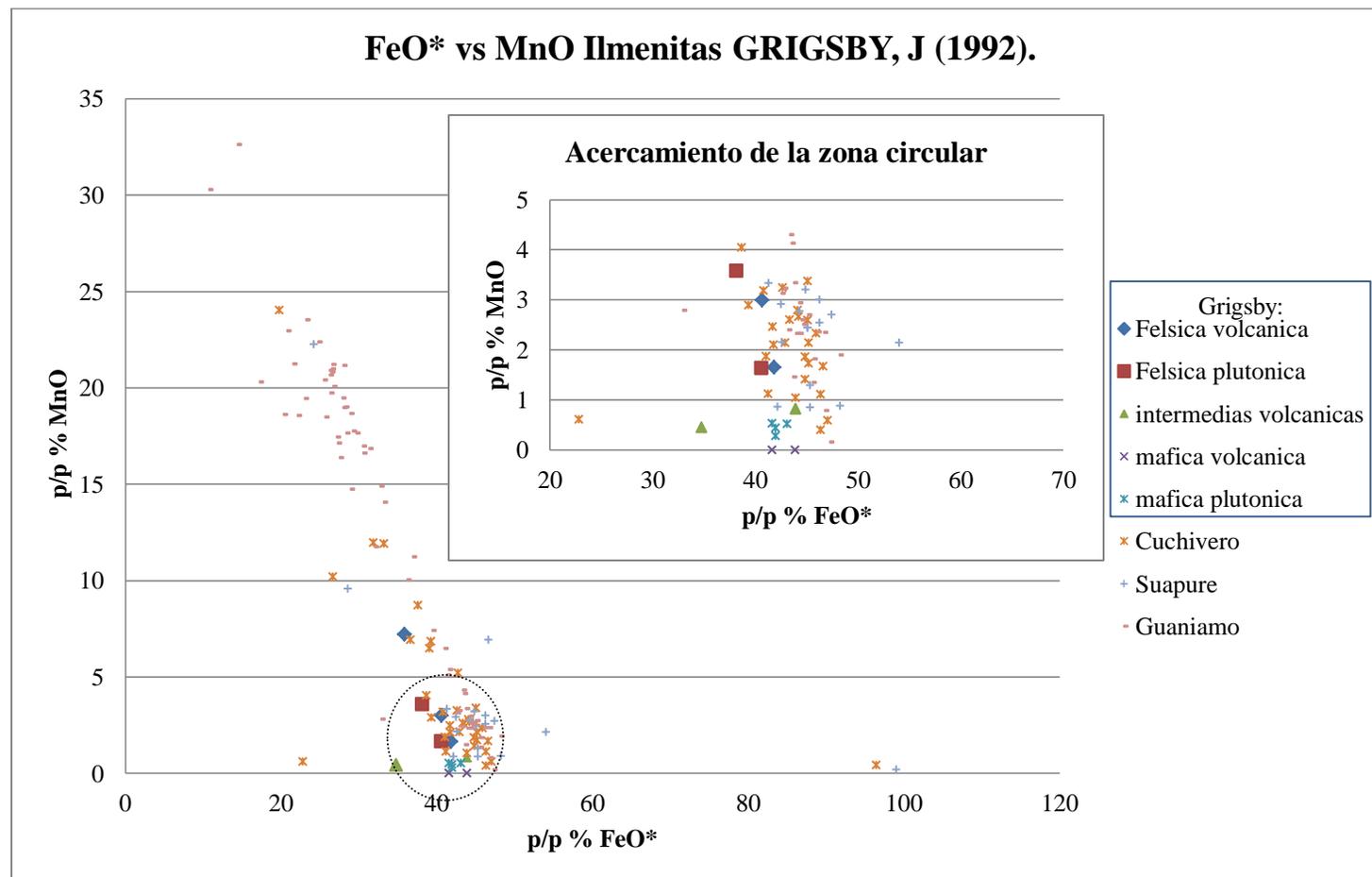
Para este punto, al observar que existen dos tendencias claras de ilmenitas en las cuencas de Guaniamo y Suapure se decidió dividir las en dos grupos: Grupo A aquellas con MnO entre (0-10)%, el grupo B constituido por ilmenitas de (13-25)% de MnO y un tercer grupo (grupo C) de pocos granos de ilmenitas que contienen concentraciones de MnO por encima del 30%.

Así mismo, en la búsqueda de las posibles fuentes de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure basándose en la proporción de MnO y Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, se compararon químicamente con diferentes ilmenitas que provenían de varios tipos de rocas tanto a nivel nacional como a nivel mundial (Brasil, Argentina, Paraguay, Africa).

#### **4.4.1 Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las estudiada por Grigsby, (1992)**

Grigsby (1992), estudió detritos de ilmenitas de diferentes tipos de rocas ígneas (tabla 13), el establece que este mineral posee una huella digital química que indica su posible roca de proveniencia.

En base a lo propuesto por Grigsby (1992), se compararon las ilmenitas de este trabajo con las estudiadas por él, a través de una diagrama de  $FeO^*$  vs  $MnO$  (Figura 66), al analizar este gráfico se observa que las ilmenitas de rocas félsicas bien sean plutónicas o volcánicas son las que coinciden con las ilmenitas del grupo A; siendo el Grupo de Cuchivero principalmente de rocas graníticas se esperaría estos resultados, es decir, este grupo A de ilmenitas posiblemente son de este tipo de rocas.



**Figura 66:** Comparación entre las ilmenitas de GRIGSBY, J (1992) y la zona en estudio

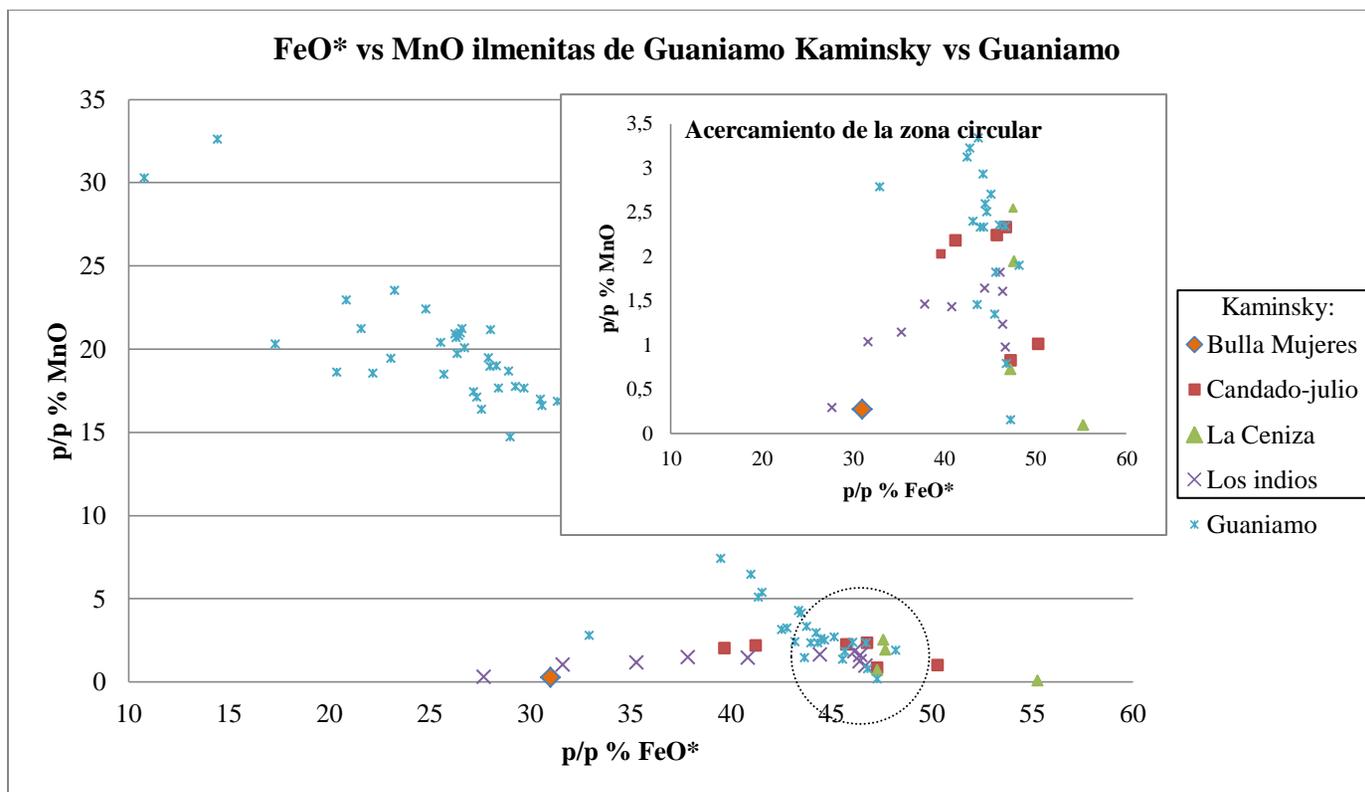
#### **4.4.2 Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas de Kimberlitas por Kaminsky, F., et al. (2004)**

El trabajo de Kaminsky et al. (2004), es una de las investigaciones previas más importantes, ya que estudió químicamente las ilmenitas de las Kimberlitas de Guaniamo y con estos datos aporta otra posible fuente, diferente a las que se han determinado en este capítulo.

Al realizar un diagrama  $\text{FeO}^*$  vs  $\text{MnO}$  (Figura 67), comparando los valores obtenido en las ilmenitas de Guaniamos de este trabajo con las ilmenitas de la Kimberlita de Guaniamo de Kaminsky, se observa que existe una pequeña correlación en aquellas ilmenitas que tienen aproximadamente entre (0-5)%  $\text{MnO}$ , posiblemente parte de las ilmenitas del grupo A provenga de la Kimberlita de Guaniamo. También, se realizó un diagrama de cluster con las ilmenitas de Guaniamo las estudiadas por Kaminsky et al. (2004) (Ver anexos), para observar si existía alguna relación entre estos dos grupos de ilmenitas, en este diagrama se observa que efectivamente hay un pequeño grupo de granos que estadísticamente son semejantes, los cuales tienen una concentración aproximadamente entre (1,6-2,34)% de  $\text{MnO}$  y de  $\text{MgO}$  de (0-0,17)%, no obstante, es importante decir que a su vez estos granos que coinciden estadísticamente con los de este autor, pertenecen a la muestra m18 la cual fue recolecta cercana a la zona de kimberlitas estudiadas por Kaminsky et al. (2004).

El autor, también reporta unos pequeños granos de microilmenita con valores entre (11- 13)%  $\text{MgO}$ , en este trabajo no se encontraron granos que tuvieran esta composición, en general los granos estudiados en este trabajo no pasan del 2% en  $\text{MgO}$  (Apéndice C3), esto posiblemente se deba a que las ilmenitas estudiadas por el autor son de la roca a diferencia de las estudiadas en este trabajo que proceden de sedimentos de ríos.

Torres (1984), reporta ilmenitas del río Paragua con porcentaje de 1,05%  $\text{MnO}$  y 0,022 %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , este río está ubicado al centro-sur del estado Bolívar asociado a las rocas volcánicas ácidas de la Formación Caicara y localizado en el área del caño Mari, afluente izquierdo del Alto Paragua (Apéndice C2), estos datos aportan una posible fuente de proveniencia.

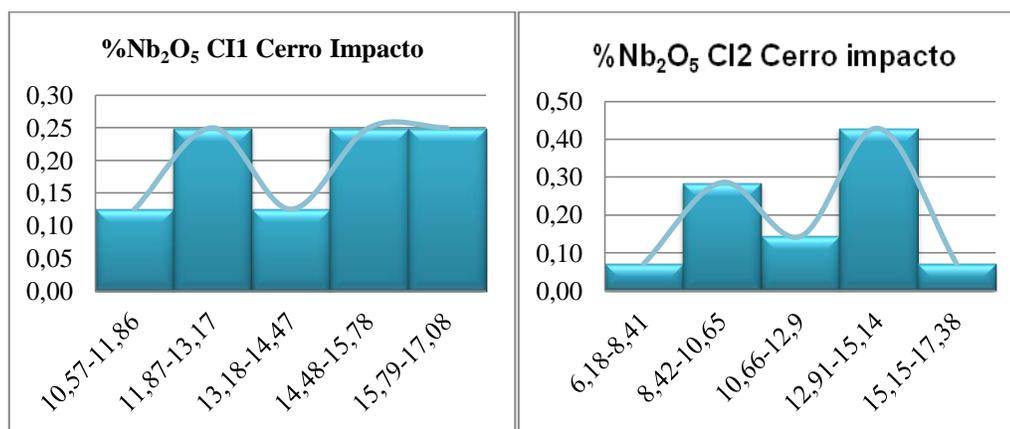


**Figura 67:** Diagrama  $FeO^*$  vs  $MnO$ , comparación química de la Ilmenita de la Kimberlita de Guaniamo estudiada por KAMINSKY et al. (2004) y las ilmenitas de Guaniamo estudiadas en este trabajo

#### 4.4.3 Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas de Cerro Impacto, estado Bolívar

Se contó con muestras recoletadas de la laterita de Cerro Impacto (CI1 y CI2) del trabajo de Greaves (1976), los resultados obtenidos fueron ilmenitas ricas en Nb e ilmenorutilo ricos en Nb (ver detalle en Apéndice B12).

Haciendo un análisis de los histogramas de Cerro Impacto (Figura 68), podemos observar que ambos presentan una curva bimodal marcando dos posibles ilmenitas-Nb dentro de esta zona del Impacto. Esto posiblemente se deba a que hay zonas de Cerro Impacto más enriquecidas en Nb que otras.



**Figura 68:** Histogramas de frecuencia % p/p Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ilmenitas de Cerro Impacto.

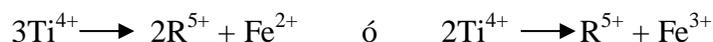
Es importante decir que de todas las ilmenitas estudiadas en las cuencas de (Guaniamo, Cuchivero, Suapure, Parguaza) no se encontraron granos que tuvieran esta composición tan alta de Nb, en algunos casos los granos de la cuenca de Guaniamo que contenían exsoluciones y estas presentaban altos porcentajes de Nb.

Considerando que Cerro Impacto es una carbonatita lateritizada y tienen comúnmente cantidades apreciables de Fe y Mn, es necesario explicar cómo esos elementos son enriquecidos en las lateritas. En un ambiente de alta precipitación y de vegetación selvática, como en el Cerro Impacto, las aguas meteóricas cargadas de CO<sub>2</sub> y de ácidos orgánicos provenientes de la descomposición de la abundante

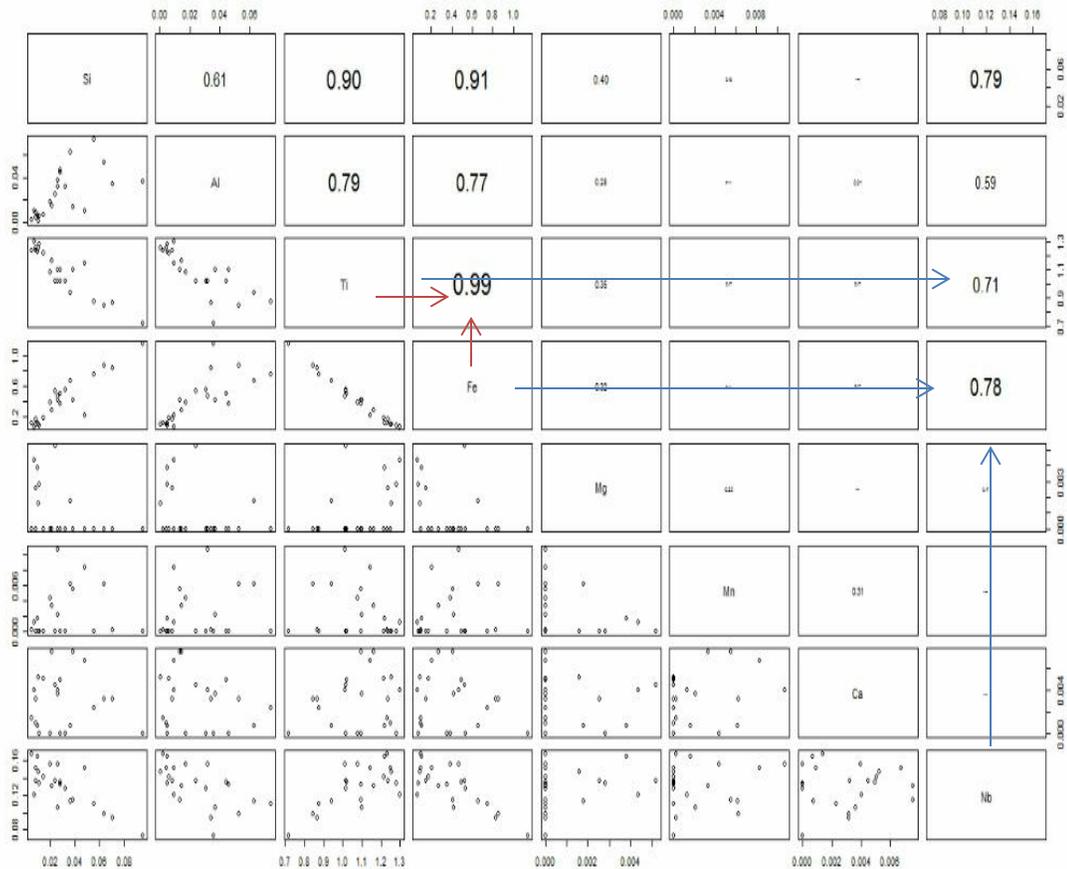
materia vegetal, son un solvente efectivo para la mayoría de los silicatos y para los carbonatos que se disuelven formando bicarbonatos.

En este proceso de solución de minerales primarios, posiblemente se liberen todos los cationes, pero una vez liberados, los de potencial iónico bajo, tales como  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$ , se quedan en solución en las aguas de quebradas y ríos. Los de potencial iónico alto tales como  $Fe^{+3}$ ,  $Mn^{+3}$ ,  $Al^{+3}$ , tierras raras,  $Th^{+4}$ ,  $Ti^{+4}$ ,  $Nb^{+5}$ , y  $Ta^{+5}$  (Mason, 1966), precipitan en forma de hidrolizados, a este último grupo de elementos pertenecen los encontrados en las lateritas del Impacto y en Mrima Hill, Kenya (Harris y Jackson, 1966). Esta podría ser una de las razones por las cuales las ilmenitas de Cerro Impacto son ricas en Nb y no Mn como en otras Carbonatitas.

Las ilmenitas-Nb de Cerro Impacto, muestran la afinidad que existe entre el Ti, Fe y el Nb los índices de correlación están por encima del (0,71), esto se debe a que estas ilmenitas-Nb tienen mas contenido de Ti, siendo en muchos caso Ilmenorutilo. Según Deer et al. (1992), dentro del ilmenorutilo el Fe a menudo se debe al entrecrecimiento de la ilmenita o hematita con el mineral, pero la estrecha similitud del radio iónico entre Ti, Nb y Ta permite a estos iones, entrar en la estructuras de este mineral. La estructura se equilibra electrostáticamente por vacantes y por la sustitución del Ti por intercambios, tales como:



Por lo tanto es comun encontrar, mezclas isomorfas de rutilo con los niobatos y tantalatos Deer et al. (2011). También, al determinar el grado de alteración de estas ilmenitas se observa que mas del 61% de los granos están por encima de (0,7), es decir, que se han alterado a leucoxeno (Apendice G).



