

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO COMPARACIÓN DE DOS SECTORES DE LA FORMACIÓN MESA MEDIANTE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, TEXTURAL, GEOMORFOLÓGICA Y ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN EL SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA DEL RÍO ORINOCO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo
Por los Brs. López Nerelys
y Uzcátegui Miguel

Caracas, Junio de 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO COMPARACIÓN DE DOS SECTORES DE LA FORMACIÓN MESA MEDIANTE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, TEXTURAL, GEOMORFOLÓGICA Y ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN EL SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA DEL RÍO ORINOCO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Mauricio Bermúdez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo
Por los Brs. López Nerelys
y Uzcátegui Miguel

Caracas, Junio de 2014

Caracas, Junio de 2014

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller, titulado:

“COMPARACIÓN DE DOS SECTORES DE LA FORMACIÓN LA MESA MEDIANTE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, TEXTURAL, GEOMORFOLÓGICA Y ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS EN EL SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA DE RÍO ORINOCO”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Lenin González
Jurado

Prof. Orosman Ortigano
Jurado

Prof. Mauricio Bermúdez
Tutor Académico

DEDICATORIA

A nuestros Padres por su comprensión y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a nuestra casa de estudio, la ilustre Universidad Central de Venezuela que con su luz nos iluminó y ha vencido esa sombra de ignorancia brindándonos por medio de profesores, conocimientos bases para formarnos como profesionales.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela, por financiar la ejecución de este trabajo, mediante el proyecto de investigación de grupo N° PG 08-8273-2011, titulado: “Determinación de la relación entre relieve, clima, tectónica y biodiversidad en orógenos circundantes a la cuenca del río Orinoco mediante métodos multiherramientas”.

A FUNVISIS quien proporcionó parte de los fondos provenientes del proyecto Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME), para la realización de la presente investigación.

A nuestro tutor el Dr. Mauricio Bermúdez, que con sabiduría, optimismo y elocuencia nos brindó apoyo y nos hizo esos días difíciles más prósperos.

Al prof. Ricardo Alezones, que con sus locuras nos hizo los semestres más a menos, por soportarnos en el laboratorio y por distraernos.

A nuestros compañeros tesisas, Miguel Albornoz, Arnaldo Lezama, Steffany Carmona, Zulyn González, Luis Carlos Romero, Marco Figueira, Charles Viana, Suri Arcia, Marlene Flores y Jesús Grillet, que nos brindaron su apoyo e hicieron las actividades para la elaboración de la tesis algo agradable; lloramos, reímos, peleamos pero nuestra amistad se mantuvo.

A Milagros Duhamel, Yulimar Barreto, María Teresa Rodríguez, José Cova, Jesús Quintero Rosbeidy Hernández, Pedrimar Godoy, Andrea Mora y todos aquellos que nos colaboraron con la mesa para la celebración de la tesis.

A todos aquellos que pasaron de ser compañeros de estudio a ser grandes amigos que nos impulsaron, motivaron y distrajeron durante toda nuestra etapa en la universidad.

A todos aquellos familiares que nos dieron su apoyo durante nuestra carrera.

López B., Nerelys N.

Uzcátegui S., Miguel E.

**COMPARACIÓN DE DOS SECTORES DE LA FORMACIÓN LA MESA,
MEDIANTE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, TEXTURAL,
GEOMORFOLÓGICA Y ANÁLISIS DE MINERALES PESADOS, EN EL
SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA DE RÍO ORINOCO**

**Tutor Académico: Prof. Mauricio Bermúdez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2014, n° pág. (159).**

**Palabras claves: Geomorfología cuantitativa, erosión, minerales pesados, Río
Orinoco, Formación Mesa.**

RESUMEN:

La presente investigación es parte de un proyecto regional que trata de entender la relación entre clima, tectónica y los procesos superficiales que afectan el desarrollo de orógenos en áreas circundantes a la cuenca del río Orinoco, para ello se utilizan dos herramientas: la primera, es el estudio morfo-textural de los minerales pesado, en la cual se procesaron 10 muestras que representaban las dos fracciones de 5 sub-áreas tomadas en la parte central del río Orinoco, estas muestras llamadas Peñón Aro, Borbón roca, Borbón detrítico, Fundo Mata Linda y Moitaco. La otra herramienta, es el análisis digital del terreno, con el cual se usaron imágenes de elevación digital y datos de la misión TRMM, para un estudio de geomorfología cuantitativa. El análisis digital del terreno sirvió para identificar como el drenaje erosiona cada cuenca, las diferentes pendientes presentes, además de conocer los lugares con los valores más altos de precipitación, lo que permitió establecer como la misma puede afectar y en qué medida a los índices de erosión. La cuenca que registra los valores más altos en los índices de erosión, precipitación y humedad es Peñón Aro, esto se debe a que es la de mayor área, pero la que posee el promedio más alto de humedad es Fundo Mata Linda, como consecuencia de estar ubicada sobre las Mesas Orientales, por lo que sus valores de pendiente son muy bajos. Las diferencias significativas de muestras pertenecientes a la Formación Mesa situadas al norte y al sur del río Orinoco permiten inferir diferentes fuentes, que aunque presenten la misma litología, los minerales tienen características distintas, tanto externas producto del medio fluvial, como las impurezas y alteraciones sufridas desde su origen; las distribuciones de edades registradas en esos sedimentos podrían ser diferentes en cada sector de la Formación Mesa.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN:.....	vi
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 Objetivo General.....	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 ALCANCE	5
1.6 TRABAJOS PREVIOS.....	6
1.6.1 Antecedentes metodológicos.....	6
1.6.2 Antecedentes en la zona de estudio.....	8
2 FISIOGRAFÍA Y GEOLOGÍA REGIONAL.....	9
2.1 INTRODUCCIÓN	9
2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	9
2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y NATURALES.....	10
2.3.1 Relieve.....	10
2.3.2 Suelos.....	11
2.3.3. Climatología.....	11
2.3.4 Hidrografía.....	14
2.4 GEOLOGÍA REGIONAL.....	17
2.4.1 Marco Estratigráfico.....	18