**Figura 69:** Diagrama de Correlación Cerro Impacto

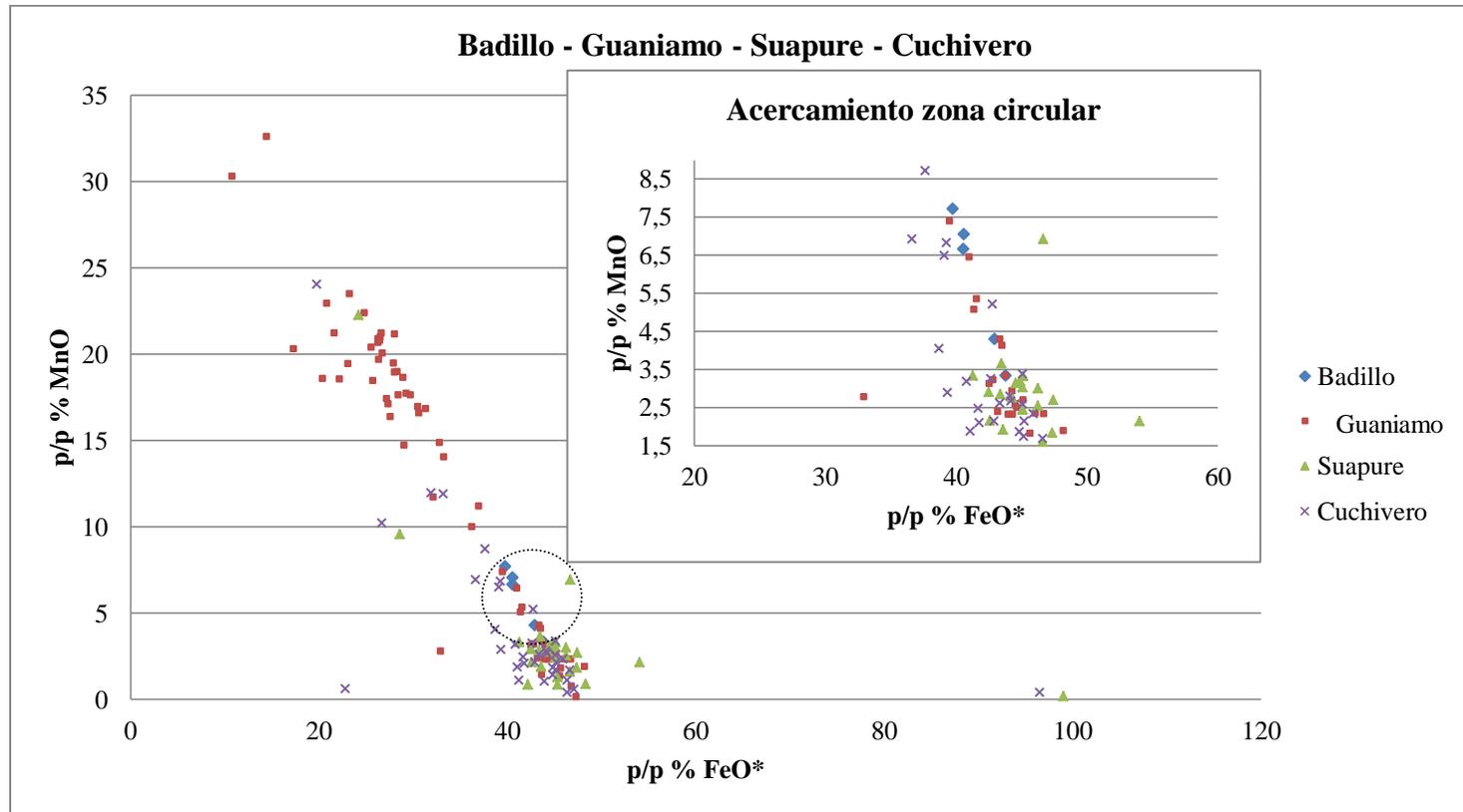
#### 4.4.4 Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las ilmenitas del Granito de Potrerillos, Badillo Argentina

Para complementar este estudio también se realizó una comparación entre las ilmenitas de las cuencas (Guaniamo, Cuchivero y Suapure) con las ilmenitas del yacimiento de Badillo, Argentina estudiada por Sardi (2003), siendo la roca caja el Granito de Potrerillos.

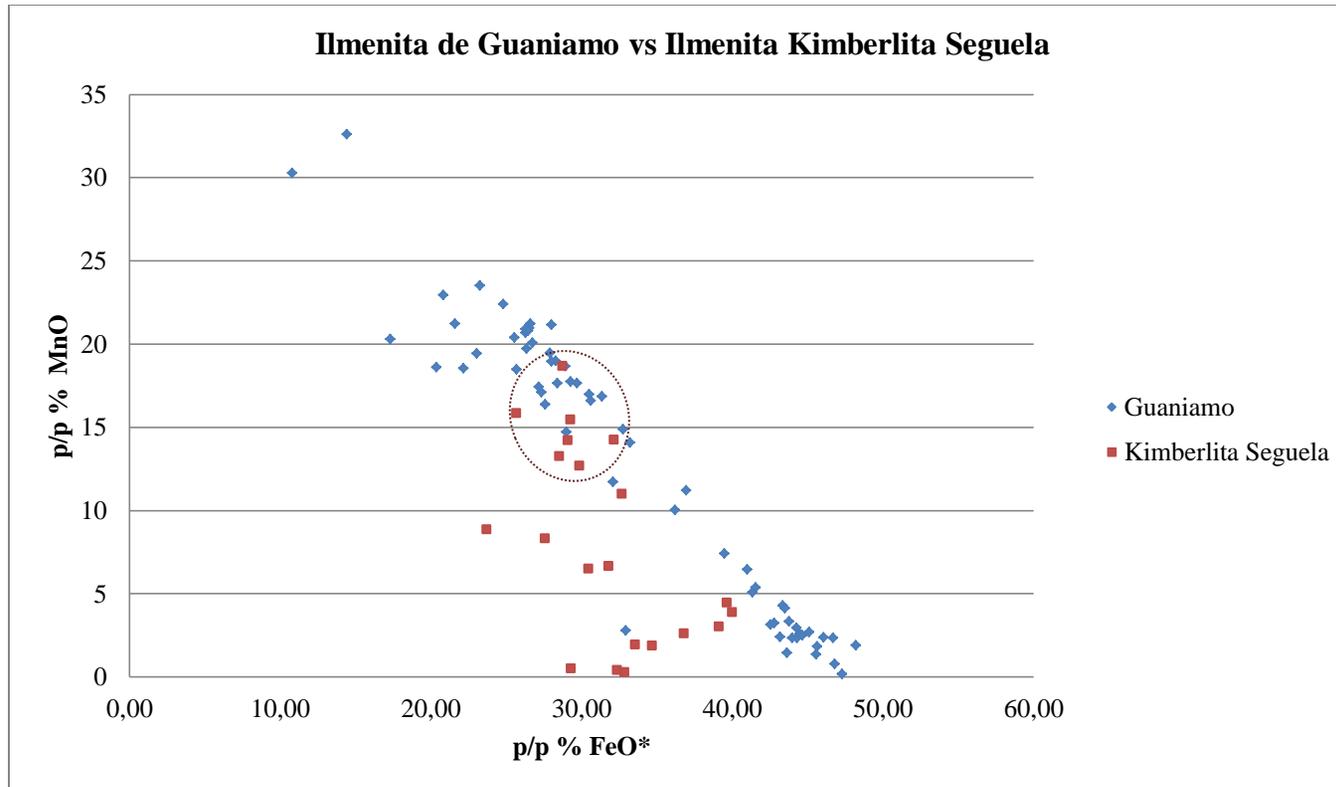
Al evaluar el diagrama FeO\* vs MnO (Figura 70), se observa que existe correspondencia en aquellas ilmenitas que tienen entre (0-9)% MnO, bajo esta correlación y como se dijo en párrafos anteriores, aparentemente las ilmenitas de rocas graníticas se comportan químicamente iguales presentando concentraciones de MnO aproximadamente de (0-9)%.

#### **4.1.1 Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure con las ilmenitas de la Kimberlita de Seguela, Côte d'Ivoire (Africa Occidental)**

Allialy, M., et al. (2011), hacen referencia principalmente a ilmenitas-Mg típica de rocas kimberlíticas, sin embargo, también encontraron dos poblaciones de ilmenitas que presentan concentraciones de MnO. La primer población posee concentraciones entre (0-5)% MnO y la segunda población se encuentra entre (6-18)% MnO. Comparando estas concentraciones con las ilmenitas de Guaniamo mediante el diagrama (Figura 71), se observa similitud con aquellas ilmenitas que poseen entre (10-20)% de MnO, no obstante, Allialy, M., et al. (2011), expresan las concentraciones de los óxidos de FeO\* y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por separado y no como en el caso de esta investigación donde no se alcanzó hacer distinción entre estos óxidos, por esta razón posiblemente las concentraciones de FeO\* expresados por estos autores son menores a los obtenidos en esta investigación.



**Figura 70:** Comparación entre la composición química de la Ilmenita yacimiento de Badillo, Argentina estudiada por Sardi (2003) y las ilmenitas de Guaniamo, Cuchivero y Suapure, diagrama FeO\* vs MnO



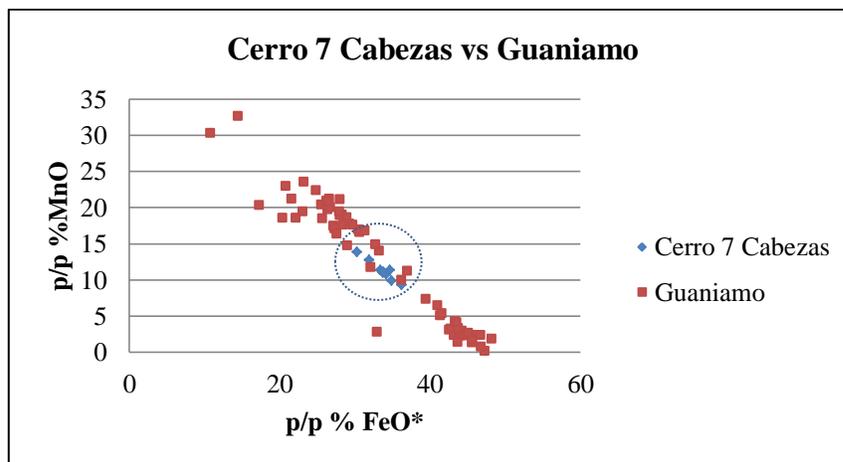
**Figura 71:** Comparación entre la composición química de la Ilmenita de la Kimberlita Seguela, Allialy, M., et al. (2011) y las ilmenitas estudiadas en este trabajo, diagrama  $FeO^*$  vs  $MnO$

Esta comparación resulta importante para la investigación, ya que adiciona otra posible fuente de proveniencia de las ilmenitas de Guaniamo, a su vez es trascendental acotar que la Kimberlita de Seguela, se encuentra ubicada al oeste de Africa muy cercana al borde de placa, zona que se encontraba unida a Guayana antes de la disrupción de Pangea. Esta Kimberlita data del Cretácico y se origina a partir de la disrupción de Pangea. Mendoza (2005) hace referencia a posibles cuerpos kimberlíticos y carbonatíticos de edad Mesozoica que posiblemente se encuentran en el área de Guaniamo y que aún no han sido localizados o en el peor de los casos ya fueron erosionados.

#### **4.1.2 Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas del Cerro siete Cabezas, Paraguay (Comin & De Barros, 2005)**

Comin & De Barros (2005), hacen referencia a ilmenitas encontradas en el Complejo Alcalino del Cerro Siete cabezas ubicado al sureste de Paraguay frontera con Brasil.

Al comparar estas ilmenitas con las ilmenitas de Guaniamo en un diagrama de  $FeO^*$  vs  $MnO$  (Figura 72), observamos que coinciden con aquellas ilmenitas que contienen entre 10-15%  $MnO$ , lo que aporta un posible fuente de proveniencia.

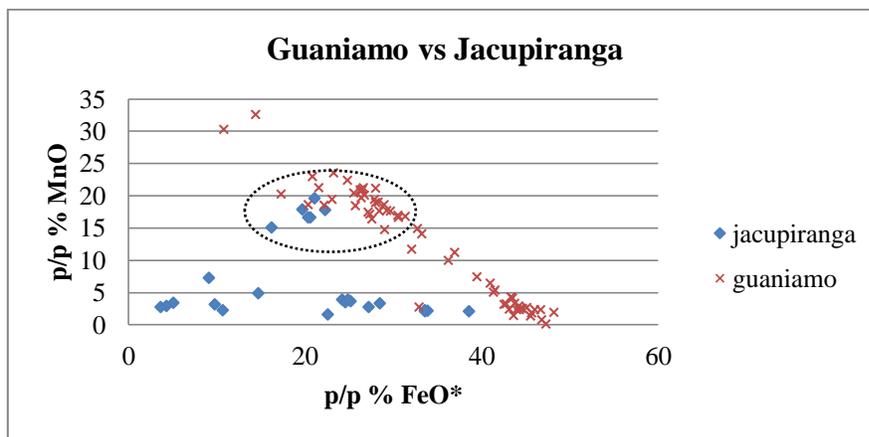


**Figura 72:** Comparación entre la composición química de la Ilmenita del Cerro siete Cabezas Comin & De Barros (2005) y las ilmenitas estudiadas en este trabajo, diagrama  $FeO^*$  vs  $MnO$ .

#### 4.1.3 Comparación química de las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas de la carbonatita de Jacupiranga, Brasil

Gaspar & Wyllie (1983), reportan en su trabajo varios grupos de ilmenitas provenientes de las carbonatitas del Complejo de Jacupiranga, en Brasil donde identifican una gran variación del %MnO (1,6-18)% (Apéndice C4) en los granos estudiados.

Al comparar entre las ilmenitas de Jacupiranga y las de Guaniamo en un gráfico de  $FeO^*$  vs  $MnO$  (Figura 73), se observa que hay una correlación en aquellas ilmenitas que están por encima del 15% de  $MnO$ , es decir, las ilmenitas que corresponde al grupo B. Es importante acotar que los resultados arrojados por Gaspar & Wyllie (1983), también son expresados como en el caso antes explicado de Allialy, M., et al. (2011), donde realizan distinción entre los  $FeO$  y  $Fe_2O_3$ .



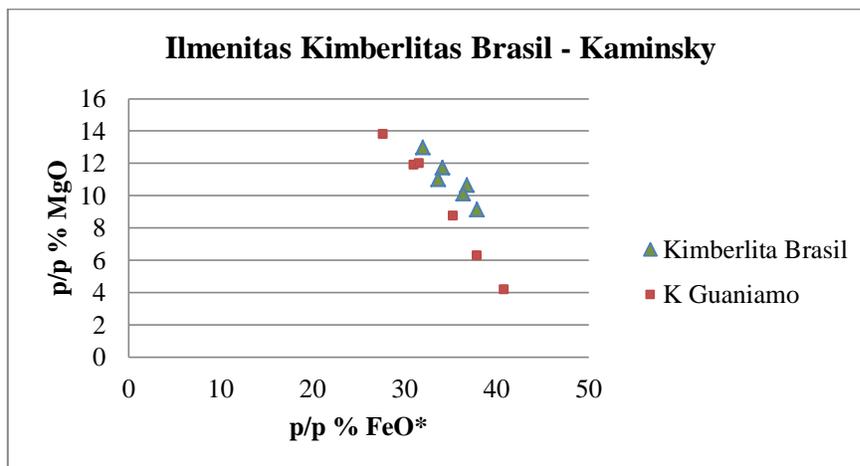
**Figura 73:** Comparación entre la composición química de la Ilmenita Jacupiranga estudiada por Gaspar & Wyllie (1983) y las ilmenitas estudiadas en este trabajo, diagrama  $FeO^*$  vs  $MnO$ .

La correlación entre las ilmenitas de Guaniamo con las ilmenitas de Jacupiranga, es de gran importancia ya que ofrece una respuesta en cuanto a una posible fuente de proveniencia para estas ilmenitas de Guaniamo que corresponden al grupo B. También haciendo referencia a las investigaciones de Brooks, W., et al. (1995), en donde proponen la existencia de otros cuerpos carbonatíticos en la zona de Bolívar y Amazonas a parte del ya conocido Cerro Impacto, el cual se encuentra ubicado muy cercano a la zona de estudio.

#### 4.1.4 Comparación química entre las picroilmenitas de Kaminsky et al. (2004) de Guaniamo con ilmenitas de la Kimberlita de Gerais, Brasil.

Por otro lado, se realizó el análisis químico de ilmenitas que provenían de una Kimberlita en Gerais, Brasil, los resultados obtenidos fueron ilmenitas ricas en  $MgO$  con porcentajes por encima del 10% en este óxido. Aunque Kaminsky et al. (2004), señala que en la zona de Guaniamo hay ilmenitas con altos % $MgO$  en este trabajo no fueron detectadas por esta razón se realizará la comparación de las ilmenitas de Gerais con las de Kaminsky.

Al analizar el diagrama de FeO\* vs MgO (Figura 74), se observa que existe una buena correlación entre ambas muestras, lo que indica que provienen de rocas semejantes (Kimberlitas).



**Figura 74:** Diagrama de comparación entre ilmenitas de la Kimberlita de Brasil y las analizadas por Kaminsky (2004).

#### 4.1.5 Asociación de minerales encontrados en las ilmenitas de los ríos Guaniamo y Suapure

Este análisis es muy importante ya que a través de la asociación de minerales podemos indicar posibles rocas de proveniencias. Las tres muestras que conforman la representación de la cuenca de Guaniamo contienen una serie de minerales que principalmente se encontraban como exsoluciones e inclusiones en la ilmenita, es importante acotar que las muestras m28 y m29 fueron tomadas hacia las cabeceras del río de Guaniamo, mientras que la muestra m18 fue tomada aproximadamente a 30km de la intersección con el río Cuchivero (Figura 1), se realiza esta acotación, ya que a continuación observaremos que existe diferencias entre los minerales encontrados en las muestras.

Es importante resaltar que los minerales expuestos en la siguiente tabla (Tabla 13), fueron determinados a partir de la composición química (ver detalle Apéndice B19) y su comparación con la base de datos: **IMA Database of Mineral Properties**, que se encuentra disponible en Internet.

**Tabla 13:** Asociación de minerales encontrados en las ilmenitas de los ríos  
Guaniamo y Suapure

Cuencas	Muestra	Inclusiones	Exsoluciones	Alteración
Río Guaniamo Ilmenitas	m18	Pirita, Barita en abundancia, aluminosilicatos abundancia, cromita, óxidos de Al y Fe	Magnetita, Ulvoespinela	
	m28	Casiterita, Aluminio silicatos, Circones.	Ulvoespinela Magnetita Columbita, Manganocolumbita	Rutilo-Nb
	m29	Alumino silicato, scheelita, casiterita, Torianita, Baddeleyita	Ulvoespinela Magnetita Perovskita Columbita Manganocolumbita Ilmenita- Nb-Mn, Fergusonita (Y)	Rutilo
Río Suapure ilmenitas	m11	CaCO <sub>3</sub> , Baddeleyita, Cassiterita, circones		rutilo

En principio puede clasificarse las ilmenitas basándonos en su composición química, cada una asociada a diferentes tipos de rocas:

1. Ilmenita común con Fe y Ti, rocas ígneas – metamórficas, placeres.
2. Ilmenita rica en Mg, asociada principalmente a Kimberlitas y xenolitos ultrabásicos
3. Ilmenita rica en Mn, asociada a rocas ácidas y carbonatitas
4. Ilmenita rica en Ca, asociadas a rocas alcalinas máficas, nefelinas, sianitas, kimberlitas y carbonatitas
5. Ilmenita rica en Nb, asociada a carbonatitas
6. Ilmenorutilo

De estas ilmenitas la más común en esta cuenca es la Ilmenita-Mn que como vimos en párrafos anteriores poseen por encima de 15% MnO no obstante, las otras ilmenitas nombradas aunque no se encuentran en abundancia se encontraron granos con esas composiciones.

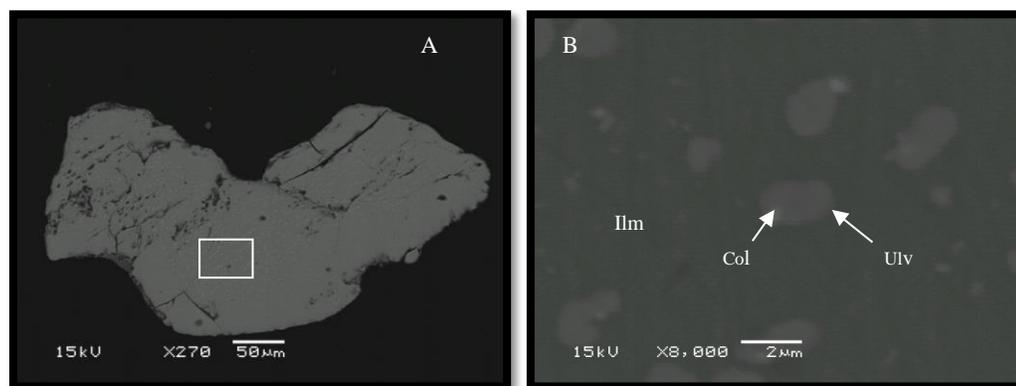
Dentro las inclusiones podemos ver que los mas predominantes son los circones y los aluminio - silicatos que posiblemente sean biotitas o flogopitas ambos se encuentran en todas las muestras, algunos circones tienen Hf, U y Th en su composición, de la misma manera hay un importante grupo de granos en la muestra

m18 que exhibe abundante inclusiones de Sulfuros, entre ellos se pudo identificar la Pirita y sulfatos como Barita, también se pudo identificar cromita aunque es poco común. En cambio en las muestras m28 y m29 se observan algunas Casiteritas, Torianita y Baddeleyita.

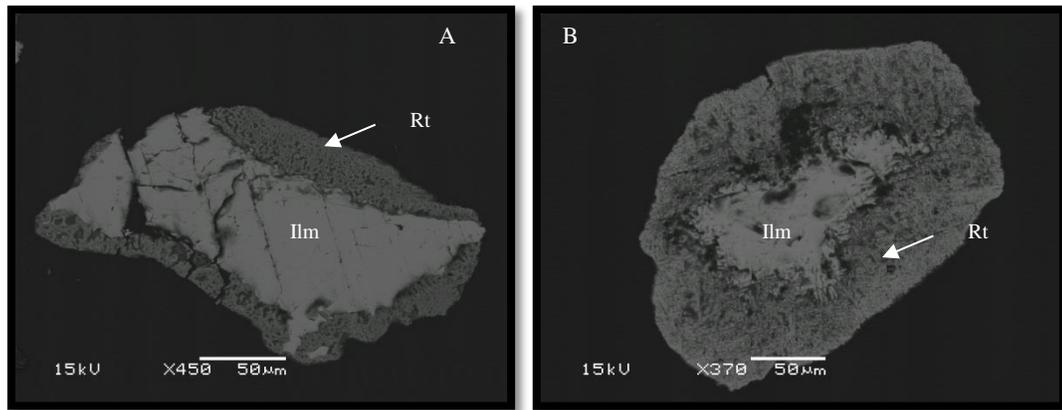
Por otra parte las exsoluciones son más abundantes en las muestras m28 y m29 principalmente con la ulvoespinela y la magnetita aunque también se encontraron gran abundancia de exsoluciones de Niobatos (columbita, manganocolumbita, fergusonita). Un caso particular fueron las exsoluciones de comlumbitas que se encontraban dentro de las exsoluciones de ulvoespinela, en general estas siempre se encontraban concentradas en un lado de los bordes de las ulvoespinelas. La columbita en estos granos tenía la particularidad de que el núcleo tenían mayor concentración de Nb que los bordes (Figura 75).

Otro mineral encontrado como exsoluciones en los granos de ilmenita muy común, es la Fergusonita-(Y) con elementos de REE (Dy, Sm, Er) en su composición química.

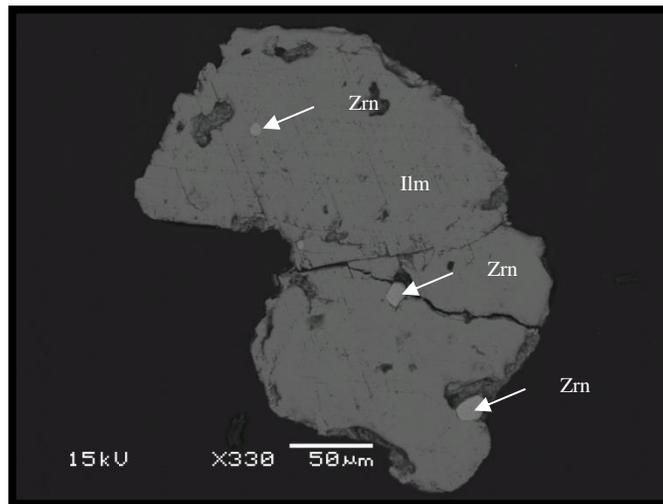
La mayoría de las alteraciones son de rutilo que va desde el borde hacia el núcleo, se observaron varios granos con estas texturas (Figura 76).



**Figura 75: A):** Grano de ilmenita m29 con exsoluciones de ulvoespinela y columbita  
**B)** Ampliación exsoluciones de ulvoespinela con columbita. Ilm = Ilmenita; Col =  
Columbita; Ulv = Ulvoespinela



**Figura 76:** Grano con borde de alteración de rutilo y núcleo ilmenita. *Ilm*=ilmenita;  
*Rt*=Rutilo.



**Figura 77:** Grano de ilmenita con inclusiones de circones. *Ilm*= ilmentia;  
*Zrn*=Circón.

En la cuenca de Suapure la mayoría de las ilmenitas presentaban inclusiones, siendo las más comunes la casiterita y los circones solo en caso particulares donde se encontraron baddeleyitas y carbonatos de calcio.

A continuación se realizó una tabla (Tabla 14) con los minerales encontrados en estas cuencas y su relación con algunos tipos de roca:

**Tabla 14:** Asociación de minerales con roca fuente

Minerales	Autor	Rocas
Minerales Nb (columbita, manganocolumbita, fergusonita-Y) perovskita, ulvoespinela, rutilo-Nb Barita y pirita, monacita	(Pollard, 1989)	Rocas alcalinas, escasas rocas graníticas, Carbonatitas
Minerales ricos en Ba, Nb, REEs y Sr	(Bell, 1992)	Lateritas de Carbonatitas
Óxidos complejos (niobatos, tantalatos ) Fergusonita-formanita, monacita U elevado; Th bajo a muy poco; Zr y tierras raras del Ce en cantidades muy pequeñas; tierras del Y poco frecuente; Nb-Ta raros o faltan por completo.	(Heinrich, 1966)	Pegmatitas radioactivas

#### 4.2 Análisis químico Magnetitas (Guaniamo-Cuchivero-Suapure)

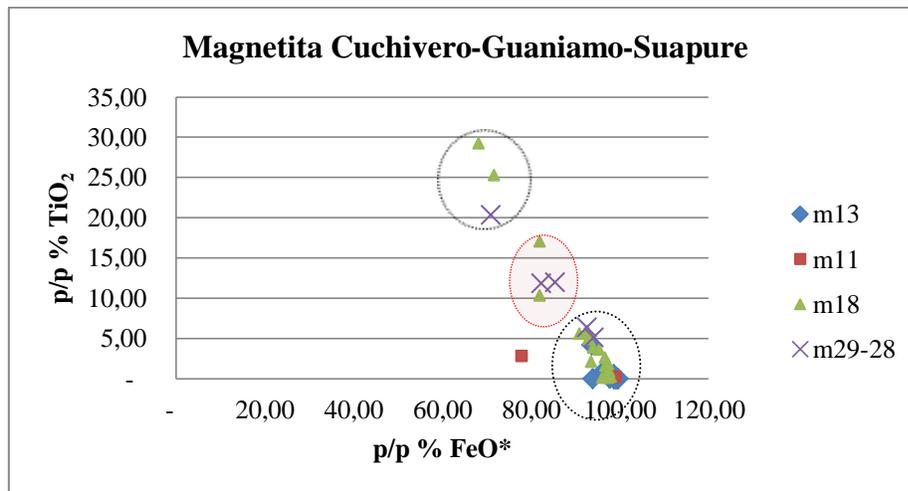
Para realizar el análisis químico se analizaron 41 granos de magnetitas de la cuenca de Guaniamo-Cuchivero y 3 de la cuenca de Suapure; las magnetitas se encontraban en menor proporción que las ilmenitas, por ende, se realizó un único análisis para todas las cuencas.

Al analizar el cuadro de composición química de las magnetitas, se observa que el % p/p  $TiO_2$  varía entre un grano y otro, esta variación es aproximadamente entre (0-30)%.

Otra variación importante es la presencia de  $V_2O_5$ , que está incluida principalmente en la composición de las magnetitas de la muestra m18, que se encuentra ubicada en la cuenca de Guaniamo; este valor varía entre 1-3% % p/p  $V_2O_5$ .

Es decir, que aparentemente se tienen tres poblaciones de magnetitas: magnetita con 99%  $FeO^*$ , ulvoespinela (aproximadamente 70%  $FeO^*$ ) y magnetita-V.

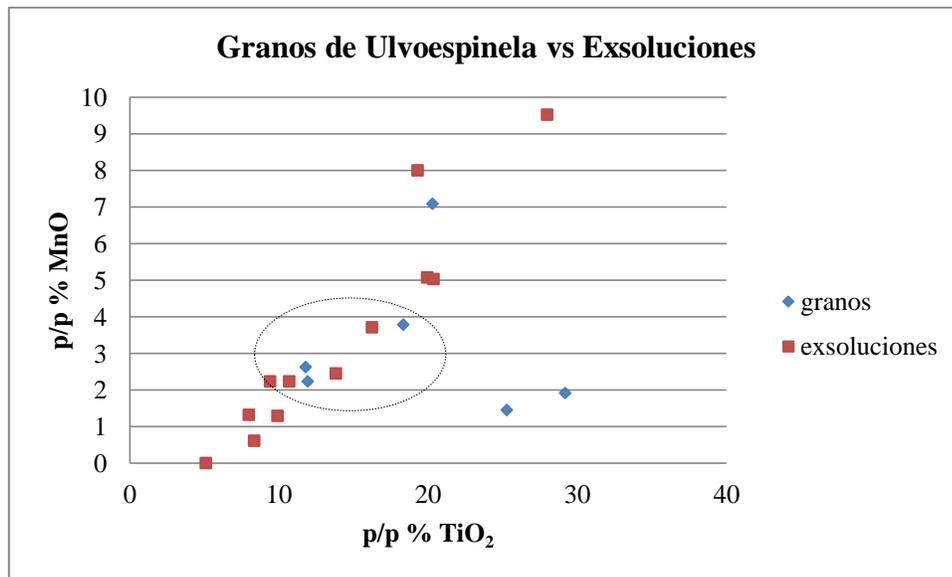
En el diagrama de  $Fe_2O_3$  vs  $TiO_2$  (Figura 78), se observan dos tendencias de magnetitas bien marcadas, una que corresponde a más del 90% en  $FeO^*$  y otra que poseen aproximadamente un 70% en  $FeO^*$ , sin embargo, podría existir una tercera tendencia dudosa (señalada en un círculo rojo), que corresponde aquellas que poseen aproximadamente un 85% de  $FeO^*$ .



**Figura 78:** Diagrama  $FeO^*$  vs  $TiO_2$  de las magnetitas de Cuchivero, Guaniamo y Suapure.

Otro aspecto importante en la composición de las magnetitas fue el % MnO encontrado en algunos granos, siendo más significativo en aquellas magnetitas de la cuenca de Guaniamo con valores entre 1-8%, estas a su vez correspondían a las magnetitas que poseían un 70%  $FeO^*$  (ulvoespinelas). Por ésta razón, se evaluó la composición química de las exsoluciones de ulvoespinela encontradas en las ilmenitas de Guaniamo, para determinar si tenían el mismo comportamiento químico y los resultados fueron los siguientes; expresados en un diagrama de  $TiO_2$  vs MnO:

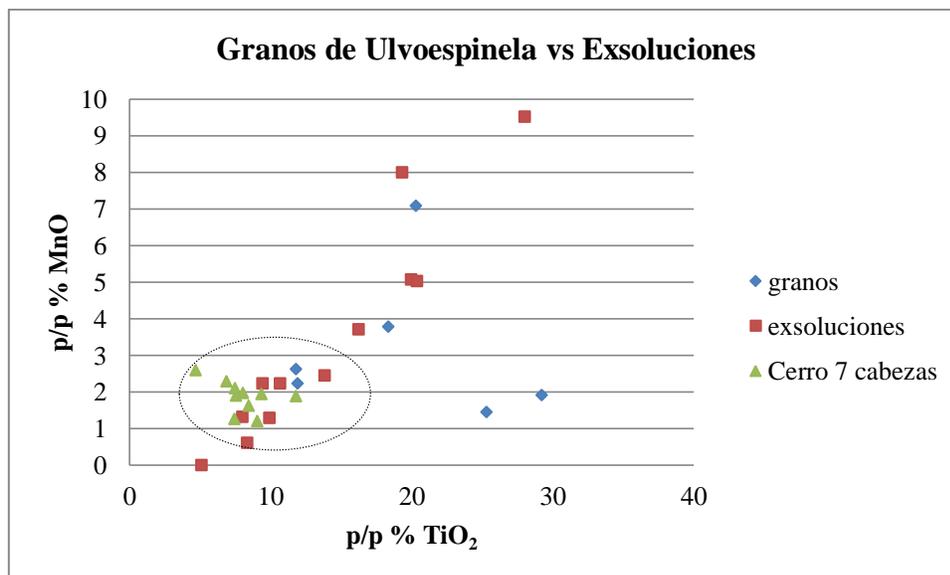
Al evaluar el diagrama de  $TiO_2$  vs MnO (Figura 79), se observa que la correspondencia existe entre aquellas ulvoespinelas que tienen de 2-4% MnO las cuales a su vez son las que poseen entre un 10-20% de  $TiO_2$ .



**Figura 79:** Diagrama  $TiO_2$  vs  $MnO$  de granos de ulvoespinela de Guaniamo y exsoluciones de ulvoespinela de ilmenitas de Guaniamo.

Si se comparan estos resultados con los arrojados por Comin & De Barros (2005), sobre las magnetitas del Cerro Siete Cabezas en Paraguay, mediante un diagrama  $TiO_2$  vs  $MnO$  (Figura 80), se observa que se correlacionan con aquellas ulvoespinelas de exsoluciones en las ilmenitas de Guaniamo que contienen entre 1-3% de  $MnO$  en su composición, que a su vez y para ser más conciso estas ilmenitas pertenecen a las muestras m28 y m29.

Así mismo, se hace referencia a estas ilmenitas de las muestras m28 y m29 que anteriormente se asociaron a posibles rocas alcalinas y carbonatíficas por ende, se puede inferir que parte de estas magnetitas posiblemente también provenga de rocas alcalinas semejantes al complejo alcalino del Cerro Siete Cabezas, Paraguay.



**Figura 80:** Diagrama  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{MnO}$  de granos de ulvoespinela de Guaniamo, exsoluciones de ulvoespinela de ilmenitas de Guaniamo con las magnetitas de Cerro 7 Cabezas de Comin & De Barros (2005)

#### 4.3 Comparación entre los análisis Morfológicos y químicos de las ilmenitas de Guaniamo y Suapure

No se puede establecer una relación directa entre estos dos análisis, debido a que el análisis químico no se le hizo directamente al grano al cual se le realizó el estudio morfológico a pesar de esto, aún en las baquelitas hay granos que conservan su morfología y se puede dar una estimación la cual debería ser estudiada en un trabajo posterior.

En la cuenca de Guaniamo existe dos tendencias en la geometría de los granos: discoidales y tabulares, aquellos granos discoidales abundan en las muestras m28 y m29 que se encuentran en las cabeceras del río Guaniamo, y las muestras que se encuentran cercanas a la convergencia con el río Cuchivero (m18), los granos tienden a prevalecer aquellos que tiene formas tabulares sobre las discoidales.

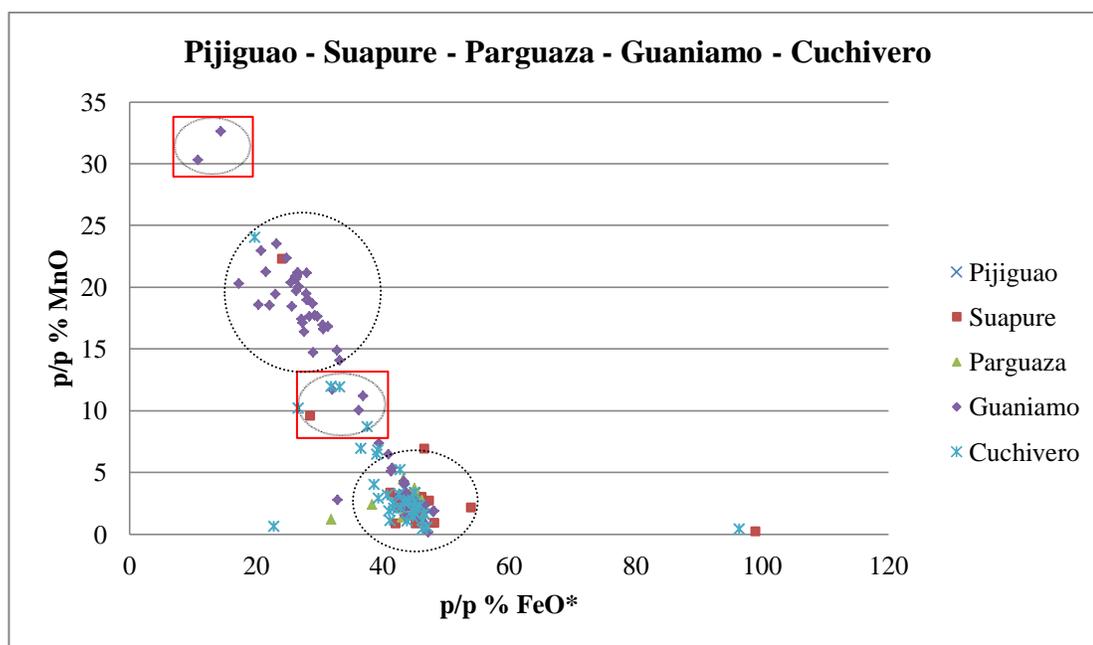
En estas muestras m28 y m29 cabe destacar que son aquellas ilmenitas donde el  $\text{MnO}\%$  se encuentran entre 10-25%. En cambio las ilmenitas de la muestra m18 son aquellas ilmenitas que poseen principalmente entre 0-5%  $\text{MnO}$ . Es decir, que los

granos con geometrías discoidales poseen principalmente entre 10-25% de MnO y aquellos que tienden a ser tabulares tienen entre 0-5% MnO.

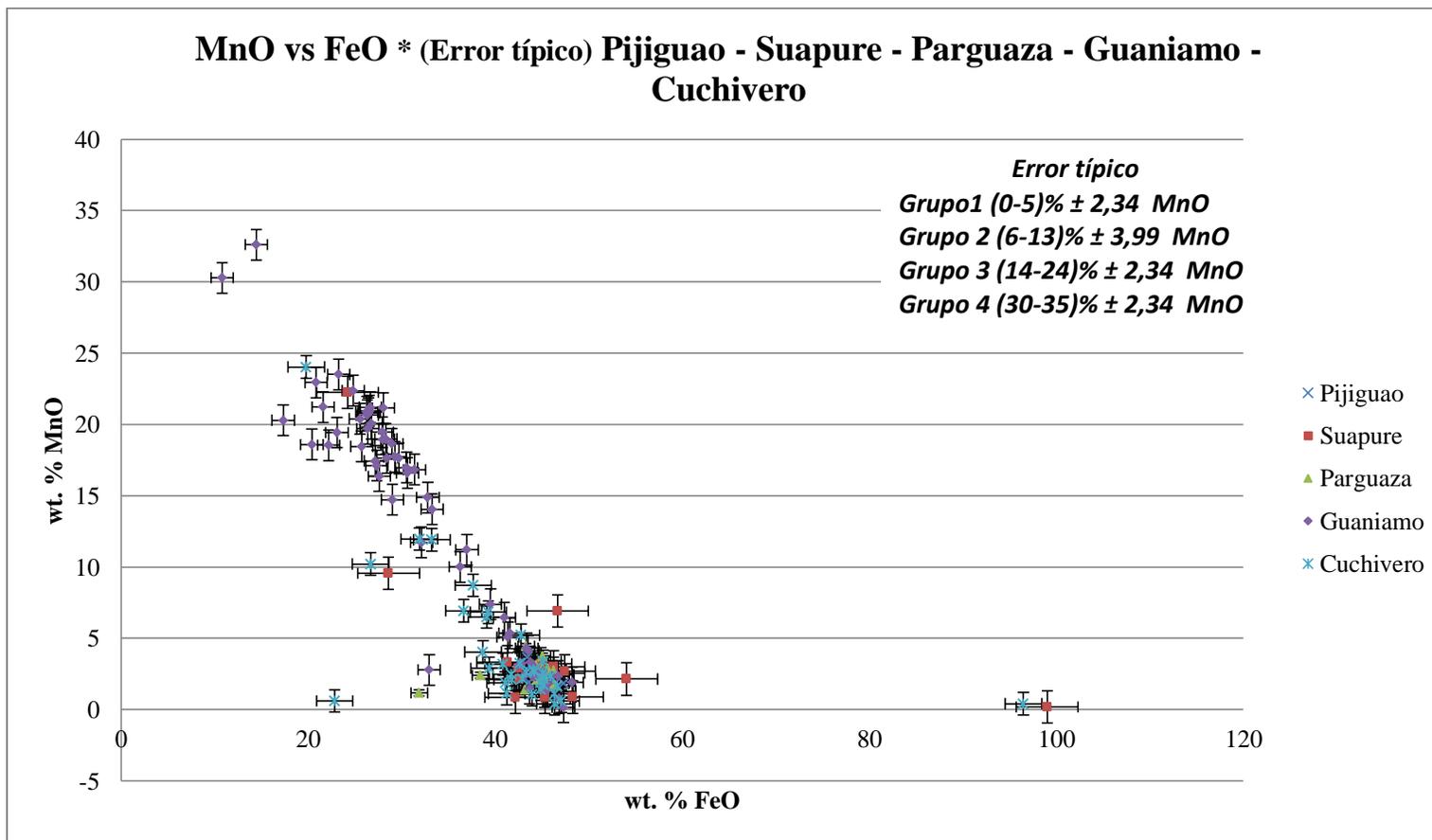
En cambio, en la cuenca de Suapure no hay una tendencia hacia una forma específica en las ilmenitas que establezca una diferencia directa con la química, ya que si bien se observó en los análisis de morfología, prevalecen las ilmenitas discoidales y luego las tabulares ambas poseen la misma composición química.