2.4.1.3 Aspectos Geomorfológicos de las zonas circundantes a la cuenca del río Aro.....	22
2.4.2 Marco Estructural.....	23
2.4.3 Marco Tectonoestratigráfico.....	26
2.4.3.1 Origen de la Formación Mesa.....	27
2.4.3.2. Características Generales descritas por las principales edades que marcaron importantes eventos geológicos en la Formación Mesa.....	28
3. MARCO TEORICO Y METODOLOGIA.....	33
3.1 INTRODUCCION.....	33
3.2 MARCO TEÓRICO.....	33
3.2.1 Minerales Pesados.....	33
3.2.1.1 Reconocimiento de minerales pesados.....	34
3.2.2 Factores que operan en los ambientes naturales y que afectan la abundancia de los minerales pesados en los sedimentos.....	34
3.2.3 Forma de los minerales pesados.....	37
3.2.3.1. Análisis automatizado de morfología de minerales pesados.....	37
3.2.4 Tamaño de los minerales pesados.....	41
3.2.5 Estabilidad química de los minerales pesados.....	41
3.2.7 Métodos de separación de minerales pesados.....	43
3.2.7.1 Método de la batea.....	43
3.2.7.2 Mesa de Separación Hidrogravimétrica.....	43
3.2.7.3 Separación magnética.....	44
3.2.8 Análisis de minerales pesados por Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).....	46

3.2.9 Geomorfología Cuantitativa.....	50
3.2.9.1 Cálculos de Atributos Topográficos Primarios y Secundarios.....	50
3.2.9.2 Índices de Erosión.....	55
3.2.9.3 Relieve.....	56
3.2.9.4 Índice de Humedad.....	57
3.2.9.5 Índice de capacidad de transporte de sedimentos.....	57
3.3 MARCO METODOLÓGICO.....	58
3.3.1 Pre campo.....	58
3.3.2 Campo.....	58
3.3.3 Laboratorio y oficina.....	59
4. RESULTADOS.....	61
4.1. INTRODUCCIÓN.....	61
4.2 MINERALES PESADOS.....	61
4.2.1 Análisis morfo-textural.....	61
4.2.2 Identificación de los minerales pesados por el Microscopio Electrónico de Barrido (M.E.B.).....	78
4.2.2.1 Borbón Detrítico Magnético.....	79
4.2.2.2. Borbón Detrítico No Magnético.....	83
4.2.2.3 Borbón Roca Magnético.....	87
4.2.2.4 Borbón Roca No Magnético.....	91
4.2.2.5 Fundo Mata Linda Magnético.....	95
4.2.2.6 Fundo Mata Linda No Magnético.....	99
4.2.2.7 Moitaco Magnético.....	103
4.2.2.8 Moitaco No Magnético.....	107

4.2.2.9 Peñón Aro Magnético.....	111
4.2.2.10. Peñón Aro No Magnético.....	115
4.3 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO.....	121
4.3.1 Atributos Primarios.....	121
4.3.2 Atributos Secundarios.....	124
5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	136
5.1 INTRODUCCIÓN.....	136
5.2 Minerales Pesados.....	136
5.2.1 Análisis Morfo- Textural.....	136
5.2.2 Análisis Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).....	137
5.3 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO.....	138
5.4 INTEGRACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	141
6. SUMARIO Y RECOMENDACIONES.....	147
BIBLIOGRAFÍA.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Hackley, 2005).....	2
Figura 2. Relación entre clima, tectónica y sedimentación en cuencas sedimentarias internas a orógenos (Extraído de: http://www.geo.uu.nl/~forth/people/Guillaume/guillaume.htm).....	3
Figura 3. Imagen satelital de la zona de estudio (Tomado de Google Earth).....	9
Figura 4. Perfil topográfico transversal y geológico de la Mesa La Tentación, edo. Anzoátegui, Llanos Orientales de Venezuela (ver transepto aproximado en la Figura 2.1, tomado de Méndez y Cartaya (1998)).....	10
Figura 5. Clasificación climática del área de estudio según Köppen (Tomado y modificado de www.venemia.com).....	12
Figura 6. Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de www.venemia.com).....	13
Figura 7. Tipos climáticos de Venezuela según Thornwaite, pisos térmicos (Tomado y modificado de www.venemia.com).....	14
Figura 8. Red Hidrográfica que comprende la zona de estudio. (a) Cuenca Caris (b) Cuenca Aro. (extraído de http://siga.geoportalsb.gob.ve/rios_embalses/).....	16
Figura 9. Mapa geológico de Venezuela con las cuencas de interés superpuestas (Modificado de Hackley et al., 2006).....	17
Figura 10. Estratos conglomeráticos de la Formación Mesa (LEV, 2010).....	18
Figura 11. Área de afloramiento de las formaciones en la Cuenca Oriental (Tomado de: González de Juana, et al., 1980).....	19
Figura 12. Cuadro de correlación a nivel nacional de las unidades más importantes dentro del Neógeno de Venezuela (Yoris y Ostos, 1997).....	20
Figura 13. a) Columna estratigráfica y b) Corte Geológico de la Cuenca Oriente (Yoris y Ostos, 1997).....	21

Figura 14. Mapa gravimétrico de Bouguer de la cuenca Oriental de Venezuela (Pratsch, 1994).....	22
Figura 15. Perfil geomorfológico de la Formación Mesa, sector almacén. (Modificado de Santiago, 2003).....	23
Figura 16. Corte geológico representando estructuras expuestas al norte del río Orinoco (Tomado de: Yoris y Ostos, 1997).....	24
Figura 17 Aspectos generales relacionados con la tectónica, geología estructural y superficial del delta del Orinoco. (Tomado de: Yoris y Ostos, 1997).....	25
Figura 18 Modelo de evolución geológico (Ramirez, 1982).....	29
Figura 19 Cambio en los patrones paleogeográficos a finales de la Era Proterozoica y principios del Paleozoica (Stanley, 1999).....	29
Figura 20 Imagen representativa del Periodo Precámbrico (Hönninger, 2010).....	30
Figura 21 Imagen representativa del Periodo Carbonífero (Hönninger, 2010).....	31
Figura 22 Imagen representativa del Periodo Pérmico (Hönninger, 2010).....	32
Figura 23. Microscopio petrográfico dotado de una cámara usada en este trabajo para el reconocimiento de minerales.....	34
Figura 24. Gráfico visual de esfericidad y redondez de granos (Krumbein y Pettijhon, 1938).....	38
Figura 25. Menú del programa ImageJ.....	38
Figura 26. Gráfico de esfericidad y redondez basado en el programa ImageJ para el análisis digital (Krumbein y Pettijhon, 1938).....	39
Figura 27. Ventana del programa donde se visualiza la fotografía a analizar.....	39
Figura 28. Imágenes que muestran el procesamiento de las fotos con el programa ImageJ. A) Aplicación de la herramienta Threshold para que el espectro de colores quede en blanco y negro. B) Ventana que muestra el gráfico del espectro de colores. C) Imagen editada con las herramientas del programa para que se puedan diferenciar	