#### 4.4 Análisis final

Finalmente, el diagrama de FeO\* vs MnO en donde se reflejan todas las cuencas (Figura 81), se puede observar principalmente dos grupos de granos señalados en círculos y otras dos posibles poblaciones señalados en cuadros, los rangos de estas poblaciones se pudieron establecer calculando el error típico de los grupos de granos por cuenca.



**Figura 81:** Diagrama FeO\* vs MnO de todas las cuencas Nor-occidental del estado Bolívar



**Figura 82:** Diagrama FeO\* vs MnO error típico de todas las cuencas Nor-occidental del estado Bolívar. Grupo 1 (0-5)% ± 2,34 de MnO, grupo 2 (6-13)% ± 3,99 de MnO, grupo 3 (14-24)% ± 2,34 de MnO y grupo 4 (30-35)% ± 2,34 de MnO.

Es importante resaltar que los análisis de correlación y los multivariantes, coinciden en la posibilidad de tener mínimo tres grupos de ilmenitas, basados principalmente en la concentración de MnO y de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, por ende, las ilmenitas estudiadas se clasificaron en tres grupos:

1. Una siendo la más común y predominante entre todas las cuencas que corresponderían a las ilmenitas entre (0-5)%  $\pm$  2,34 de MnO (posiblemente de fuente granítica), también existe la posibilidad de que partes de las ilmenitas de Guaniamo que contienen entre (1-6)% MnO sean de la Kimberlita de Guaniamo determinadas por Kaminsky, (2004), ya que estadísticamente se determinó con diagramas de cluster que efectivamente existe un grupo de granos de Guaniamo que tienen las mismas características que las ilmenitas de Kaminsky.
2. Una fuente que posee ilmenitas que contienen concentraciones entre (6-13)%  $\pm$  3,99 de MnO (posible roca alcalina) o posible Kimberlita tipo Seguela del cretácico.
3. Y una tercera fuente con ilmenitas de (14-25)%  $\pm$  2,34 MnO de una posible fuente Carbonatítica. Podría existir una cuarta fuente con ilmenitas que poseen por encima del 30% MnO, sin embargo, no se estudiaron los suficientes granos para definirlos como una posible fuente, aunque es importante realizar un nuevo estudio en la búsqueda de estas ilmenitas ya que estas contenían a su vez de (3 - 5)% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, estas podrían venir de una posible carbonatita.

Los dos últimos grupos se encuentran ubicados en las cabeceras del río Guaniamo y Suapure, a partir de estos datos se propone un área en donde posiblemente se encuentren una posible Carbonatita y Kimberlita.

La zona propuesta fue comparada con un mapa de un informe de avance de CVG TECMIN, realizado en la zona de Guaniamo y Suapure del año 1994 (Figura 83), en este mapa delimitan unas zonas circulares que interpretaron a partir de imágenes de radar. Este mapa se solapó con el mapa de la zona en estudio (Figura 84) y se observó que efectivamente cerca del área propuesta se encuentran dos cuerpos circulares que podrían ser las posibles carbonatitas (Figura 85). Es conveniente

realizar un nuevo trabajo en donde se verifiquen la existencia de estos posibles depositos que podrían ser de gran importancia económica para el país.



Figura 83: Mapa de CVG TECMIN (1994). Cuerpos circulares posibles carbonatitas.

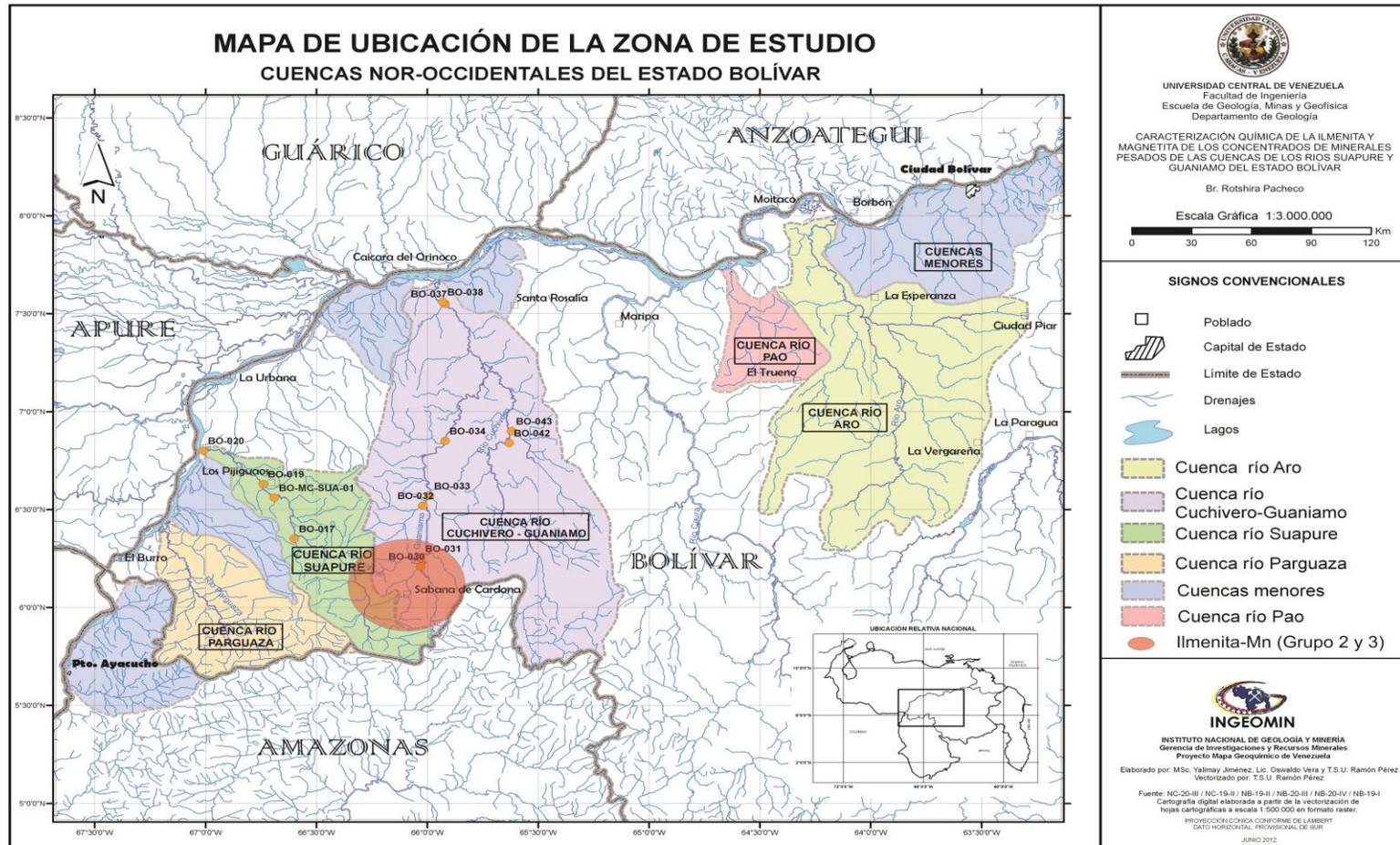
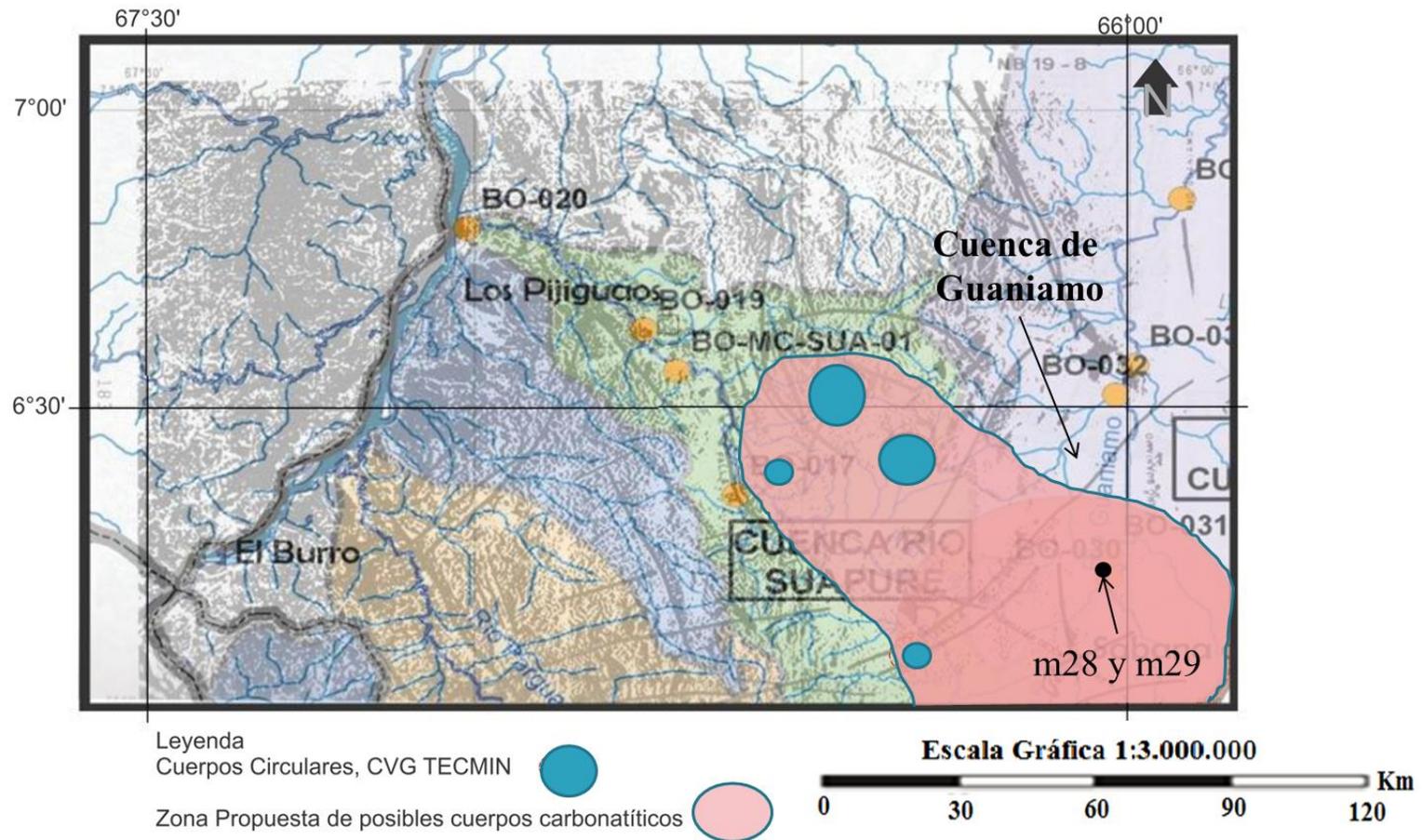


Figura 84: Mapa de Ubicación de las ilmenitas-Mn, Guaniamo.



**Figura 85:** Mapas de Mapa de CVG TECMIN (1994), solapado con el mapa de la zona de estudio. Cuerpos circulares de posibles carbonatitas.

## 5. CONCLUSIONES

- Las cuencas de los ríos Guaniamo y Suapure poseen la misma tendencia morfológica en los granos de ilmenitas, siendo la más frecuente aquellos granos subangulares y poco esféricos.
- La concentración de % MnO y % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, pueden ser utilizados como criterios para la clasificación de las ilmenitas. Ilmenitas (0-6)% de MnO con (0-0,62)% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ilmenitas (10-15)% e ilmenitas con (15-25)% MnO y (0-1,27)% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y por último ilmenitas 30% MnO con (1,5-3,96)% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.
- Los granos (m18\_10; m18\_13; m18, m18\_20; m18\_27), que tienen concentraciones entre (1-6)% MnO posiblemente provengan de la kimberlita de Guaniamo, ya que estadísticamente se correlacionan con las ilmenitas estudiadas por Kaminsky (2004).
- Las ilmenitas que tienen concentraciones entre (0-5)% posiblemente provengan de rocas graníticas. Es posible que estas ilmenitas se comporten químicamente iguales, independientemente de si son de fuentes graníticas volcánicas o plutónicas.
- Las ilmenitas que poseen entre 10-15% de MnO posiblemente provengan de rocas alcalinas o kimberlitas tipo Seguela del cretácico y las que tiene entre 15-25% MnO posiblemente deriven de carbonatitas, ambas se encuentran en el alto Guaniamo.
- Las ilmenitas ricas en Mn se encuentran asociadas a la ulvoespinela, la columbita y la fergusonita-(Y).

- Las ilmenitas provenientes de laterita de Cerro Impacto son ricas en Nb entre (10-16)%  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  y no se asemejan a ningunas de las ilmenitas estudiadas de Guaniamo, Cuchivero o Suapure. Algunas excepciones que se encontraban como exsoluciones en las ilmenitas ricas en Mn del alto Guaniamo.
- Dentro de las magnetitas estudiadas hay tres poblaciones: magnetita con 99%  $\text{FeO}^*$ , ulvoespinela (aproximadamente 70%  $\text{FeO}^*$ ) y magnetita-V.
- Las ulvoespinelas presentan entre (1-7)% de MnO y estas a su vez están relacionadas con las ilmenitas ricas en Mn de Guaniamo. Estas se asocian a rocas alcalinas.
- En un grano de magnetita de la cuenca de Guaniamo se encontró un mineral que no pudo ser identificar de composición Fe-Ni (posible awaruita), Ni=77% y Fe=16%.
- A través del mapa de CVG TECMIN, se pudo ubicar posibles cuerpos circulares que podrían ser cuerpos carbonatíticos en el alto Guaniamo.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Es necesario realizar nuevamente el análisis químico de aquellas muestras que fueron estudiadas en el MEB de la escuela de Metalurgia de esta facultad, bajo las mismas condiciones utilizadas en el MEB de INGEOMIN (indicadas en la metodología), con el fin de obtener más datos químicos con los que se puedan hacer una mejor correlación entre las cuencas de Cuchivero, Guaniamo y Suapure.
- Realizar un estudio directo de ilmenitas que provenga de los Granitos de Guaniamito, Santa Rosalia, San Pedro, Parguaza y Pijiguaos y verificar si estas se comportan químicamente igual, y correlacionarlas con las estudiadas en este trabajo. También de otros tipos de rocas y evaluar su comportamiento químico.
- Realizar un análisis morfológico y químico sobre los mismos granos con el fin de establecer una relación directa entre geometría y composición química de los granos.
- Realizar una salida de campo en la búsqueda de los posibles cuerpos carbonáticos y kimberlíticos de las áreas propuestas en esta investigación.
- Es importante volver a separar magnéticamente las muestras de Guaniamo en la búsqueda de la ilmenita-Mg, descrita por Kaminsky et al. (2004).
- Evaluar químicamente del borde hacia el centro los granos de ilmenitas y determinar como varia el Mg, ya que posiblemente este elemento salga en el proceso de meteorización.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Allialy, M., et al. (2011).** Chromite, Mg-ilmenite and Priderite as indicators minerals of diamondiferous Cretaceous Kimberlites and Lamproites from Cote d'Ivoire (West Africa). *European Journal of Scientific Research*. Vol 48, N°4, pp. 665-693.

**Amelin, Y. & Zaitsev, A. (2002).** Precise geochronology of phoscorites and carbonatites: The critical role of U-series disequilibrium in age interpretations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, pp. 2399-2419.

**Ascanio T., G., (1975).** El Complejo de Imataca en los alrededores del Cerro Bolívar, estado Bolívar, Venezuela. X Congreso Geológico Interguayan, Brasil.

**Bell, K. (1992).** Carbonatites; genesis and evolution. Editorial Unwin Hyman, Londres, Reino Unido.

**Benaim, N. (1974).** Geología de la Región El Dorado-Anacoco-Botanamo, Estado Bolívar. *Conf.Geol.Interguanas.*,1972, MEM Pub.Esp.p. 198-206.

**Boggs, S. (2009).** Petrology of Sedimentary Rocks. University of Oregon. pp. 138-140.

**Briceño, Henry, Tapia, J, Estanga, Y., (1989).** Formación Ichúm, volcanismo ácido del Grupo Roraima. VII Cong.Geol.Venezolano T V., p.52-81.

**Brooks, W., et al. (1995).** Deposit Carbonatite. *Geology and Mineral Resource Assessment of the Venezuelan Guayana Shield*. U.S. Geological Survey and Corporación Venezolana de Guayana, Técnica Minera C.A.

**Channer, D.M., Egorov A., and Kamisnky, F., (2001).** "Geological and Tectonic Setting of the Guaniamo Kimberlite Sheets, South-West Venezuela". En: 8th Int. Kimberlitic Conf., Long Abstract.

**Colvée, P. & Szczerban, E. (2005).** El depósito mineral del Cerro Impacto, estado Bolívar. Revisión, evaluación e importancia económica. Geos, UCV, Caracas, no. 38, pp. 117-118

**Comin, P. & De Barros, C. (2005).** Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Plataform. Sao Paulo – Brasil. pp. 73-89.

**Condie, K. & Sloan, R. (1998)** “Origin and Evolution of Earth: Principles of Historical Geology” Ed. Prentice Hall, New Jersey USA, 498p.

**CVG TECMIN, C. A. (1994).** Informe de Avance NB-19-4 y NB-19-8 Geología Tomo I.

**Deer et al., (1992).** An introduction to the rock forming minerals: 2nd Edition. Pearson Education Limited, pp. 543-547.

**Deer et al., (2011).** Rock-Forming Mineral. Non-Silicates: Oxides, Hydroxides and Sulphides. Vol 5A. 2da Edición. Pp. 96-97

**Del Olo, D. (1988).** Geoquímica de las rocas conglomeráticas y arenáceas de la Formación Uairen (Precámbrico) en la región la Hoyada-Paraitepuy, estado Bolívar, Venezuela. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Caracas.

**Dougan, T.W., (1974).** Cordierite gneisses and associated lithologies of the Guri Area NW Guayana Shield, Venezuela. En: Cont. To Min and Petrol V 46, p. 169-188.

**Elsner, H. (2010).** Heavy Minerals of Economic Importance. BGR. Alemania

**Gamero, A. & Revety, M. (2011).** Estudio geoquímico y mineralógico de minerales pesados en la zona nor-occidental del estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Caracas.

**Gaspar, J. & Wyllie, P. (1983).** Ilmenite (high Mg,Mn,Nb) in the carbonatites from the Jacupiranga Complex, Brazil. *American Mineralogist*, 68, pp. 960-971.

**Gaspar, C. & Wyllie, P. (1983).** (Ilmenite (high Mg, Mn, Nb) in the carbonatites from the Jacupiranga Complex, Brazil). *American Mineralogist*, Vol 68, pp. 960-971.

**Ghosh, S.K., (1985).** “Geology of the Roraima Group and its implications”. En: *Simp Am1,Caracas, 1.981.MEM Pub. Esp. V 10, p. 31-50.*

**Gonzalez, S.R., Araujo, J.F.V., Faria, M.M. (2000).** Regional Geology of the upper Rio Negro River area, Amazon, Brazil. En: *31 Int. Geol.Cong.Brasil*

**González De Juana, C., Arozena, J., & Picard, X., (1980).** Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Tomo I. Ediciones FONINVES Caracas, Venezuela, pp. 31-89.

**Grande, S. (2009).** Tema 7, Yacimientos Magmáticos. Guía de Yacimientos Minerales Metálicos, Depto. Geología, UCV, Caracas, Inédito.

**Greaves, E., et al. (2011).** Depósito de Torio del Impacto. En: *IAEA Meeting “World Thorium Resources”, Thiruvanthapuram, India.*

**Grigsby, J. (1990).** Detrital magnetite as a provenance indicator. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol 60, N°6, pp. 940-951.

**Grigsby, J. (1992).** Chemical fingerprinting in detrital ilmenite: a viable alternative in provenance research?. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol 62, N° 2, pp. 331-337

**Hallsworth, C. & Knox, R. (1999).** BGS Rock Classification Scheme. Volume 3. Classification of sediments and sedimentary rocks. Research Report.

**Harris, P. & Jackson, D. (1966).** Investigations in to the recovery of niobium from the Mrima Hill deposit: transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Londres. V75 p. 95-111

**Heinrich, W. (1966).** Mineralogía y geología de las materias primas radiactivas. Omega. Barcelona. 1966.

**Hess, H. (1959).** Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator. S.G. Frantz Co. Instrument Instruction Booklet, pp. 1-6

**Hulburt, C. & Klein, C. (1991).** Manual de mineralogía de J.D. Dana: Editorial Reverté, Barcelona, España, 362 p.

**Kalliokoski, J. (1965).** Geology of the North-Central Guayana Shield, Venezuela En: Geol.Soc. of America. Bull. V78, p. 1027-1050.

**Kaminsky, F. (2009).** Manganoan ilmenite as kimberlite/diamond indicator mineral. Russian Geology and Geophysics, 50 (2009), pp. 1212–1220

**Kaminsky, et al. (2004)** Neoproterozoic “anomalous” kimberlites of Guaniamo, Venezuela: mica kimberlites of “isotopic transitional” type. Lithos, 76 (2004), pp. 565-590.

**Krumbein, W. & Pettijhon, F. (1938).** Manual of sedimentary petrography, New York, Appleton-Century.

**Mahaney, W. (2002).** Atlas of sand grain surface textures and applications. OXFORD. University Press

**Mange, M. & Wright, D. (2007).** Heavy minerals in use. Elsevier. Amsterdam, Holanda, pp. 282-290.

**Mason, B. (1966).** Principles of Geochemistry. New York, pp 329.

**Melgarejo, J. (2003).** Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. España

**Mendoza, V. (1972).** Geología del Area del Río Suapure, parte Noroccidental del Escudo de Guayana. En: MEM Bol.Geol.Pub.Esp.N 6, p306-336

**Mendoza, V. (1974).** Geología del área del río Suapure, parte noroccidental del Escudo de Guayana, estado Bolívar, Venezuela. IX Conf. Geol. Interguayanas, Ciudad Bolívar, estado Bolívar., pp. 306-338.

**Mendoza V.; Moreno, L., Barrios F., Rivas D., Martínez, J., Lira P., Sardi, G. & Ghosh, S. (1975).** Geología de la parte norte del Territorio Federal Amazonas, Venezuela (informe en progreso). V Cong. Geol. Venezolano, 1, pp. 363-404.

**Mendoza V. et al. (1977)** Evolución Tectónica del Escudo de Guayana. En: 2 Cong. Latinoamericano Geol.Caracas, 1.973. MEM Pub. Esp.N 7, V3,p2237-2270.

**Mendoza, V. (2000).** Evolución Geotectónica y Recursos Minerales del Escudo de Guayana en Venezuela y su relación con el Escudo Sudamericano, Universidad de Oriente. Ciudad Bolívar, Venezuela.

**Mendoza, V. (2005).** Geología de Venezuela. Tomo II Escudo de Guayana.

**Menéndez, V. de, A., (1968).** “Revisión de la estratigrafía de la Provincia Pastora, según el estudio de la Región de Guasipati, Guayana Venezolana”. En: MMH, Bol. Geol. Caracas B 10, N 19, p 309-338

**Menéndez, V. de, A., (1972).** “Geología de la Región de Guasipati, Guayana Venezolana”. En: IV Cong.Geol.Venezolano, MEM Pub.Esp. N 6, p. 49-67.

**Miller, D. & Folk, R. (1955).** Occurrence of detrital magnetite and ilmenite in red sediments: new approach to significance of redbeds. American Association of petroleum Geologists Bulletin 39, pp. 338–345.

**Milovski, V. & Kónonov, V. (1982).** Mineralogía. Editorial Mir Moscú p. 58.

**Montgomery, C.W., (1.976).** Uranium Lead Geochronology of the Archean Imataca series. Venezuelan Guayana Shield. En: Cont to Min and Pet, V. 69, p.167-176.

**Morton, A. & Hallsworth, C. (1999).** Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 124, 3-29

**Nixon, P.H. Davis, G.R., Rex, D.C. y Gray, A., (1992).** Venezuelan kimberlites. En *Jour. Of Volc and Geoth Res* V. 50, p. 101-115.

**Pecora (1956).** Carbonatites: a review. *Bull. Geol. Asoc. America*, 67 (2), pp. 1537-1556.

**Perez, M. (1999).** Caracterización de kimberlitas en los alrededores de la quebrada Grande, municipio Cedeño, estado Bolívar. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar, Escuela de Ciencias de la Tierra.

**Pettijohn, F. (1975).** *Sedimentary Rocks*, 3th edition. New York. Harper y Row.

**Pollard, P. (1989).** Geochemistry of granites associated with tantalum and niobium mineralization. In *lanthanides, Tantalum and Niobium*. Springer, Berlin, pp 68-145.

**Prins, P. (1972).** Composition of magnetite from carbonatites. *Lithos* 5, 227-240.

**Renner, P. & Gibbs, A. (1.987),** "Geochemistry and petrology of metavolcanic rocks of the Early Proterozoic Mazaruni greenstone belt, northern Guyana". En: Pharaoh, T.C. and others, eds. *Geochemistry and mineralization of Proterozoic volcanic rocks: Geol. Soc. Of Longdon, Spec. Pub. 33*, p. 289-309.

**Ríos, J. (1972).** Geología de la Región de Caicara, Estado Bolívar. En: IV Cong. Geol. Venezolano, MEM Pub. Esp. V 5, N3, p.1759-1782.

**Rodríguez, S. (1997).** Ubicación Tectónica de los Cuerpos de Kimberlitas de Bolívar Occidental, Venezuela. *Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano., Soc. Venezolana de Geol.- tomo II.*, pp 335-338.

**Rogers, W. (1996).** A history of the continents in the past three billions years. Jour Geology V 104, p. 91-107.

**Rondón, M. (2007).** Diseño del sistema de recolección y tratamiento de aguas servidas, para las poblaciones de Morichalito y San José de Morichalito, ubicado en el Municipio Cedeño, estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería. Puerto La Cruz, Venezuela.

**Sardi, F. (2003).** Composición química de la betafita, ilmenita, rutilo y rabdofano del yacimiento W-Mo “Badillo”, Angulos, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 58 (3), pp. 383-390

**Sidder, B. & Mendoza, V. (1995).** Geology of Venezuelan Guayana Shield and its relation to the geology of the entire Guayana Shield, en Sidder, B., García, E., y Stoesser, W., eds., Geology and mineral deposits of Venezuelan Guayana Shield: United States Geological Survey, Bull. 2062, p. B1-B45.

**Tassinari, G., Bettencourt, S., Geraldés, C., Macambria, B., y Lafon, M., (2000).** The Amazonian Craton. En: Tectonic Evolution of South America. Brasil. Pub. Esp. 31. Int. Geol. Cong., pp. 41-95.

**Teixeira, W., Tassinari, C.C.G., Szabó, G.L., Mondim, M., Sato K., Santos A.P. Siso C.S. (2000)** “Sm-Nd constrains on protoligh age of the Archean Imataca Complex, Venezuela”. En: II South American Simp., on Isotope Geology, Acta, p. 136-138

**Torres, J. (1984).** Análisis geoquímico de los resistatos pesados de la hoya hidrográfica del río Paragua, estado Bolívar, Venezuela: Trabajo de Grado de Maestría en Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, pp. 136

**Van Houten, F. (1968).** Iron oxides in red beds. Geological Society of America Bulletin 79, pp. 399–416.

**Zingg, Th. (1935).** Beiträge zur Schottenanalyse: Schweiz.Mineral. Petrog. Mitt., 15, 59, pp. 162-164.

## APÉNDICE A

**Tabla 15:** Renombramiento de las muestras y ubicación

Grupo de muestras	Renombramiento de la muestra N° muestra	Nombre original de la muestra	Nombre del río de recolección	Fecha de la recolección	Oeste (W)	Norte (N)
Grupo 1	M1	Bo-050	Río Guaigua	06-Abr-08	64°07'28"	07°34'08"
	M2	Bo-018	Caño La Miel	07-May-07	66°36'07"	06°27'58"
	M3	Bo-007	Caño Colorado	01-May-07	67°01'20"	06°03'01"
	M4	MP-Atabapo Amazonas	-	-	-	-
	M5	Bo-MC-Ori-01 Río Orinoco. Magentico 1.2amp	Río Orinoco	04-May-08	67°08'50"	06°30'52"
	M6	Bo-MC-Ori-01 Río Orinoco. Magnético	Río Orinoco	04-May-08	67°08'50"	06°30'52"
	M7	Bo-051. Pegado al iman 0,8amp	Río Arizo	06-Abr-08	64°06'15"	07°30'15"
	M8	Bo-051-P pegado al imán 0,4 amp	Río Arizo	06-Abr-08	64°06'15"	07°30'15"
	M9	Bo-051-D magnético 0,4 amp	Río Arizo	06-Abr-08	64°06'15"	07°30'15"
	M10	Bo-020 1.2 amp	Río Suapure	25-Abr-07	67°00'45"	06°48'05"
	M11	Bo-020 magnético manual	Río Suapure	25-Abr-07	67°00'45"	06°48'05"
	M12	Bo-020 0,4 amp	Río Suapure	25-Abr-07	67°00'45"	06°48'05"
	M13	Bo-038 magnético manual	Río Cuchivero	13-May-07	65°55'50"	07°33'25"
	M14	Bo-038 pegado electroimán	Río Cuchivero	13-May-07	65°55'50"	07°33'25"
	M15	Bo-063 pegado electroimán 1.2 amp	Río Mapares	07-Abr-08	63°56'27"	07°55'52"
	M16	Bo-063 magnético manual	Río Mapares	07-Abr-08	63°56'27"	07°55'52"
	M17	Bo-063 magnético 1.2 amp	Río Mapares	07-Abr-08	63°56'27"	07°55'52"
	M18	Bo-034 magnético manual	Río Guaníamito	18-May-07	67°06'03"	06°29'51"
	M19	Bo-034 magnético 1.2 amp	Río Guaníamito	18-May-07	67°06'03"	06°29'51"
	M20	Bo-034 pegado del electroimán 1.2 amp	Río Guaníamito	18-May-07	67°06'03"	06°29'51"
	M21	Bo-052 Pegado al iman	Río Carapo	08-Abr-08	64°01'21"	07°28'55"
	M22	Bo-052 magnético manual	Río Carapo	08-Abr-08	64°01'21"	07°28'55"
	M23	Bo-044 Magnético 1.2 amp	Río Uyape	16-May-07	65°41'38"	07°49'57"
	M24	Bo-044 pegado electroimán 1.2 amp	Río Uyape	16-May-07	65°41'38"	07°49'57"
	M25	Bo-044 magnéticos manuales	Río Uyape	16-May-07	65°41'38"	07°49'57"

**Continuación Tabla 1: Renombramiento de las muestras y ubicación**

Grupo de muestras	Renombramiento de la muestra N° muestra	Nombre original de la muestra	Nombre del río de recolección	Fecha de la recolección	Oeste (W)	Norte (N)
Grupo 1	M26	Suapure Mp				
	M27	Bo-029 magnético manual	Río Guaniamo	22-May-07	66°01'40"	06°12'04"
	M28	Bo-029 imán 1.2 amp	Río Guaniamo	22-May-07	66°01'40"	06°12'04"
	M29	Bo-029 pesados	Río Guaniamo	22-May-07	66°01'40"	06°12'04"
	M30	AM-001 magnético 1.2 amp	Río Cataniapo	28-Abr-07	67°35'44"	05°35'47"
	M31	Am-001 pegado al electroimán 1.2	Río Cataniapo	28-Abr-07	67°35'44"	05°35'47"
Grupo 2	M32	Bo-043 Magnético manual	Río Zariapo	15-May-07	65°37'21"	06°54'02"
	M33	Bo-043 magnético 0.4	Río Zariapo	15-May-07	65°37'21"	06°54'02"
	M34	Bo-042 Magnético manual	Río Cuchivero	15-May-07	65°37'53"	06°50'16"
	M35	Bo-042 magnético 0.4	Río Cuchivero	15-May-07	65°37'53"	06°50'16"
	M36	Bo-031 Magnético manual	Río Aguada Aje	22-May-07	66°01'54"	06°14'43"
	M37	Bo-031 magnético 0.4	Río Aguada Aje	22-May-07	66°01'54"	06°14'43"
	M38	Bo-032A Magnético manual	Río Las Nieves	24-May-07	66°00'55"	06°31'20"
	M39	Bo-032A magnético 0.4	Río Las Nieves	24-May-07	66°00'55"	06°31'20"
	M40	Bo-017 Magnético manual	Caño La Peineta	07-May-07	66°35'54"	06°21'14"
	M41	Bo-017 magnético 0.4	Caño La Peineta	07-May-07	66°35'54"	06°21'14"
Grupo 3	CI1	-	Cerro Impacto	1976	-	-
	CI2	-	Cerro Impacto	1976	-	-
	K_1	-	Kimberlita, Brasil	-	-	-
	P_1	-	Pijiguaos	-	-	-
	CI-11	-	Cerro Impacto	1976	-	-

## APÉNDICE B

$$\text{FeO}^* = (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

**Tabla B1.** Composición química ilmenita muestra m1

Muestra 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO <sub>2</sub>	0,31	0,23	0,27	0,31	0,29	0,33	0,16	0,23	0,37	0,01	2,23	0,87	0,52	0,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,35	0	0	0,33	0,07	0,05	0	0,20	0,36	0,07	1,83	0,23	0,22	0,31
TiO <sub>2</sub>	59,93	54,28	49,36	59,98	51,20	54,46	53,77	59,16	55,03	51,69	62,15	60,93	59,16	59,55
FeO*	38,57	44,15	47,18	36,90	44,83	41,19	43,23	38,77	42,22	42,79	33,69	36,97	38,74	37,52
MgO	0,38	0,25	0,12	0,14	0	0,02	0	0,43	0,54	0,21	0,03	0,5	0,51	1,02
MnO	0,46	0,93	1,79	2,26	3,01	3,75	2,01	1,01	1,1	4,48	0,06	0,49	0,77	0,46
CaO	0	0	0,05	0,07	0	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0,09	0,16
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0,17	1,24	0	0,60	0,19	0,83	0,19	0,38	0,75	0	0	0	0

**Tabla B2.** Composición química ilmenita muestra m3

Muestra 3	1	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO <sub>2</sub>	0,23	0,17	0,26	0,11	0,26	0,14	0,31	0,23	0,07	0,24	0,22	0,16	0,07	0,24	0,37	0,29	0,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,00	0,08	0,01	0,07	0,04	0,03	0,05	0,09	0,10	0,03	0,01	0,18	0,10	0,50	0,04	0,03
TiO <sub>2</sub>	49,85	51,17	58,05	51,89	54,22	51,65	49,46	51,76	51,26	51,41	51,11	50,89	52,35	51,33	65,60	51,14	51,77
FeO**	46,22	45,58	38,39	45,07	43,16	46,30	45,04	45,56	45,44	43,29	44,39	46,39	44,49	45,81	31,85	45,02	44,97
MgO	0,06	0,03	0,07	0,05	0,18	0,01	0,06	0,03	0,00	0,02	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	0,12	0,07
MnO	2,72	2,89	2,40	2,89	1,37	1,76	3,74	1,90	2,51	4,43	3,12	1,68	2,09	1,63	1,18	2,76	2,29
CaO	0,04	0,11	0,07	0,03	0,05	0,02	0,05	0,04	0,04	0,29	0,04	0,06	0,08	0,03	0,08	0,01	0,07
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,87	0,38	0,69	0,28	0,68	0,09	1,31	0,42	0,60	0,21	1,01	0,79	0,75	0,87	0,42	0,63	0,54

**Tabla B3.** Composición química ilmenita muestra m11

Muestra 11	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SiO <sub>2</sub>	0,22	0,16	0,3	0,19	0,07	0,13	0,51	0,16	0,16	0,1	0,15	0,21	0,08	0,21	0,26	0,26	0,22	0,18	0,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39	0,04	0,22	0,03	0,01	0,03	0,13	0,05	0,05	0,05	0,17	0,09	0,07	0,14	0,48	0,12	0,34	0,13	0,05
TiO <sub>2</sub>	60,66	50,3	43,24	53,06	52,7	46,1	53,87	51,97	51,97	53,88	52,9	49,38	50,76	49,39	52,06	0,21	54,25	55,64	51,44
FeO*	28,58	46,25	54,03	24,2	44,29	46,67	41,3	45,08	45,08	42,49	45,31	48,28	46,25	47,42	45,31	99,03	42,59	42,17	44,89
MgO	0,09	0,03	0,05	0	0,07	0,06	0,11	0,22	0,22	0,04	0,46	1,06	0,17	0,15	0,57	0,01	0,05	0,89	0,05
MnO	9,56	3	2,14	22,25	2,77	6,92	3,33	2,44	2,44	2,91	0,85	0,88	2,54	2,7	1,29	0,18	2,15	0,86	3,2
CaO	0,05	0	0,04	0	0,02	0,07	0,16	0,14	0,14	0	0,07	0,01	0,03	0	0	0,11	0,05	0,15	0,12
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,44	0,21	0	0,28	0,08	0,14	0,58	0,03	0,03	0,53	0,1	0,09	0,11	0	0,04	0	0,36	0	0,1

**Tabla B4.** Composición química ilmenita muestra m13

Muestra 13	7	8	13	19	20	21	23
SiO <sub>2</sub>	0,14	0,14	6,98	0,14	0,09	0,16	0,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,03	5,34	0,21	0,08	0,07	0,08
TiO <sub>2</sub>	52,28	51,50	52,87	57,34	51,92	51,96	51,33
FeO*	45,19	45,90	22,83	39,35	45,09	47,06	46,36
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00
MnO	2,15	2,34	0,61	2,90	2,59	0,60	0,40
CaO	0,05	0,10	11,37	0,02	0,14	0,05	0,58
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,02	0,00	0,07	0,06	0,11	0,15

**Tabla B5.** Composición química ilmenita muestra m14

Muestra 14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO <sub>2</sub>	0,19	0,14	0,33	0,26	0,30	0,26	0,34	1,84	0,19	0,39	2,88	0,27	0,23	0,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,25	0,09	0,12	0,00	0,11	0,04	0,13	0,20	0,26	2,22	0,05	0,18	1,10
TiO <sub>2</sub>	54,29	55,39	49,98	53,52	57,01	55,00	53,96	54,30	54,84	52,10	57,76	54,85	52,94	0,91
FeO*	43,93	36,62	46,60	39,08	41,23	41,70	42,91	38,68	19,78	45,17	26,67	40,81	39,27	96,48
MgO	0,35	0,28	1,19	0,17	0,24	0,21	0,21	0,31	0,05	0,00	0,05	0,13	0,13	0,11
MnO	1,05	6,93	1,68	6,49	1,12	2,47	2,14	4,04	24,03	1,73	10,21	3,18	6,83	0,41
CaO	0,11	0,06	0,01	0,17	0,08	0,07	0,08	0,41	0,14	0,31	0,09	0,07	0,10	0,13
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,35	0,12	0,21	0,02	0,19	0,31	0,28	0,80	0,05	0,14	0,64	0,33	0,02

**Tabla B5-b.** Continuación composición química ilmenita muestra m14

Muestra 14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29
SiO <sub>2</sub>	0,12	0,14	0,17	0,22	0,30	0,25	0,21	0,30	0,28	0,25	0,10	0,29	1,41	0,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	0,26	0,11	0,21	0,03	0,00	0,11	0,12	0,02	0,09	0,15	0,06	0,07	0,08
TiO <sub>2</sub>	52,57	52,32	52,75	55,39	51,47	53,26	54,24	53,20	54,10	51,62	52,87	52,48	55,17	50,72
FeO*	42,64	44,20	37,63	41,77	42,77	44,84	31,88	43,36	33,21	46,36	44,83	44,11	41,07	45,09
MgO	0,21	0,32	0,10	0,19	0,19	0,03	0,11	0,22	0,12	0,53	0,18	0,12	0,10	0,51
MnO	3,25	2,67	8,71	2,10	5,21	1,41	11,95	2,61	11,91	1,11	1,86	2,79	1,87	3,37
CaO	0,00	0,03	0,00	0,07	0,03	0,10	0,13	0,15	0,23	0,03	0,03	0,00	0,16	0,05
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,06	0,52	0,06	0,00	0,12	1,36	0,06	0,12	0,00	0,00	0,03	0,15	0,03

**Tabla B6.** Composición química ilmenita muestra m18

Muestra 18	1	2	3	4	5	6	8	10	11	12	13	14	20	22	27	28	30
SiO <sub>2</sub>	0,26	0,21	0,29	0,21	0,21	0,20	0,16	0,06	0,19	0,26	0,22	0,34	0,29	0,32	0,18	0,17	0,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,00	0,12	0,01	0,09	0,36	0,10	0,06	0,00	0,04	0,08	0,09	0,00	0,11	0,04	0,05	0,07
TiO <sub>2</sub>	52,45	52,32	51,26	52,20	53,36	52,22	51,90	50,88	49,24	53,20	50,25	54,15	51,75	51,33	51,95	51,52	52,15
FeO*	44,33	44,50	43,18	44,66	42,80	45,57	43,36	46,06	48,21	43,99	46,72	43,66	45,66	44,26	46,81	45,13	43,78
MgO	0,26	0,16	1,68	0,12	0,09	0,40	0,02	0,17	0,16	0,14	0,17	0,14	0,30	0,07	0,13	0,18	0,39
MnO	2,33	2,59	2,40	2,50	3,22	1,34	4,29	2,35	1,90	2,33	2,34	1,45	1,82	2,93	0,79	2,70	3,34
CaO	0,08	0,19	1,08	0,23	0,14	0,09	0,07	0,08	0,19	0,02	0,16	0,18	0,12	0,07	0,09	0,11	0,09
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	0,02	0,00	0,08	0,09	0,09	0,10	0,33	0,07	0,01	0,08	0,00	0,06	0,93	0,04	0,14	0,09