los granos entre sí. D) Ventana que muestra el análisis digital y la separación de los granos por números para su posterior ubicación en la tabla.....	40
Figura 29. Tabla de resultados arrojada por el programa ImageJ.....	41
Figura 30. Mesa de separación hidrogravimétrica Wilfley. Separación mediante líquidos pesados.....	44
Figura 31. Embudos de decantación utilizados para la separación de minerales pesados utilizando el bromoformo.....	44
Figura 32. Equipo de separación magnética magnet-Lift.....	45
Figura 33. Separador Magnético Frantz.....	46
Figura 34. Diagrama esquemático de un microscopio electrónico de barrido (tomado de http:// almez.pntic.mec.es).....	47
Figura 35. Cuadro representativo de los procesos que se deben llevar a cabo para realizar la microscopia electrónica de barrido. (a) instrumento que se utiliza para cubrir las muestras de secciones montadas en oro y paladio; b) mesa donde se preparan las secciones montadas antes de ser evaluadas en el MEB; c) a la izquierda se puede observar el instrumento donde son introducidas las secciones montadas ya preparadas a evaluar, a la derecha se encuentra el monitor donde se observan las imágenes emitidas por el MEB; d) correcciones y preparación de datos arrojados a través del MEB.....	48
Figura 36. (A) Modelo digital de elevación con vista en perspectiva. (B) Representación de un modelo digital de elevación en formato ráster. (Tomado de http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//009z0000005n000000 y http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx)..	51
Figura 37. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón detrítico magnético.....	62
Figura 38. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón detrítico magnético.....	62

Figura 39. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón detrítico no magnético.....	63
Figura 40. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón detrítico no magnético....	64
Figura 41. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón roca magnético.....	65
Figura 42. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón roca magnético.....	65
Figura 43. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón roca no magnético.....	66
Figura 44. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón Roca no magnético.....	66
Figura 45. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda magnético.....	67
Figura 46. Porcentaje de minerales en la muestra Fundo Mata Linda magnético.....	67
Figura 47. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda no magnético.....	68
Figura 48. Porcentaje de minerales en la muestra Fundo Mata Linda no magnético.....	69
Figura 49. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco magnético...70	
Figura 50. Porcentaje de minerales en la muestra Moitaco magnético.....	70
Figura 51. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco no Magnético.....	71
Figura 52. Porcentaje de minerales en la muestra Moitaco no magnético.....	71
Figura 53. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñón Aro magnético.....	72
Figura 54. Porcentaje de minerales en la muestra Peñón Aro magnético.....	73

Figura 55. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñón Aro no magnético.....	74
Figura 56. Porcentaje de minerales en la muestra Peñón Aro no magnético.....	74
Figura 57. Gráfico de esfericidad promedio de la fracción magnética entre las cuencas.....	75
Figura 58. Valores promedios de redondez para la fracción magnética de las cuencas.....	76
Figura 59. Gráfico de esfericidad promedio de la fracción magnética entre las cuencas.....	77
Figura 60. Promedio de redondez para la fracción no magnética de las cuencas.....	78
Figura 61 Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	80
Figura 62. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	82
Figura 63. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	84
Figura 64. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado	

en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....86

Figura 65. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....88

Figura 66. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....90

Figura 67. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....92

Figura 68. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....94

Figura 69. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Fundo Mata Linda magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....96

Figura 70. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra

Fundo Mata Linda magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....98

Figura 71. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Fundo Mata Linda no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....100

Figura 72. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Fundo Mata Linda no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....102

Figura 73. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....104

Figura 74. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....106

Figura 75. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco no magnético. A) zonas del cristal analizado. B) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. C) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos. D) Valores porcentuales en cps

(conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	108
Figura 76. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; c) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	
	110
Figura 77. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro magnético.; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	
	112
Figura 78. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Esta gráfica presentó un problema al momento de ser cargada; c) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal; d) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos.....	
	114
Figura 79. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	
	116
Figura 80. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.....	
	118
Figura 81. Modelo de elevación digital a una resolución de 90 metros, los polígonos en negro representan las cuencas analizadas	
	122

Figura 82. Mapa de pendiente.....	123
Figura 83. Mapa de relieve calculado con un radio de 5 Km.....	125
Figura 84. Mapa de precipitaciones anuales derivado del modelo TRMM 2B31 para el período 1998-2009.....	127
Figura 85. Mapas de índice de humedad. a) Precipitación Uniforme; b) Precipitación basada en los datos de la misión TRMM.....	129
Figura 86. Mapas de TSP; a) Precipitación uniforme; b) Precipitación variable según los datos TRMM.....	132
Figura 87. Mapas de USP; a) Precipitación uniforme; b) Precipitación variable según los datos TRMM.....	133
Figura 88 Mapas de SSP; a) Precipitación uniforme; b) Precipitación variable según los datos TRMM.....	134
Figura 89 Gráfica de los promedios normalizados de los índices de erosión.....	135
Figura 90. Daño causado en la estructura cristalina de un grano de circón por emisión de partículas alfa. (a) Contenido de átomos de ^{238}U en un grano, (b) distorsión sobre el enrejado cristalino causado por la emisión de las partículas alfa durante el decaimiento radioactivo del ^{328}U , y c) Imagen de una espectrometría de un grano de circón Proterozoico que muestra la forma como es dañado.....	138
Figura 91. Comparación de valores de esfericidad y redondez para las cuencas estudiadas e índice de erosión TSP con precipitaciones.....	143
Figura 92. Comparación entre precipitación y relieve para los diferentes radios. En esta figura los cuadrados se refieren a la cuenca del Fundo Mata Linda, los círculos a la cuenca de Borbón detrítico, los triángulos a Borbón roca, los rombos a Peñón Aro y los asteriscos a Moitaco.....	145
Figura 93. Correlación existente entre los diferentes índices de erosión normalizados y el relieve calculado a 1 km de radio; a) Fundo Mata Linda; b) Borbón Detrítico; c) Moitaco; d) Borbón Roca; e) Peñón Aro.....	145

Figura 94. Correlación existente entre tasa de precipitación e índice de redondez de los circones; a) Fundo Mata Linda; b) Borbón Detrítico; c) Borbón Roca; d) Peñón Aro; e) Moitaco.....146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Asociaciones de minerales pesados y procedencia (Feo- Codecido, 1956)..	35
Tabla 2. Orden de persistencia y orden generalizado de la estabilidad química de los minerales pesados comunes. Los minerales están arreglados en orden creciente de estabilidad (Mange y Maurer, 1992).....	42
Tabla 3. Minerales pesados (Klein, 1997).....	49
Tabla 4. Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem) (Moore, Grayson y Ladson ,1991).....	52
Tabla 5. Características Topográficas Secundarias que puede ser calculado mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Moore, Grayson y Ladson, 1991).....	53
Tabla 6. Tabla representativa de los cálculos de variables y parámetros morfométricos de la microcuenca y la red de drenaje. (Gardiner, 1981; Gregory y Walling, 1973; Guevara y Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton, 1945; Leopoldetal., 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1977; Senciales, 1998; Smith y Stopp, 1978; Strahler, 1968; Strahler, 1984).....	54
Tabla 7. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón Detrítico Magnético.....	62
Tabla 8. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón Detrítico No Magnético.....	63
Tabla 9. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón Roca Magnético.....	64
Tabla 10. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón Roca No Magnético.....	66
Tabla 11. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda Magnético.....	67

Tabla 12. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda No Magnético.....	68
Tabla 13. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco Magnético.....	69
Tabla 14. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco No Magnético.....	71
Tabla 15. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñón Aro Magnético.....	72
Tabla 16. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñón Aro Magnético.....	73
Tabla 17. Esfericidad promedio entre los granos de la fracción magnética.....	75
Tabla 18. Redondez promedio entre los granos de la fracción magnética.....	76
Tabla 19. Esfericidad promedio entre los granos de la fracción no magnética.....	77
Tabla 20. Redondez promedio entre los granos de la fracción no magnética.....	78
Tabla 21. Porcentaje en peso de los elementos.....	81
Tabla 22. Porcentaje atómico de los elementos.....	81
Tabla 23. Porcentaje en peso de los elementos.....	83
Tabla 24. Porcentaje atómico de los elementos.....	83
Tabla 25. Porcentaje en peso de los elementos.....	85
Tabla 26. Porcentaje atómico de los elementos.....	85
Tabla 27. Porcentaje en peso de los elementos.....	87
Tabla 28. Porcentaje atómico de los elementos.....	87
Tabla 29. Porcentaje en peso de los elementos.....	89
Tabla 30. Porcentaje atómico de los elementos.....	89

Tabla 31. Porcentaje en peso de los elementos.....	91
Tabla 32. Porcentaje atómico de los elementos.....	91
Tabla 33. Porcentaje en peso de los elementos.....	93
Tabla 34. Porcentaje atómico de los elementos.....	93
Tabla 35. Porcentaje en peso de los elementos.....	95
Tabla 36. Porcentaje atómico de los elementos.....	95
Tabla 37. Porcentaje en peso de los elementos.....	97
Tabla 38. Porcentaje atómico de los elementos.....	97
Tabla 39. Porcentaje en peso de los elementos.....	99
Tabla 40. Porcentaje atómico de los elementos.....	99
Tabla 41. Porcentaje en peso de los elementos.....	101
Tabla 42. Porcentaje atómico de los elementos.....	101
Tabla 43. Porcentaje en peso de los elementos.....	103
Tabla 44. Porcentaje atómico de los elementos.....	103
Tabla 45. Porcentaje en peso de los elementos.....	105
Tabla 46. Porcentaje atómico de los elementos.....	105
Tabla 47. Porcentaje en peso de los elementos.....	107
Tabla 48. Porcentaje atómico de los elementos.....	107
Tabla 49. Porcentaje en peso de los elementos.....	109
Tabla 50. Porcentaje atómico de los elementos.....	109
Tabla 51. Porcentaje en peso de los elementos.....	111
Tabla 52. Porcentaje atómico de los elementos.....	111
Tabla 53. Porcentaje en peso de los elementos.....	113

Tabla 54. Porcentaje atómico de los elementos.....	113
Tabla 55. Porcentaje en peso de los elementos.....	115
Tabla 56. Porcentaje atómico de los elementos.....	115
Tabla 57. Porcentaje en peso de los elementos.....	117
Tabla 58. Porcentaje atómico de los elementos.....	117
Tabla 59. Porcentaje en peso de los elementos.....	119
Tabla 60. Porcentaje atómico de los elementos.....	119
Tabla 61. Resultados obtenidos a través del Microscopio Electrónico de Barrido para todas las muestras analizadas.....	120
Tabla 62. Valores estadísticos para elevación y pendiente registrados en las cuencas.....	121
Tabla 63 Valores estadísticos de relieve calculados a diferentes radios.....	124
Tabla 64. Valores de precipitación anual promedio registrados en cada cuenca según el modelo TRMM 2B31 para el período 1998-2009.....	126
Tabla 65. Índices de humedad calculados para cada una de las cuencas con precipitación uniforme (WI) y con precipitación variable (WIP) según los TRMM.....	128
Tabla 66. Índice de erosión por cuenca, los valores en casillas blanca representan precipitación uniforme, las casillas grises es la precipitación variable obtenida por el modelo TRMM.....	131