**Tabla B7.** Composición química ilmenita muestra m28

Muestra 28	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	16	17	18	19	26	32	33	34	35	36
SiO <sub>2</sub>	0,20	0,13	0,22	0,18	0,15	0,29	0,19	0,18	0,19	0,10	0,09	0,25	0,4	0,36	0,52	0,39	0,11	0,24	0,34	0,26	0,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09	0,02	0,00	0,00	0,01	0,14	0,19	0,07	0,03	0,05	0,00	0	0,4	0,11	0,38	0,06	0,00	0,19	0,05	0,02	0,2
TiO <sub>2</sub>	52,11	51,87	49,50	51,48	49,20	49,13	54,98	52,26	52,17	52,50	52,45	51,54	55,42	50,97	57,4	51,14	52,05	55,58	57,31	52,01	51,74
FeO*	20,84	26,34	27,35	26,37	28,94	28,03	27,59	26,75	26,46	28,42	41,57	32,78	23,07	36,97	20,38	27,92	29,27	32,10	10,8	29,71	43,52
MgO	0,18	0,05	0,13	0,06	0,07	0,02	0,11	0,08	0,02	0,03	0,26	0,23	0,08	0,04	0,18	0	0,00	0,04	0,12	0,11	0,05
MnO	22,94	18,87	17,11	19,70	18,64	21,15	16,57	20,06	20,81	17,64	5,35	14,88	19,43	11,2	18,59	19,46	17,72	11,72	30,28	17,63	4,12
CaO	0,04	0,04	0,11	0,04	0,06	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,48	0,19	1,13	0,15	0	0	0	0	0
ZnO	3,37	2,03	2,42	1,66	2,02	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,69	3,17	0,51	0,57	1,17	0,51	0,69	0,34	0,77	0,35	0,33	0,71	0,16	0,42	0,89	0,85	0,12	1,11	0,25	0,08

**Tabla B8.** Composición química ilmenita muestra m29

Muestra 29	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14
SiO <sub>2</sub>	0,21	0,12	0,41	0,37	0,16	0,15	0,34	1,91	0,17	0,19	0,29	0,18	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,02	0,09	0,24	0,06	0,09	0,38	1,18	0,08	0,12	0,39	0,07	0,09
TiO <sub>2</sub>	51,83	51,42	56,21	53,17	53,78	51,65	60,67	48,31	52,13	58,12	58,96	51,97	52,45
FeO*	30,61	14,44	21,60	42,54	27,19	28,31	17,32	47,29	40,99	22,17	32,94	26,31	36,23
MgO	0,10	0,12	0,04	0,20	0,05	0,02	0,04	0,3	0,07	0,07	0,16	0,04	0,12
MnO	16,60	32,61	21,22	3,12	17,43	18,99	20,29	0,15	6,46	18,55	2,78	20,65	10,01
CaO	0,60	0,06	0,32	0,27	0,00	0,08	0,17	0,85	0,02	0,02	4,35	0,04	0,41
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	1,22	0,10	0,09	1,33	0,53	0,79	0	0,09	0,75	0,13	0,76	0,17

**Tabla B8-b.** Composición química ilmenita muestra m29

Muestra 29	15	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29
SiO <sub>2</sub>	0,17	0,19	0,17	0,12	0,22	0,26	0,18	0,10	0,22	0,24	0,17	0,20	0,14	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,03	0,10	0,12	0,00	0,05	0,04	0,03	0,08	0,15	0,12	0,05	0,00	0,08
TiO <sub>2</sub>	51,28	52,09	51,98	53,11	52,96	54,80	51,40	52,59	51,50	54,90	51,63	51,63	50,95	51,58
FeO*	26,62	33,23	28,00	41,37	25,54	25,71	30,52	23,25	26,52	29,01	39,49	26,28	31,37	24,82
MgO	0,10	0,10	0,15	0,16	0,07	0,09	0,08	0,04	0,05	0,18	0,05	0,05	0,07	0,04
MnO	21,21	14,05	18,95	5,08	20,39	18,46	16,97	23,50	20,96	14,72	7,39	20,88	16,83	22,37
CaO	0,07	0,11	0,08	0,01	0,03	0,16	0,01	0,01	0,12	0,07	0,13	0,07	0,13	0,17
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,53	0,18	0,57	0,05	0,78	0,47	0,81	0,48	0,54	0,72	1,04	0,84	0,52	0,74

**Tabla B9.** Composición química ilmenita muestra m31

Muestra 31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SiO <sub>2</sub>	0,28	0,16	0,17	0,14	0,24	0,63	0,26	0,14	0,11	0,14	0,24	0,33	0,46	0,18	0,26	0,25	0,24	0,25	0,17	0,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,42	0,15	0,07	0,29	0,21	2,64	0,12	0,02	0,07	0,28	0,13	0,70	0,77	0,63	0,06	0,20	0,08	0,07	0,03	0,18
TiO <sub>2</sub>	61,60	54,10	55,58	56,46	58,36	78,62	52,38	51,14	51,67	57,28	51,83	59,55	69,26	64,43	50,04	51,79	51,05	54,57	58,67	57,71
FeO*	33,68	42,28	39,63	40,25	37,71	16,97	43,05	44,52	44,78	37,88	43,69	35,34	26,04	32,28	44,42	42,14	43,78	41,30	38,08	38,96
MgO	0,03	0,15	0,05	0,12	0,12	0,06	0,03	0,11	0,07	0,09	0,08	0,02	0,06	0,10	0,08	0,11	0,04	0,09	0,09	0,02
MnO	2,67	2,87	3,53	2,53	2,77	0,42	2,99	3,17	2,93	3,79	3,06	3,46	2,34	1,90	3,80	4,23	3,72	3,12	2,47	2,52
CaO	0,16	0,04	0,09	0,01	0,09	0,20	0,06	0,04	0,00	0,07	0	0,07	0,04	0	0,03	0,03	0,01	0	0,07	0,03
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,18	0,25	0,89	0,20	0,49	0,47	1,12	0,86	0,36	0,47	0,95	0,56	1,04	0,49	1,31	1,24	1,09	0,60	0,42	0,34

**Tabla B10.** Composición química ilmenita muestra P\_1

Muestra P_1	1	2	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	0,47	0,38	0,17	0,27	0,18	0,18	0,02	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0	0,11	0	0	0,08	0	0,13
TiO <sub>2</sub>	52,51	50,3	50,14	50,11	51,52	52,84	51,84	50,88
FeO*	43,6	46,6	45,13	47,34	44,54	43,39	43,46	45,1
MgO	0,18	0	0	0	0	0,23	0	0,1
MnO	1,91	1,6	3,32	1,83	3,14	2,85	3,66	3,03
CaO	0,11	0	0	0,14	0	0	0	0,14
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,18	1,12	1,14	0,31	0,63	0,44	1,02	0,6

**Tabla B11.** Composición química ilmenita muestra K\_1

Muestra K_1	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	0,24	0,16	0,17	0,28	0,12	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,03	0,7	0,52	0,35	0,74	0,58
TiO <sub>2</sub>	51,11	52,72	54,03	53,29	52,2	52,17
FeO*	36,81	34,12	33,67	32	36,38	37,9
MgO	10,62	11,7	11	12,95	10,1	9,12
MnO	0	0,5	0,41	0,83	0,38	0
CaO	0,14	0,11	0,18	0,1	0	0
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0	0,02	0,21	0,09	0,23

**Tabla B12.** Composición química ilmenita muestra mCI1

Muestra CI1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	0,42	1,56	0,52	2,22	1,04	0,37	0,48	0,55	0,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	1,33	0,01	0,22	0,52	0,23	0,12	0,12	0,11
TiO <sub>2</sub>	76,61	52,75	78,63	70,02	58,03	82,53	75,87	80,98	78,07
FeO*	8,45	33,4	5,19	11,47	27,13	3,69	6,24	4,21	5,58
MgO	0,08	0,05	0,05	0	0,15	0,14	0,12	0,09	0
MnO	0	0,31	0	0,45	0	0,07	0,09	0	0
CaO	0,14	0,03	0,23	0,29	0,18	0,18	0,03	0	0,04
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	14,08	10,57	15,37	15,34	12,95	12,8	17,04	14,06	15,79

**Tabla B13.** Composición química ilmenita muestra CI2

Muestra CI2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO <sub>2</sub>	0,26	0,88	1,23	1,39	2,6	1,29	2,89	2,33	1,7	0,68	1,14	3,66	1,18	0,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,39	0,96	0,67	1,08	1,04	0,7	1,55	0,3	0,15	0,69	0,7	0,83	0,33
TiO <sub>2</sub>	76,63	63,14	59,01	58,18	45,61	65,46	47,15	48,65	64,62	74,81	58,38	36,8	65,17	70,2
FeO*	5,65	20,22	25,65	27,6	41,49	19,11	40,68	37,27	21,63	9,74	24,11	52,65	22,14	14,82
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0,01	0,23	0	0	0,3	0	0,01	0	0,29	0	0,55	0	0,11	0,18
CaO	0,06	0	0,2	0	0,12	0	0,12	0,09	0,31	0,22	0,16	0	0,15	0,32
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17,34	15,14	12,95	12,16	8,81	13,09	8,45	10,12	11,15	14,41	14,96	6,18	10,41	13,18

**Tabla B14.** Composición química Magnetita muestra m13

M13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO <sub>2</sub>	0,63	0,10	0,22	0,63	1,37	0,38	0,15	0,09	0,09	0,28	0,33	0,77	0,38	1,01	0,33	1,07	0,16	0,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	0,19	0,11	0,63	0,40	0,21	0,09	0,20	0,08	0,40	0,26	0,26	0,12	0,03	0,12	1,55	0,12	0,94
TiO <sub>2</sub>	0,07	0,07	0	0,2	0	0,09	0,00	0,05	0,21	0,00	0,52	0,07	0,12	0	0,09	0,99	4,22	0,8
FeO*	98,63	99,53	99,49	98,39	93,84	98,78	99,60	99,37	99,21	99,10	98,72	97,75	99,11	98,74	98,92	96,35	93,7	96,56
MgO	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0,07	0,06	0,12	0	0,65	0,39	0,11	0,12	0,28	0,22	0	0,04	0,13	0,17	0,09	0	0	0,48
CaO	0,27	0,00	0,03	0,08	0,74	0,16	0,06	0,02	0,05	0	0	0,77	0,08	0,07	0,47	0,03	0	0,25
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13	0,05	0,06	0,07	0	0	0,00	0,18	0,09	0	0,17	0,02	0,08		0	0	0,11	0,03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,69	0

**Tabla B15.** Composición química Magnetita muestra m11

m11	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	0,92	6,64	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,28	5,97	0,12
TiO <sub>2</sub>	0,12	2,83	0,21
FeO*	98,04	77,85	99,03
MgO	0,15	6,41	0,01
MnO	0,38	0,3	0,18
CaO	0,08	0	0,11
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0,1

**Tabla B16.** Composición química Magnetita muestra m18

m18	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	0,35	0,29	0,06	0,20	0,27	0,23	0,32	0,34	0,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,14	0,12	0,06	0,38	0,11	0,25	0,37	0,10
TiO <sub>2</sub>	3,61	5,91	3,86	1,62	0,08	4,94	0,44	0,10	2,64
FeO*	95,38	92,75	94,06	96,71	97,36	92,95	97,05	96,04	96,68
MgO	0	0,06	0,10	0,03	0	0,10	0,17	0,08	0,04
MnO	0,14	0,37	0,24	0	0,14	0,27	0,17	0,51	0,25
CaO	0,49	0,23	0,11	0,01	0,16	0,01	0,16	0,09	0,04
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0,27	0,11	0,07	0	0,05	0,17	0	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	1,39	1,31	1,61	1,34	1,29	2,49	0

**Continuación Tabla B16.** Composición química Magnetita muestra m18

m18	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO <sub>2</sub>	0,13	0,33	0,2	1,17	0,16	0,3	0,56	0,45	0,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29	0	0,15	0,39	0,17	0,11	0	0,42	1,99
TiO <sub>2</sub>	0,26	25,31	17,02	5,58	0,88	1,81	29,21	2,07	10,3
FeO*	97,99	71,66	81,98	90,96	97,64	97,37	68,21	93,48	81,97
MgO	0,04	0,14	0,2	0,16	0,09	0,14	0	0	0,76
MnO	0	1,46	0,19	0,03	0,08	0	1,91	0,67	0,71
CaO	0,06	0,93	0,1	0,52	0	0	0,1	0,29	0,61
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,16	0,15	0,04	0	0,29	0	0	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,19	0	0	1,15	0,98	0	0	2,62	2,77

**Tabla B17.** Composición química Magnetita muestra m28 y m29

m28				m29		
SiO <sub>2</sub>	0,2	0,27	0,09	SiO <sub>2</sub>	0,12	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,16	0,01	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18	0,15
TiO <sub>2</sub>	11,82	20,32	11,94	TiO <sub>2</sub>	5,12	6,36
FeO*	82,36	70,92	85,44	FeO*	94,19	92,58
MgO	0,13	0	0	MgO	0,07	0
MnO	2,62	7,09	2,24	MnO	0	0,28
CaO	0,14	0,03	0,27	CaO	0	0,19
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,65	1,19		Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,32	0,18

**Tabla B18.** Composición química exsoluciones Magnetita muestra m28 y m29

Exsoluciones M28 y m29												
0,29	0,23	0,15	0,19	0,28	0,12	0,1	0,15	0,24	0,17	0,28	0,26	0,17
0,02	0,1	0	0,07	0	0,18	0,03	0	0,17	0,12	0,26	0,09	0,09
18,36	9,43	19,33	9,92	19,96	5,12	16,26	20,4	8,02	28,01	10,7	8,35	13,83
77,09	87,43	72,33	87,31	74,07	94,19	79,69	74,4	89,84	60,54	85,56	90,28	82,86
0,14	0,13	0	0	0,14	0,07	0	0	0,27	0,13	0,14	0,03	0,01
3,78	2,24	7,99	1,29	5,07	0	3,71	5,03	1,32	9,52	2,24	0,62	2,45
0	0	0,06	0,7	0	0	0,05	0,02	0	0	0,14	0,07	0
0,33	0,44	0,13	0,53	0,49	0,32	0,16	0	0,14	1,53	0,69	0,3	0,58

**Tabla B19.** Composición química exsoluciones, inclusiones

<b>m18</b>	<b>Barita</b>	<b>m14</b>	<b>Rutilo-nb</b>
SO <sub>3</sub>	29,99	TiO <sub>2</sub>	63,04
BaO	55,07	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	17,6
		FeO*	9,54
	<b>Cromita</b>		<b>Columbita</b>
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90,93	TiO <sub>2</sub>	39,98
TiO <sub>2</sub>	5,32	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	26,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,42	FeO*	14,31
		MnO	18,25
	<b>Pirita</b>		<b>Casiterita</b>
<u>SO<sub>3</sub></u>	41,83	SnO <sub>2</sub>	67,96
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47,9	TiO <sub>2</sub>	22,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,1	FeO*	7,46
			<b>Fergusonita</b>
		TiO <sub>2</sub>	34,54
		Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	19,8
		FeO*	19,56
		MnO	3,64
		Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,09
		Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,09
		Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,73
			<b>Sin identificar</b>
		ZnO	28,34
		CuO	50,73

**Cerro Impacto**

TiO <sub>2</sub>	61,19
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	25,57
FeO*	61,19

**Continuación Tabla B19.** Composición química exsoluciones, inclusiones

<b>m28 y m29</b>		<b>m11</b>	<b>Baddeleyita</b>
TiO <sub>2</sub>	45,26	ZrO <sub>2</sub>	59,93
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15,99	TiO <sub>2</sub>	19,17
FeO*	10,32	FeO*	16,71
MnO	26,41	MnO	1,08
	<b>Manganocolumbita</b>		zircon
TiO <sub>2</sub>	8,34	ZrO <sub>2</sub>	61,06
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	67,44	SiO <sub>2</sub>	27,63
FeO*	6,66		<b>Alumino Silicato</b>
MnO	12,47	SiO <sub>2</sub>	39,83
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,44	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,33
	<b>Molibdenita-Wolframita</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,85
TiO <sub>2</sub>	42,65	CaO	11,33
FeO*	33,58		<b>Fergusonita</b>
MnO	2,56	TiO <sub>2</sub>	15,45
CaO	2,75	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	38,52
WO <sub>3</sub>	10,15	FeO*	11,76
MoO <sub>3</sub>	4,11	MnO	3,64
	<b>Perovskita</b>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,94
TiO <sub>2</sub>	34,08	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,17
FeO*	19,34	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0
CaO	34,4		
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,63		
	<b>Torita</b>		
ThO <sub>2</sub>	85,6		
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,32		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,32		
CaO	1,8		

## APÉNDICE C

**Tabla C1.** Composición de la ilmenita Grigsby, (1992)

Tipo de roca	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Volcánica Félsica	47,62	0,04	0,46	0	0	0	7,21	35,84	8,59
	48,12	0,26	0,61	0	0,01	0	2,99	40,65	6,39
	47,28	0,68	0,24	0	0,35	0,27	1,65	41,82	7,34
Plutónica Félsica	46,21	0,34	0,37	0	0,01	0,1	3,57	38,18	9,86
	47,85	0,31	0,37	0,05	0,58	0,04	1,63	40,63	9,33
Volcánica intermedia	50,16	0,32	0,41	0	0,36	0	0,82	43,92	3,48
	44,44	0,21	0,66	0,03	2,94	0	0,45	34,74	16,8
Volcánica Máficas	49,86	0,37	0,64	0,03	0,79	0,07	0	43,89	4,05
	49,42	0,29	0,48	0	1,77	0,06	0	41,62	5,91
Plutónica Máficas	49,23	0,62	0,27	0,17	1,2	0,04	0,44	41,95	5,23
	49,29	0,35	0,49	0,04	1,28	0,04	0,28	41,99	5,83
	50,78	0,17	0,27	0	1,25	0,08	0,52	43,1	3,26
	49,56	0,55	0,39	0	1,51	0,15	0,53	41,61	5,13

**Tabla C2.** Composición de la ilmenita del río Paragua, Bolívar Torres (1984)

Río	Zona	Ti	Mn	Fe	Zr	Nb
Paragua	A	33,3	1,50	33,4	3,55	0,044
	B	31,4	1,25	31,8	0,86	0,021
	C	34,6	1,09	28,4	0,96	0,044
Afluente R. Carún	C <sub>1</sub>	29,7	2,89	24,8	1,45	0,136

**Tabla C3.** Composición química de ilmenita Kaminsky, F., et al. (2004)

	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>ZnO</b>	<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>
<b>Bulla de las Mujeres</b>	50,07	0,42	5,25	31,02	0,27	11,89	0,02	0,5
<b>Candado-Julio</b>	54,51	0,04	0	50,3	1,01	1,39	0,11	0,14
	50,55	0,06	0,03	45,76	2,24	0,05	0	0
	54,04	0,11	0,02	39,67	2,03	0,11	0,05	0
	50,58	0	0,05	46,77	2,33	0	0,04	0
	50,76	0	0,03	47,28	0,82	0,28	0	0
	54,02	0,09	0,03	41,25	2,18	0,16	0,01	0
<b>La Ceniza</b>	43,5	0,11	0,1	55,25	0,1	1,01	0	0
	48,62	0	0	47,67	1,95	0,06	0	0
	48,39	0,04	0	47,57	2,55	0,09	0	0
	50,2	0	0,02	47,27	0,73	0,35	0	0
<b>Los Indios</b>	51,35	0,19	0	46,14	1,82	0,27	0	0
	53,77	0,08	0	40,84	1,43	4,17	0	0
	53,26	0,13	0,05	37,87	1,46	6,28	0	0
	50,03	0,17	0,03	44,43	1,64	1,02	0	0
	53,41	0,25	0	35,29	1,14	8,72	0	0
	54,04	0,21	0	31,63	1,03	11,97	0	0
	56,96	0,29	0,9	27,68	0,29	13,79	0	0
	50,96	0,07	0	46,45	1,6	0	0,07	0,16
	51,81	0,03	0,01	46,41	1,23	0,09	0,11	0,05
	51,24	0,03	0,03	46,7	0,97	0,14	0,08	0,16