CAPITULO I

PRELIMINARES

1.1 INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de la geomorfología es el estudio de las formas de la superficie terrestre y sus orígenes a lo largo del tiempo geológico. Según Wilson y Gallant (2000), desde finales del siglo XIX hasta la última década del siglo XX esta rama de la geología pasó de ser una ciencia meramente descriptiva a cuantitativa, lo cual ha facilitado su integración con otras ramas de la geología y otras áreas de la ciencia como: edafología, mecánica de suelos, geología aplicada, neotectónica, sísmica, termocronología, geofísica, glaciología, climatología, entre otras. El modelado de la evolución del paisaje a través del tiempo depende tanto de los agentes endógenos, cómo por ejemplo, procesos orogénicos que exhuman y deforman las rocas, cómo de los exógenos, por ejemplo, la erosión y la acción del hombre. La manera como se desarrollan estos procesos de erosión depende principalmente de dos factores: estructurales (erosión diferencial, disposición de las rocas) y climatológicos (temperatura, precipitación, viento). El presente Trabajo Especial de Grado propone el estudio del paisaje actual del sector central de la cuenca del río Orinoco. Este paisaje es muy variado, en él se encuentra una gran variedad de relieves, los cuales están asociados a diferentes orígenes geológicos. El río Orinoco divide casi de forma simétrica a la zona de estudio, en la parte norte se encuentran los llanos Orientales y en la parte sur, está el cratón de Guayana, allí se deposita la Formación Mesa, la cual aflora en los estados Anzoátegui, Monagas y parte de Sucre, además de un sector ubicado al sur del río Orinoco. La zona de estudio comprende un área aproximada de 1000 km², la cual se encuentra al oeste de Ciudad Bolívar, bordeando el río Orinoco entre los poblados de Moitaco y Borbón. A continuación, en la Figura 1.1 se muestra la zona de estudio, donde la Formación Mesa está representada por el color amarillo, remarcando en color anaranjado las 5 cuencas de estudio.

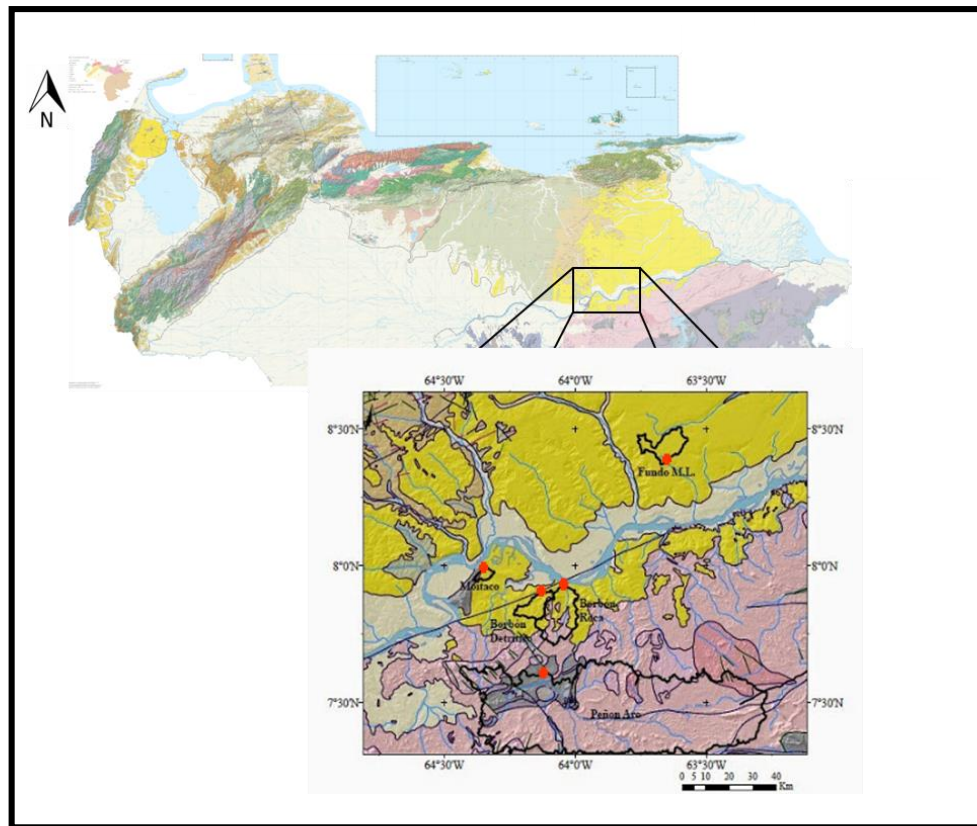


Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio (Hackley, 2005).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Formación Mesa situada hacia el oriente de la cuenca del río Orinoco es seccionada por el mismo, en esta zona la comparación de la morfología de minerales pesados de muestras tomadas a ambos lados del río Orinoco es clave para inferir cambios en el patrón de erosión sobre el área de estudio, cómo por ejemplo, se tiene lo referente a los procesos de exhumación de importantes orógenos circundantes a la cuenca, particularmente los cambios que ocurrieron en el Mioceno tardío, ocasionado al levantamiento de Los Andes de Venezuela y originando el depósito de sedimentos de la Formación Mesa, así como también, las variaciones climáticas en el área, esto queda expuesto claramente en la Figura 1.2. Para conocer dicho comportamiento, es importante realizar los análisis morfométricos y de procedencia de minerales pesados en cada una de las sub-cuencas, ya que el posterior fechado de los mismos por técnicas termocronológicas son indicadores de los procesos de exhumación, así como también

evidencian la forma como ha variado el flujo de partículas, mediante la combinación de análisis geomorfológicos y sedimentológicos cuantitativos. Conocer diferencias entre los flancos norte y sur del río Orinoco en la Formación Mesa, permitirán establecer relaciones entre ambos sectores, en caso de que las hubiera, todo esto es clave para entender la forma como el río Orinoco adquirió su cauce hoy en día. Aunque las dataciones no están contempladas en esta investigación, se plantea hacer un estudio combinado utilizando técnicas de geomorfología convencional, geomorfología cuantitativa, análisis texturales, sedimentológicos y mineralógicos, con el fin de discriminar diferencias entre los sectores antes mencionados a nivel de índices de erosión, textura y procedencia sedimentaria.

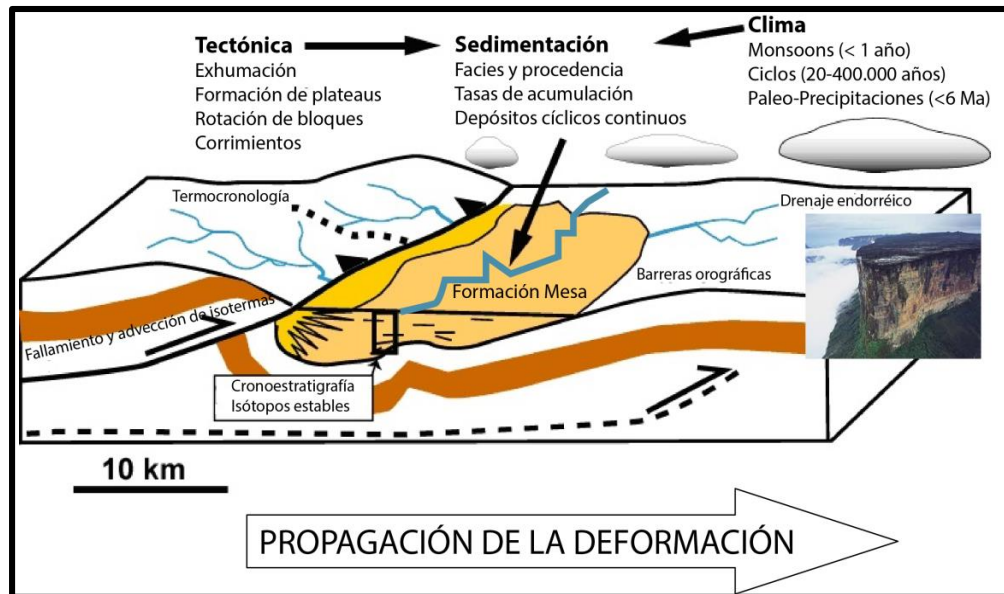


Figura 1.2. Relación entre clima, tectónica y sedimentación en cuencas sedimentarias internas a orógenos (Modificado de <http://www.geo.uu.nl/~forth/people/Guillaume/guillaume.htm>).

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La importancia de esta investigación es el aporte de una metodología poco desarrollada en el país con la cual se pueden obtener resultados confiables y significativos, que servirá de aporte para futuras investigaciones. Para entender la relación entre los procesos climáticos, tectónicos y superficiales como agentes modeladores del relieve actual es necesario considerar una gran cantidad de variables,

los cuales son mostrados en la Figura 1.2. Otro aporte de esta investigación, es que la posterior datación mediante la técnica de trazas de fisión en apatitos y circones de las muestras concentradas y analizadas en este Trabajo Especial de Grado, pudiera dar indicios de cuando el río Orinoco llegó a su posición actual, ya que se cree que el río cambió su orientación de Sur-Norte a Oeste-Este desde hace 8 Ma (Díaz de Gamero, 1995; Hoorn et al., 1995; Bermúdez et al., 2011).

El presente estudio forma parte de un proyecto de investigación grupal a escala regional e internacional de los Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas de la UCV cuyo objetivo principal es tratar de discriminar la relación entre clima, erosión y tectónica a lo largo de la zonas circundantes al río Orinoco mediante métodos multiherramientas que incluye (termocronología, biología molecular, palinología, termoluminiscencia, geomorfología cuantitativa, datos climáticos, entre otros). El área de estudio contemplada en la siguiente investigación comprende la parte central de la cuenca del río Orinoco, en ese sector la procedencia de las partículas es muy variada, es decir, múltiples terrenos fuentes están siendo erosionados hoy en día, sin embargo en la presente investigación no se encuentra contemplado el estudio de la procedencia de esas partículas, ya que se trabajará solamente con la Formación Mesa, cuya edad aún no ha podido ser establecida formalmente.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Discriminar diferencias en cuanto al contenido de minerales pesados, textura de granos e índices de erosión en los sectores norte y sur de la Formación Mesa, en la parte central de la cuenca del río Orinoco.

1.4.2 Objetivos Específicos

a) Estimar la relación distancia roca parental por medio del estudio morfométrico de los minerales pesados.

b) Establecer áreas del control climático sobre el relieve actual a través de la

creación de mapas de índices de erosión y de distribución de minerales pesados a lo largo y ancho de la zona de estudio.

c) Integrar estudios geomorfológicos convencionales (clasificación de los relieves fluviales a pequeña escala) mediante la interpretación de imágenes aéreas, elevación digital y mapas geológicos con estudios de geomorfología cuantitativa.

d) Caracterizar mediante análisis visual, computarizado y microscopía electrónica de barrido los minerales pesados separados de los sedimentos modernos de las diferentes sub-cuencas.

1.5 ALCANCE

Durante el Trabajo Especial de Grado se espera combinar una parte de la geomorfología cuantitativa llamada, análisis digital del terreno (Gallant, 2000), con análisis visuales y computarizados tanto de minerales pesados como de granos de cuarzo, con la finalidad de tratar de discriminar algunos indicios sobre la relación entre el clima, la tectónica y los procesos superficiales en esta área.

El aporte de esta investigación será realizar la separación y el montaje de los minerales pesados de 5 muestras en total donde solo 2 de ellas son sedimentos detríticos para su posterior datación por el método de trazas de fisión en apatitos y circones. Aunque, los resultados para esas edades no serán presentadas en el presente Trabajo Especial de Grado, ya que el tiempo mínimo de preparación, montaje, irradiación, enfriado (disminución de los niveles de radioactividad después de la irradiación), desmontaje y análisis por el método de huellas de fisión para más de 100 granos de cada una de esas cinco secciones bajo el microscopio requiere cerca de un tiempo mayor a un año. En esta investigación, sólo se integrarán cálculos geomorfológicos, observaciones de campo y análisis texturales y de minerales pesados para corroborar si ambos sectores de la Formación Mesa presentan diferencias significativas o no. La combinación de mapas de elevación digital, datos de precipitaciones, análisis geomorfológicos, análisis texturales, además de las primeras medidas teóricas de los atributos primarios y secundarios del terreno, así como los

análisis geomorfológicos cuantitativos y el cálculo de las variaciones laterales en los procesos erosivos de ríos tributarios al cauce principal de la Cuenca del río Orinoco que en esta área contribuyen de manera significativa a los proyectos a gran escalas antes mencionados. Adicionalmente, se proporcionará un mapa geológico-estructural detallado de la zona de estudio y se discriminarán zonas potenciales de alta erosión, por medio de la generación de mapas y tablas de índices de erosión, considerando la litología, y la relación entre las formas de granos mediante análisis visuales como indicadores de procedencia sedimentaria.