**Tabla C4. Composición de la ilmenita de Jacupiranga, Brasil Gaspar & Wyllie (1983)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>TiO<sub>2</sub></b>	58,2	56,6	58,8	49,1	52,1	52,4	51,7	55,2	57,7	55,4	58,1	51,6
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0	0	0,02	0,03	0	0,02	0,5	0	0	0,03	0	0,11
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0	0,03	0,02	0,02	0,02	0,14	0,03
<b>Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0	0,07	0	0	0,01	0,05	0,05	1,21	0,06	0,07	0,01	0,41
<b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,14	0,37	0,21	0	0,42	0,71	0,32	0,96	1,88	3,36	0,4	3,27
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0	0,02	0	0	nd	nd	0,08	nd	0	0	0	0
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	7,51	6,55	6,23	6,55	4,79	3,83	5,11	6,87	9,42	9,9	9,74	0,16
<b>FeO</b>	9,77	14,7	10,7	38,6	33,6	33,9	33,6	9,12	5,1	4,31	3,66	21,1
<b>MnO</b>	3,16	4,9	2,24	2,09	2,07	2,19	2,26	7,18	3,41	2,93	2,78	19,6
<b>MgO</b>	21,5	16,8	22,4	1,9	6,28	5,99	6,22	19	24,6	24,6	25,8	3,49
<b>CaO</b>	0,78	1,05	0	0,12	0,02	0,33	0,11	0,04	0,02	0	0,01	0,16

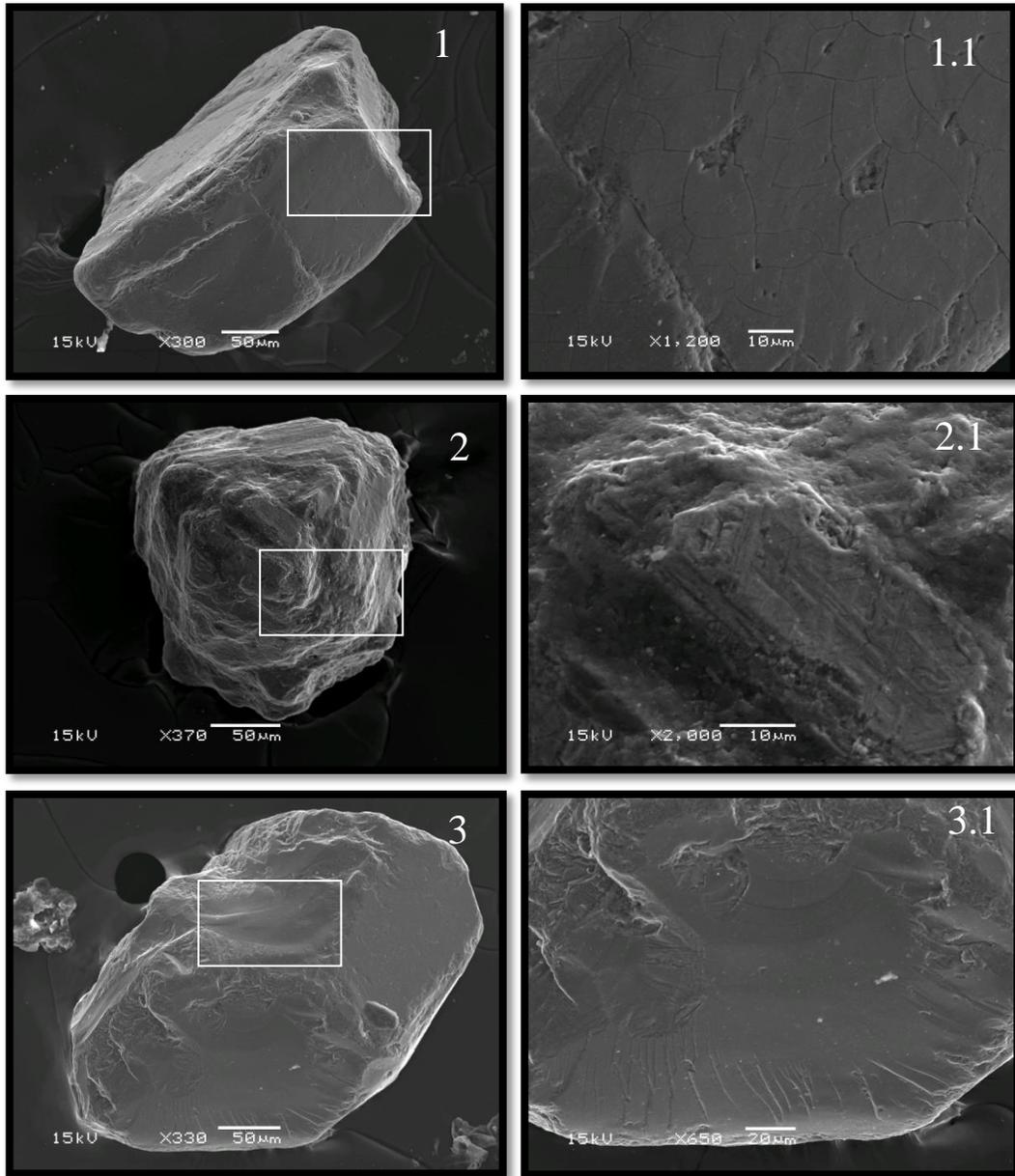
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<b>TiO<sub>2</sub></b>	53,8	50,9	52,1	54,8	52,9	54,5	54,9	54,6	55,4	54,7	54,2	55
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,07	1,18	0,29	0,03	0	0,06	0,03	0,05	0,04	0,15	0,02	0,02
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,01	0,01	0,01	0,02	0	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,04	0
<b>Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,07	0,16	0,35	0,34	0,57	0,01	0,02	0,14	0,04	0,03	0,03	0
<b>Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,13	2,32	3,14	3,04	2,1	0,43	0,32	0,81	0,53	0,77	0,79	0
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	0	nd	nd	nd	nd	nd	0	nd
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0	1,28	0	0,32	0	1,76	2,24	3,83	3,03	3,19	5,27	6,71
<b>FeO</b>	22,3	19,7	20,6	16,2	20,4	28,5	27,2	24,2	24,6	25,2	24,9	22,6
<b>MnO</b>	17,8	17,9	16,6	15,1	16,6	3,34	2,75	3,92	3,46	3,69	3,88	1,61
<b>MgO</b>	3,97	5,5	4,92	10,3	5,76	9,81	10,8	11,7	12,3	11,6	10,7	14,2
<b>CaO</b>	0,04	0,16	0,33	0,16	0,32	0,08	0,1	0,22	0	0,08	0,88	0,01

1,2,3 C<sub>1</sub> Inclusiones  
 4, RC1, S2, lamelas  
 5,6 Rc1, S3 bordes, granos discretos  
 7 RC1, S4 lamela  
 8, C3estructura laminar con pirita, incluido en la magnetita  
 9,10, RC3 granos internos  
 11, RC3, lamela  
 12, 13, 14,15, C4 granos discrtos  
 16, 17, C4 nucleo y borde respectivamente en granos discretos  
 18,19,20,21 Rc5 lamelas  
 22, Rc5 grano interno en lamela de magnetita  
 23, B grano discreto en beforisita emplazado en el contacto C2 y C3  
 24-J lamela en titanomagnetita cercano a Jacupirangita intrusión C1  
 Nd- no determinado, Cr2O3 presente como traza

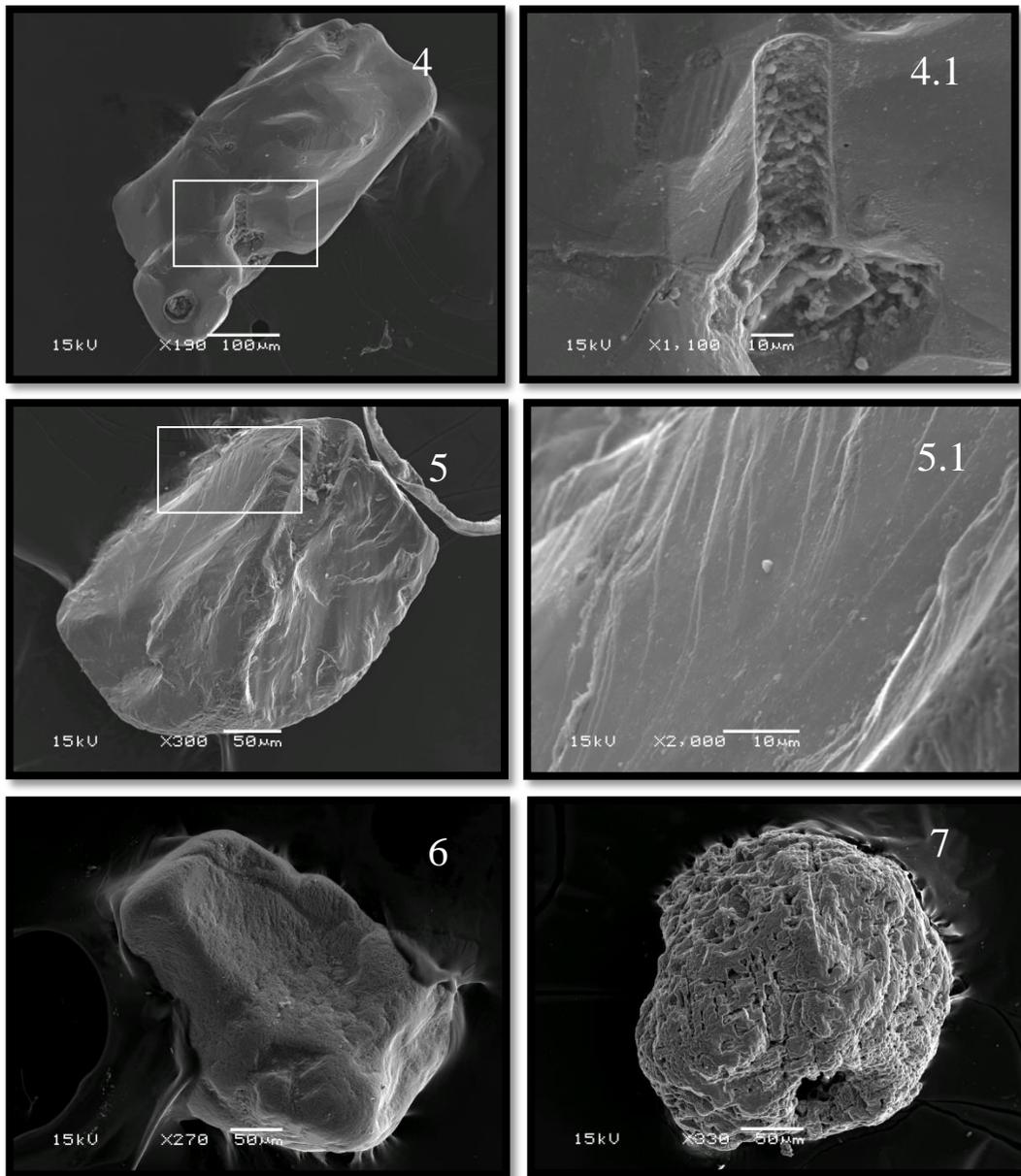
**Tabla C5.** Composición de la ilmenita del Cerro siete Cabezas, Paraguay Comin & de Barros (2005)

<b>Granos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,01	0	0	0	0,1
<b>TiO<sub>2</sub></b>	50,02	50,3	50,21	49,98	49,32	50,1	50,06	50,92	51,34	50,12
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,01	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,1	0,05
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0	0	0,02
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,49	2,03	2,91	3,24	3,9	2,73	1,96	2,38	1,73	3,76
<b>FeO</b>	33,75	34,17	34,84	31,88	30,26	33,39	33,77	36,19	34,66	33,81
<b>MnO</b>	10,98	10,79	9,91	12,74	13,87	11,4	11,07	9,36	11,36	11,12
<b>MgO</b>	0,06	0,08	0,01	0,09	0,03	0,05	0,01	0,06	0	0,04
<b>CaO</b>	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0	0,04

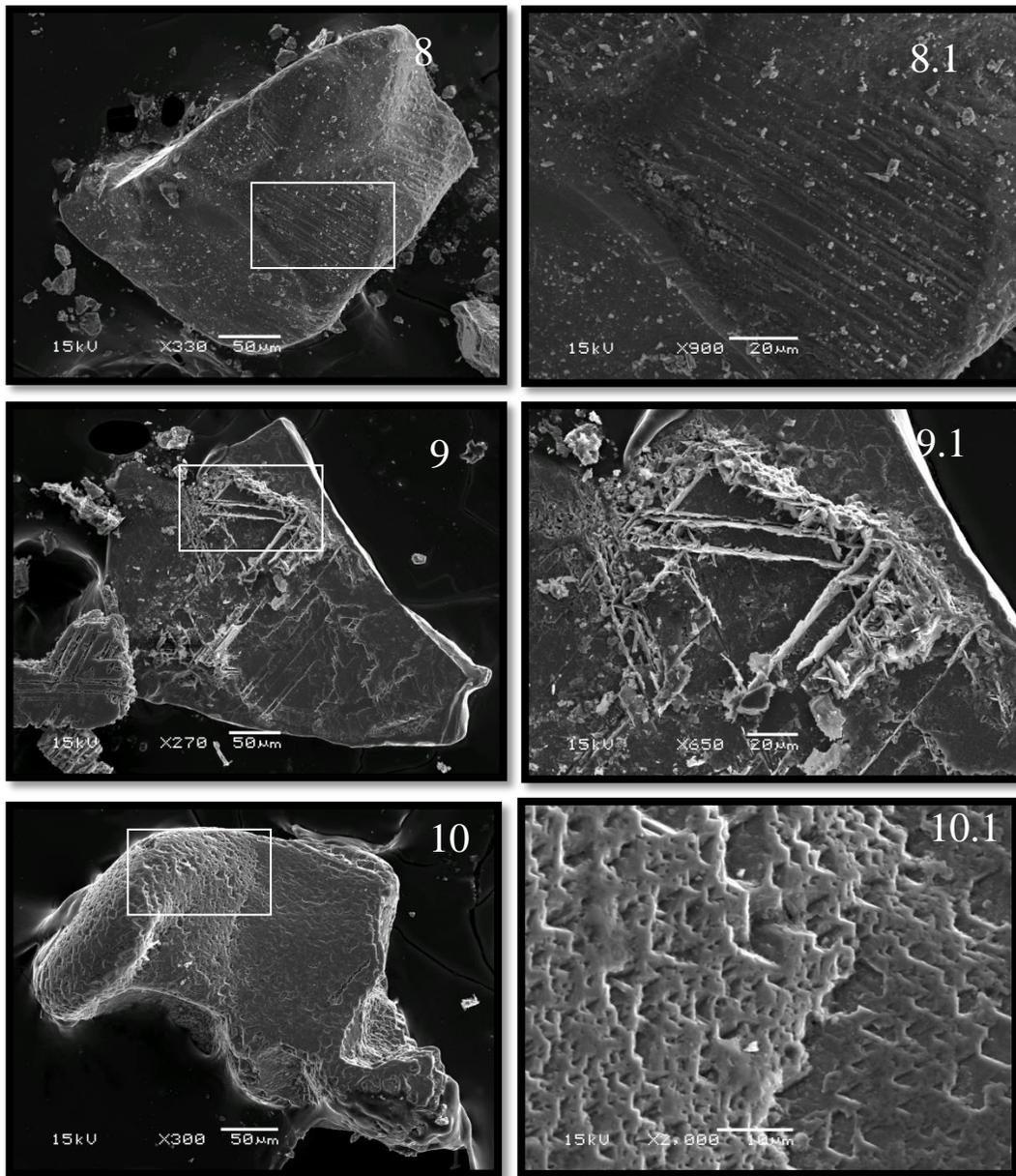
### APÉNDICE D (Microtexturas Morfológicas)



- 1) *Ilmenita con fracturación;*
- 2) *Magnetita con vestigios de textura de enrejado;*
- 3) *Fracturas radiales y concoideas en grano de ilmenita.*



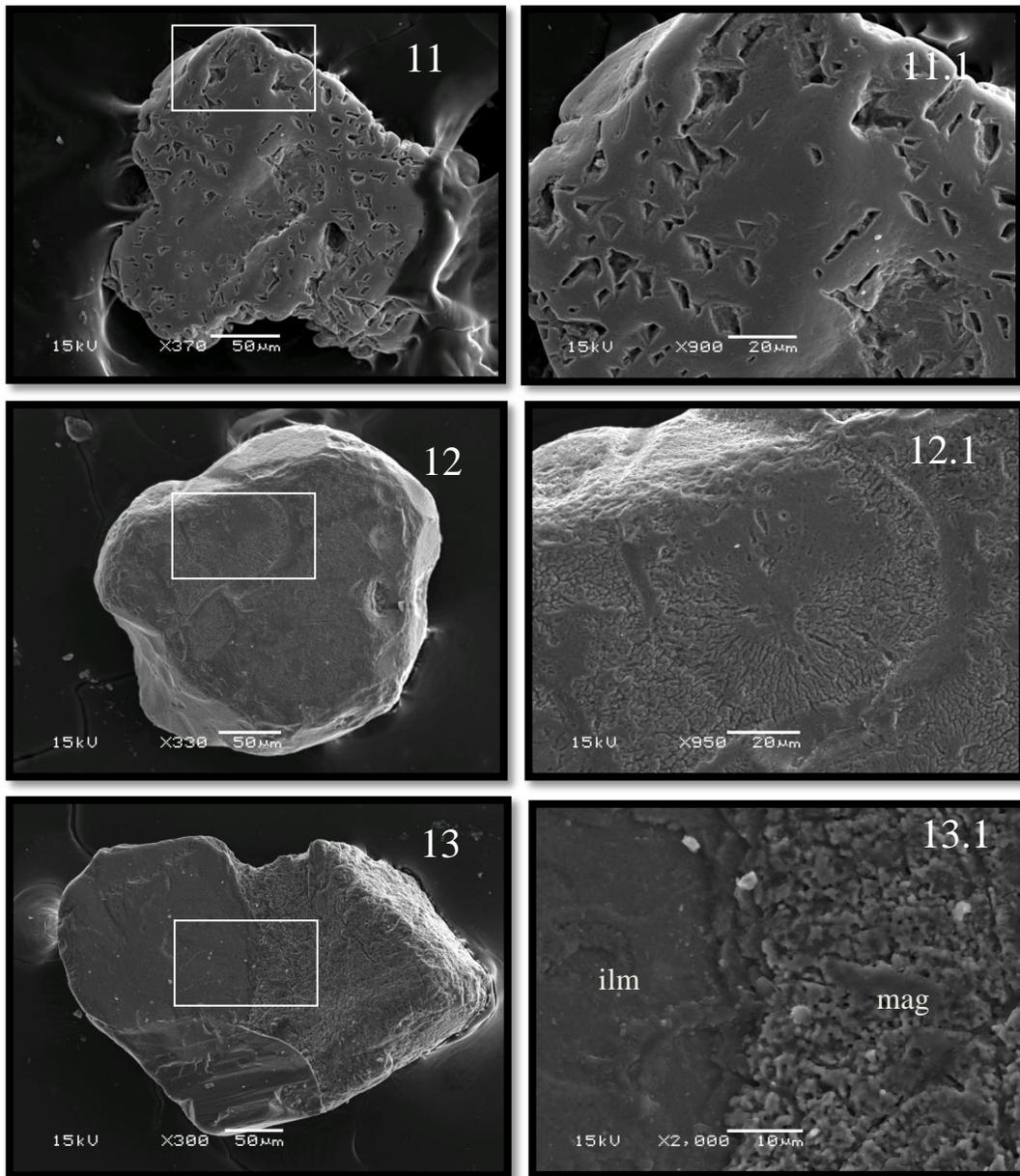
- 4) Cavidades dejadas por otros minerales que formaban parte de la ilmenita;
- 5) fracturas angulares en ilmenita;
- 6) 6 y7 Magnetitas con diferentes texturas de meteorización.



8) *Fracturas paralelas en ilmenita;*

9) *Grano de magnetita con ulvoespinela cristalizada formando texturas triangulares de enrejado;*

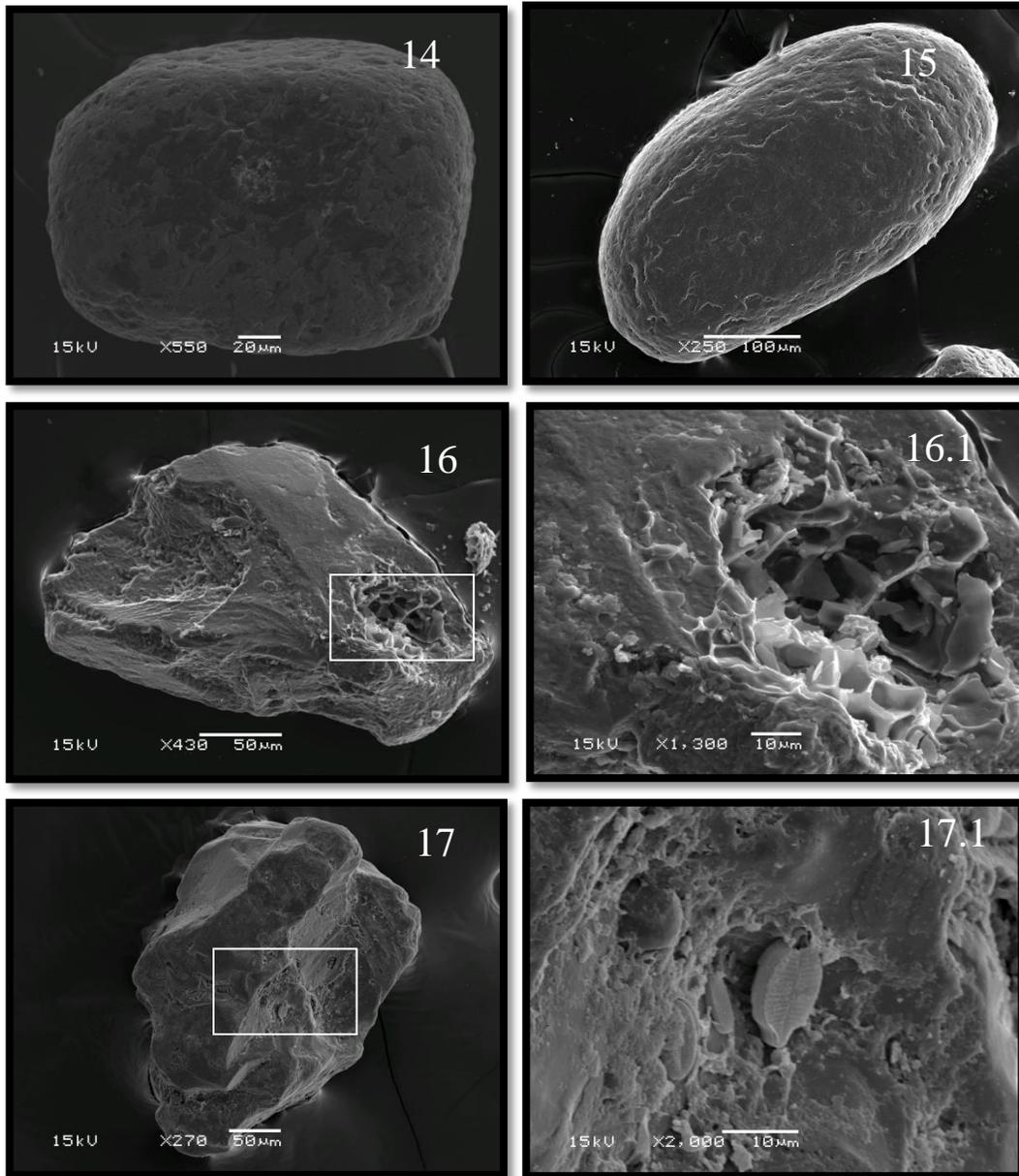
10) *Grano de ilmenita con textura de disolución en triángulos.*



11) Grano de ilmenita con disolución en triángulos;

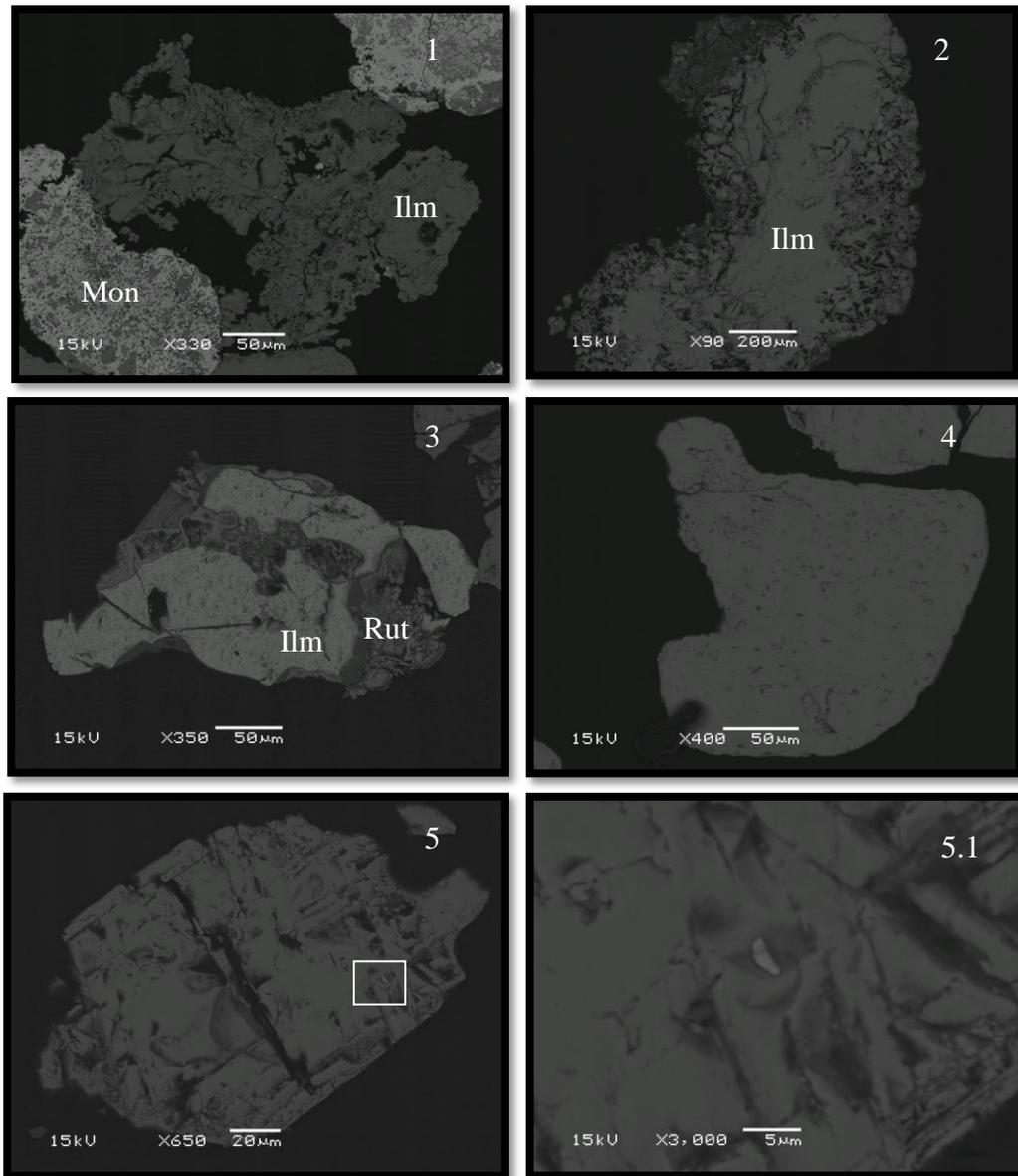
12) grano de ilmenita con fracturas radiales;

13) grano de ilmenita izq- magnetita der. ilm=ilmenita ; mag=magnetita

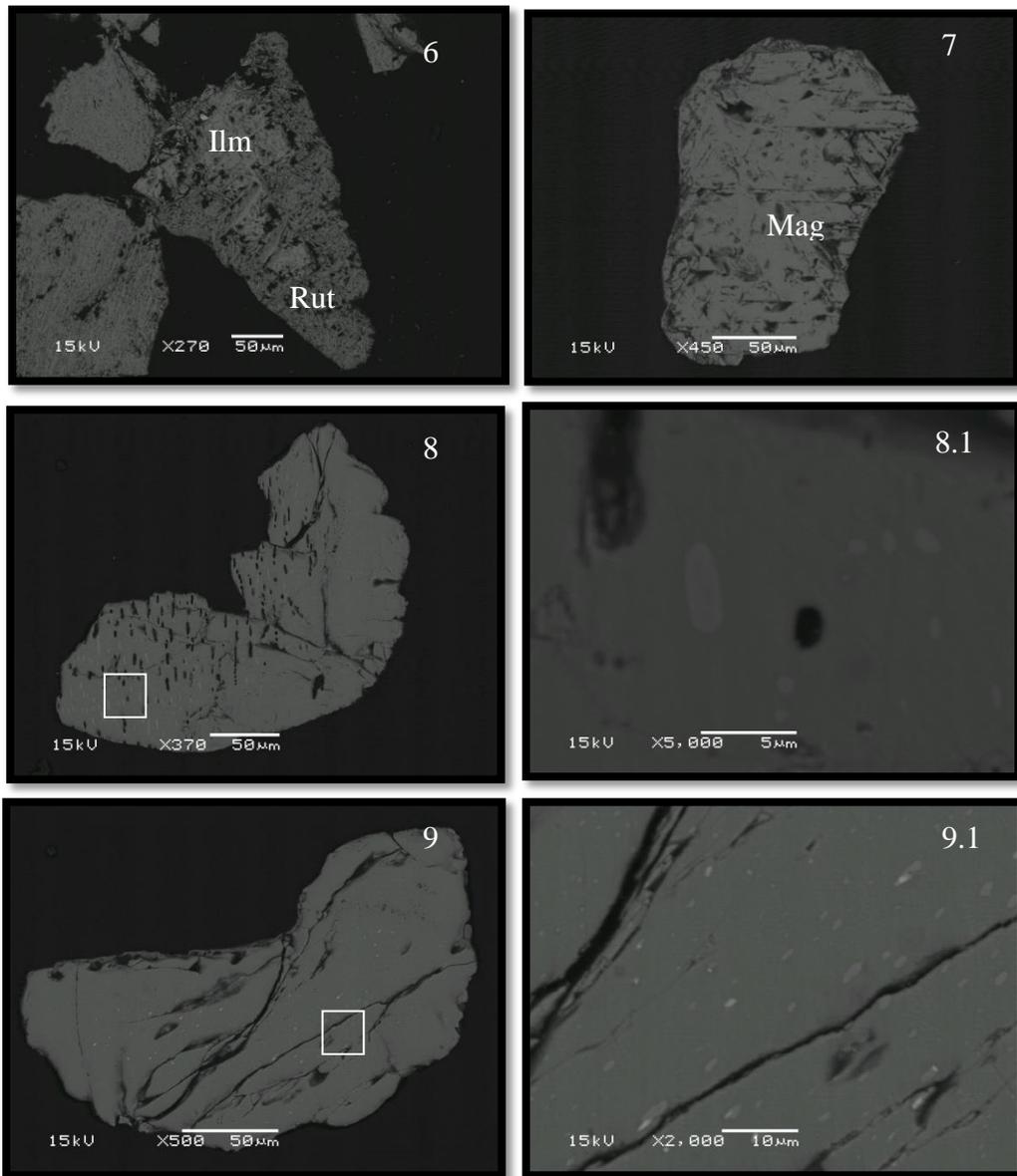


- 14) Grano de ilmenita con monacita;
- 15) Grano de ilmenita redondeado;
- 16) Grano de ilmenita con precipitado de sílice;
- 17) Grano de ilmenita con diatomeas adheridas

### APÉNDICE E (Texturas químicas)



- 1) Grano de ilmenita-Nb (Cerro Impacto);
- 2) Grano de ilmenita (Kimberlita Gerais-Brasil);
- 3) Grano de ilmenita con rutilo (Guaniamo).
- 4) Grano de ilmenita (los Pijiguaos)
- 5) Grano de magnetita con inclusión de un metal Fe-Ni sin reconocer (posible awaruita); Ilm = ilmenita; Rut = rutilo; Mag = magnetita; Mon = monacita



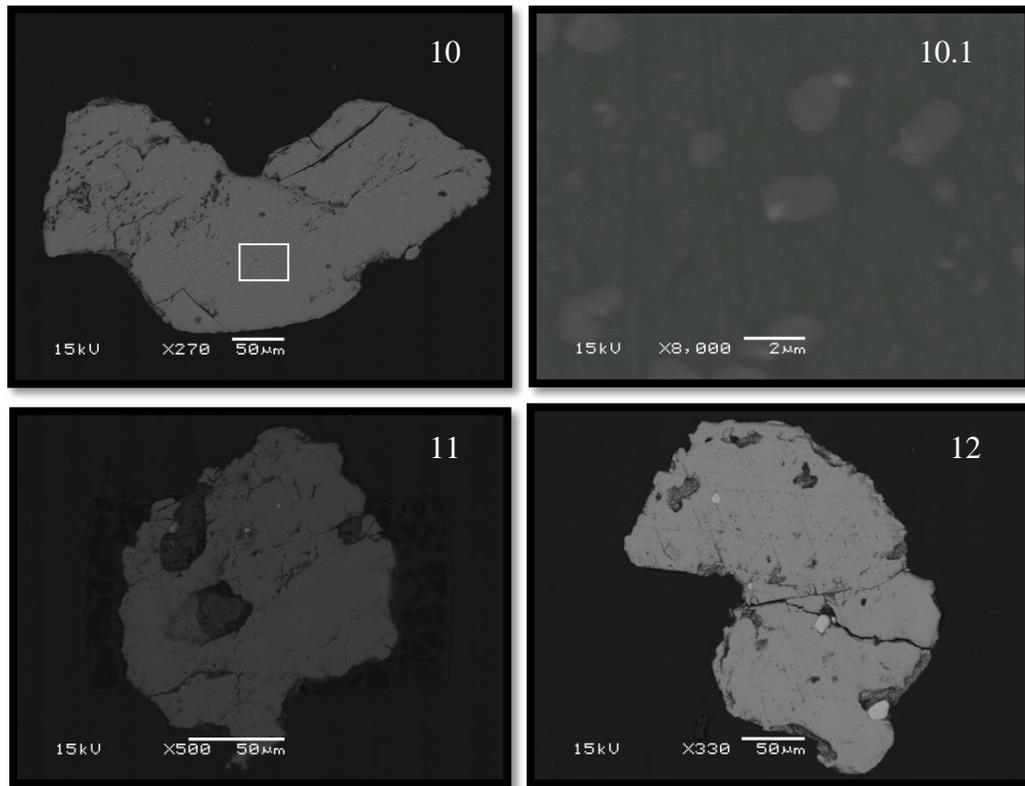
6) *Ilmenita con borde de rutilo;*

7) *Grano de magnetita con textura martita;*

8) *Grano de ilmenita con exsoluciones de ulvoespinela;*

9) *Grano de ilmenita con exsoluciones de fergusonita-(Y) ; Ilm=ilmenita;*

*Rut=rutilo;Mag=magnetita*



10) Grano de ilmenita con exsoluciones de ulvoespinela y dentro de esta exsoluciones de columbita;

11) grano de ilmenita con inclusiones de aluminio silicatos y zircones;

12) grano de ilmenita con inclusiones de zircón

**APENDICE F (Lista de minerales por muestra en el estudio morfológico)**

**Tabla F.1** Lista de minerales por muestra en el estudio Morfológico

Grano	M2	M3	M13	M14	M18	M20	M27	M28	M29
1	ilmenita	Ilmenita	magnetita	silicato	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita
2	ilmenita	Ilmenita	ilmenita	silicato	ilmenita	ilmenita	ilmenita-rutilo	ilmenita	ilmenita
3	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita	ilmenita	silicato	ilmenita	ilmenita
4	ilmenita	Ilmenita	magnetita	silicato	ilmenita-silicato	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita
5	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita	ilmenita-silicato	ilmenita	ilmenita	ilmenita
6	ilmenita	Ilmenita	ilmenita	silicato	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita
7	ilmenita	Ilmenita	silicato	silicato	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita
8	ilmenita	Silicato	magnetita	silicato	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita
9	ilmenita	Ilmenita	ilmenita	silicato	ilmenita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
10	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita-magnetita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
11	ilmenita	Ilmenita	ilmenita	silicato	ilmenita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
12	Magnetita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita	ilmenita		ilmenita-rutilo	ilmenita
13	Magnetita	Ilmenita	ilmenita	silicato	ilmenita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
14	Magnetita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita	ilmenita-silicato		ilmenita	ilmenita
15	ilmenita	Ilmenita	magnetita	silicato	magnetita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
16	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita	silicato		ilmenita	ilmenita
17	Magnetita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	magnetita	ilmenita		magnetita-silicato	ilmenita
18	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita-magnetita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
19	ilmenita	Ilmenita	magnetita	silicato	ilmenita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
20	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita-magnetita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
21	ilmenita	Ilmenita	magnetita	silicato	magnetita	ilmenita		ilmenita	ilmenita
22	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita-magnetita	silicato			ilmenita
23	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita-silicato	ilmenita			ilmenita
24	ilmenita	Ilmenita	magnetita	silicato	ilmenita-magnetita	ilmenita			ilmenita
25	ilmenita	Ilmenita	magnetita	silicato	ilmenita-silicato	ilmenita			ilmenita
26	Rutilo	Ilmenita	magnetita	silicato	ilmenita	ilmenita			zircon
27	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita	ilmenita			cuarzo
28	ilmenita	Ilmenita	ilmenita	ilmenita	ilmenita-magnetita	ilmenita			ilmenita
29	ilmenita	Ilmenita	magnetita	ilmenita	ilmenita				ilmenita
30	ilmenita	Ilmenita		silicato	ilmenita				ilmenita
31									ilmenita

APENDICE G

Tabla G.1: #Ti de las ilmenitas de Guaniamo, Suapure y Cerro Impacto

Cuenca Guaniamo				Cuenca Suapure						Cerro Impacto					
	#Ti		#Ti		#Ti		#Ti		#Ti		#Ti		#Ti		#Ti
m29.8	0,48	m28.36	0,52	m18.11	0,48	m11.4	0,42	m3.1	0,49	P_1.5	0,49	CI_1.2	0,59	CI_2.12	0,39
m29.4	0,53	m28.11	0,53	m18.13	0,49	m11.7	0,47	m3.14	0,50	P_1.2	0,49	CI_1.5	0,66	CI_2.5	0,50
m29.9	0,53	m28.18	0,55	m18.10	0,50	m11.13	0,48	m3.9	0,50	P_1.4	0,50	CI_1.4	0,85	CI_2.7	0,51
m29.17	0,54	m28.16	0,59	m18.27	0,50	m11.15	0,48	m3.7	0,50	P_1.9	0,50	CI_1.1	0,89	CI_2.8	0,54
m29.24	0,54	m28.5	0,60	m18.20	0,50	m11.3	0,49	m3.16	0,50	P_1.6	0,51	CI_1.7	0,92	CI_2.4	0,65
m29.13	0,57	m28.33	0,61	m18.28	0,51	m11.14	0,50	m3.2	0,50	P_1.8	0,52	CI_1.9	0,93	CI_2.3	0,67
m29.15	0,59	m28.35	0,61	m18.6	0,51	m11.20	0,51	m3.11	0,50	P_1.1	0,52	CI_1.3	0,93	CI_2.11	0,69
m29.26	0,59	m28.6	0,61	m18.22	0,51	m11.16	0,51	m3.18	0,51	P_1.7	0,52	CI_1.8	0,95	CI_2.13	0,73
m29.20	0,60	m28.32	0,62	m18.4	0,51	m11.9	0,51	m3.10	0,51			CI_1.6	0,95	CI_2.9	0,73
m29.1	0,60	m28.3	0,62	m18.2	0,51	m11.10	0,51	m3.19	0,51					CI_2.2	0,74
m29.11	0,62	m28.26	0,62	m18.1	0,52	m11.12	0,51	m3.4	0,51					CI_2.6	0,75
m29.6	0,62	m28.10	0,62	m18.3	0,52	m11.6	0,52	m3.13	0,51					CI_2.14	0,81
m29.16	0,63	m28.4	0,64	m18.30	0,52	m11.11	0,53	m3.15	0,51					CI_2.10	0,87
m29.23	0,63	m28.8	0,64	m18.8	0,52	m11.18	0,53	m3.12	0,52					CI_2.1	0,92
m29.14	0,63	m28.2	0,64	m18.12	0,52	m11.8	0,54	m3.5	0,53						
m29.22	0,64	m28.9	0,64	m18.14	0,53	m11.19	0,54	m3.3	0,58						
m29.25	0,64	m28.7	0,64	m18.5	0,53	m11.2	0,66	m3.17	0,65						
m29.12	0,64	m28.17	0,68			m11.5	0,66								
m29.5	0,64	m28.1	0,69												
m29.18	0,65	m28.19	0,72												
m29.27	0,65	m28.34	0,83												
m29.19	0,66														
m29.21	0,67														
m29.3	0,70														
m29.10	0,70														
m29.7	0,76														
m29.2	0,76														