1.6 TRABAJOS PREVIOS

1.6.1 Antecedentes metodológicos

Feo-Codecido (1956), estableció las técnicas para el estudio de los minerales pesados en Venezuela, mostrando las asociaciones de los minerales pesados con algunas de las formaciones, estas tablas sirven de referencia para la Formación Mesa.

Flores y Méndez (2005), utilizaron análisis digital de granos para calcular la longitud de las trazas de fisión espontánea en muestras de sedimentos sin-orogénicos (moladas).

Méndez et al. (2007), investigaron la influencia que ejerce la estructura fisiográfica de la microcuenca y la estructura de la red de drenaje en las respuestas rápidas y violentas del sistema mediante cálculos y mediciones de parámetros morfométricos; cálculo del tiempo de concentración; y estimación de los hidrogramas unitarios y caudales pico de crecientes, los cuales son parte de los cálculos que se utilizan en la tesis.

Méndez y Bastidas (2007), utilizaron la técnica de análisis computarizado de imágenes de secciones finas para establecer condiciones de porosidad y permeabilidad en muestras de núcleos del Lago de Maracaibo.

Bermúdez, M. (2009), realizó la datación de sedimentos modernos de ríos y de sedimentos sin-orogénicos de las moladas ubicadas en los flancos norte y sur de Los

Andes de Venezuela.

Gamero y Reveti (2011), realizaron estudios geoquímicos y mineralógicos a los minerales pesados al Sur del Orinoco en la zona de estudio de esta tesis.

Bermúdez et al. (2012), realizaron la discriminación de la relación existente entre clima, tectónica, y procesos superficiales, mediante comparación múltiple de tasas de erosión a corto plazo con tasas de erosión a largo plazo estimados a partir de datos termocronológicos detríticos a lo largo de Los Andes de Venezuela.

Coello, V. (2012), realizó análisis petrográficos e identificación de minerales pesados, para generar un esquema de variación de las asociaciones de minerales índices a lo largo de la Formación Guárico, para establecer rocas fuentes del surco de Guárico, y depositación de dicha formación.

Palacios, Y. (2013), demostró que el análisis de imágenes digitales petrográficas es una técnica confiable y eficiente, en comparación con las técnicas tradicionales, permitiendo realizar un análisis de los poros en rocas carbonáticas del Golfo de Venezuela.

Flores, M. (2013), realizó la discriminación entre relieve, clima, y tectónica utilizando los mismos métodos mencionados en este trabajo a lo largo de la cuenca del río Guárico, y sus principales conclusiones indican diferencias en términos de erosión dentro de las sub-cuencas y un patrón de redondez y esfericidad heredados posiblemente durante los procesos de depositación de la Formación Guárico. También, ese trabajo usa datos termocronológicos existentes para discriminar al menos tres diferentes pulsos de exhumación ocurridos durante el Eoceno, Oligoceno y Mioceno. Sin embargo, el trabajo de Flores (2013) aún continua y ahora se está tratando de fechar las muestras detríticas para tener una mayor información acerca de las relaciones entre terrenos fuentes, la procedencia sedimentaria, y la relación con esos tres pulsos de exhumación.

Arcia y Viana (2014) realizan la discriminación entre relieve, clima, y tectónica utilizando los mismos métodos mencionados en este trabajo en la zona de convergencia

entre Los Andes de Venezuela y la Cordillera de la Costa, observando un posible acoplamiento entre clima, y tectónica.

1.6.2 Antecedentes en la zona de estudio

Vila (1950), Realizó un trabajo detallado de las mesas orientales.

Zinck, Alfred (1970), recopiló trabajos previos con el fin de darle un origen y evolución a la Formación Mesa en un contexto edafológico.

Comerma y Chirinos (1976), realizó características de algunos suelos con y sin horizonte argílico en las mesas orientales de Venezuela.

Fuentes S., Edegma del Valle (2006), estudió la problemática de erosión intensa que ocurre en grandes extensiones de terrenos donde afloran sedimentos de la Formación Mesa.

Ortegano (2012), realizó el estudio geológico del margen Sur de la Cuenca del Orinoco, donde se tomaron algunos datos para modernizar el marco geológico de la tesis.

Granadino (2012), correlacionó los resultados hidrológicos con los geofísicos con el propósito de determinar los sitios probables para la construcción de nuevas obras de captación en la Formación Mesa en Santa Clara.

Carbón y Schubert (1994), realizaron estudios de los Llanos Orientales de Venezuela en el cenozoico tardío, relacionando la geomorfología y estratigrafía de la Formación Mesa de edad Cuaternario.

Herrera y Chacón (2013), estudiaron los sedimentos recientes entre el río Orinoco y la Formación Mesa para evaluar las variaciones y la influencia de El Niño.

CAPITULO II

FISIOGRAFÍA Y GEOLOGÍA REGIONAL

2.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta la ubicación de la zona de estudio, y se describen las principales características geológicas, clima, suelos, relieve, hidrografía y el marco estratigráfico de la zona de estudio.

2.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio es mostrada en la zona encerrada en el rectángulo de la Figura 2.1, ésta se encuentra en la parte central de la Cuenca del río Orinoco, abarcando un área aproximada de 1000 km², y comprende el segmento que bordea al río Orinoco entre los poblados de Moitaco y Borbón, al Oeste de Ciudad Bolívar.

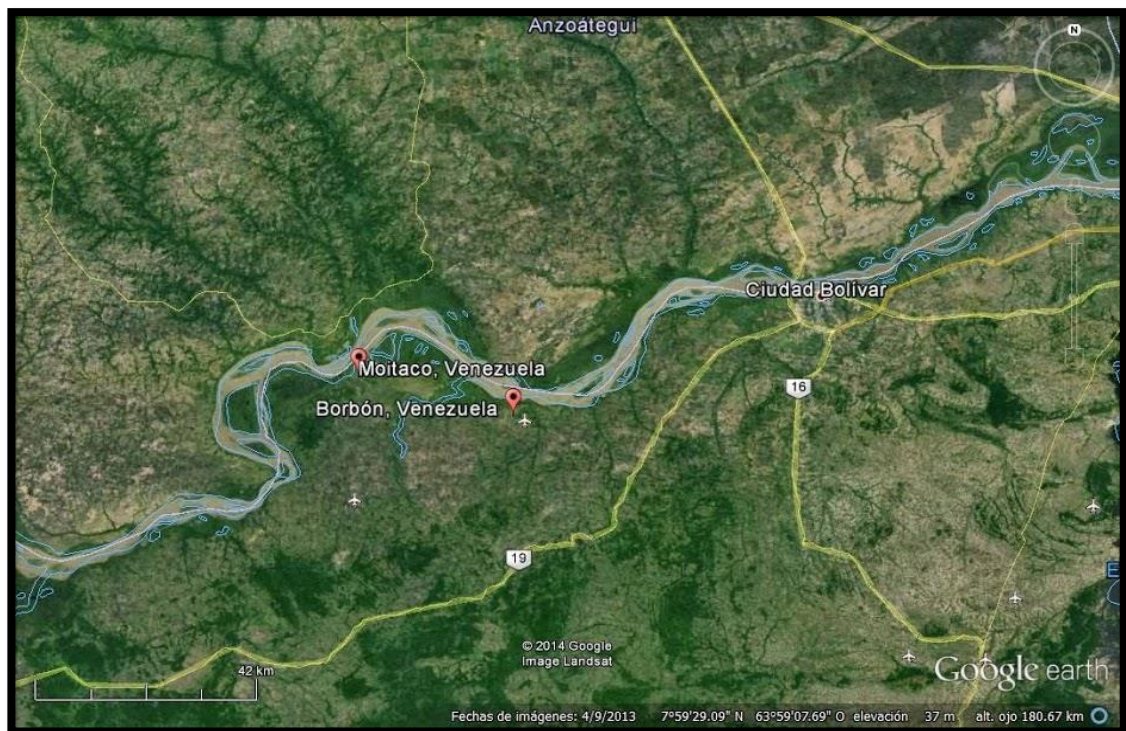


Figura 2.1 Imagen satelital de la zona de estudio (Tomado de Google Earth)

2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y NATURALES

2.3.1 Relieve

La región del oriente del país, se presenta como una altiplanicie de aproximadamente 200 a 500 metros de altitud, donde la Formación Mesa comprende el área que se desarrolla en forma de arco y que separa la región de la depresión de Unare de los Llanos Bajos por el Sur y de los Llanos de Monagas por el Este.

Los sectores más altos se encuentran al norte hacia el Macizo Oriental, hacia el centro se encuentran muy poca variación de elevaciones y hacia el sur estas planicies terminan en forma brusca. También se pueden encontrar farallones en diversos lugares de las mesas. Así mismo, por la vertiente atlántica se pueden localizar múltiples terrazas, donde la diferencia de alturas entre estas oscilan entre 3 a 5 metros (Vila, 1950).

Esta zona tan plana tiene un relieve promovido por ríos que, naciendo en las mismas mesas, la disectan formando farallones o pendientes fuertes y eventualmente sistemas de terrazas. La topografía más local de las planicies está limitada a relieves suavemente ondulados, a colinas bajas ocasionales y a roturas de pendientes con restos de laterita (Comerma y Chirinos, 1976).

La Figura 2.2 muestra un ejemplo de la forma de la topografía existente en la zona.

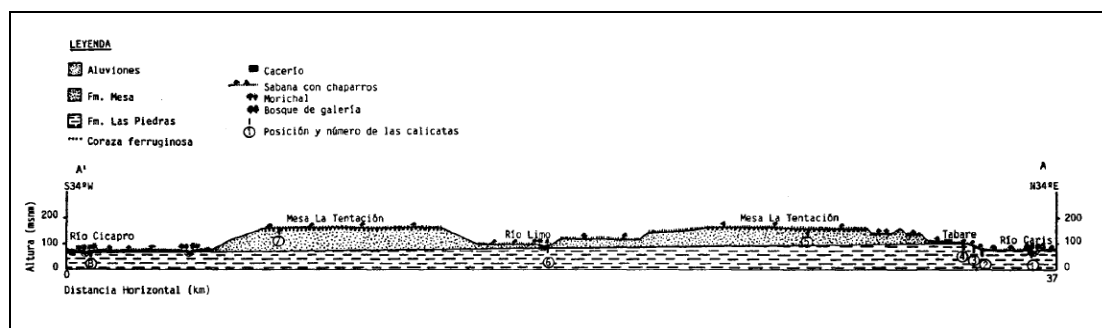


Figura 2.2. Perfil topográfico transversal y geológico de la Mesa La Tentación, edo. Anzoátegui, Llanos Orientales de Venezuela (ver transepto aproximado en la Figura 2.1, tomado de Méndez y Cartaya (1998).

2.3.2 Suelos

Los suelos predominantes en el arco de las mesas se encuentran pocos erosionados, descartando las cañadas de los ríos y quebradas, ya que esta área comprende una superficie muy plana. Esta zona presenta una alta permeabilidad y debido a ello acarrea un pasto corto y árboles esparcido ocasionado por la poca humedad del lugar (Vila, 1950).

Según Comerma y Chirinos (1976), Los suelos más comunes en las denominadas “Mesas Oriental” en Venezuela constituyen el bloque más grande y uniforme de suelos arenosos, altamente meteorizados y de baja vegetación en la sabana, estando constituidos por los Paleustults, Haplustoxs y Psamments. Todos ellos poseen en común, suelos compuestos por capas superficiales muy arenosas; aumentos variables de arcilla con la profundidad; bajas saturaciones en bases; una predominancia de arcillas caoliníticas y las arenas dominadas por cuarzo. Las diferencias entre estos suelos es el grado de aumento en arcilla con la profundidad, la estructura del subsuelo y la mayor capacidad de retención de agua en ellos con argílico, lo cual origina el crecimiento de plantas perennes como *Pinus Caribea*.

2.3.3 Climatología

Las Mesas presentan una temperatura aproximada de 26° a 28°, aumentado respectivamente hacia el sur motivado a que esta zona se encuentra influenciada por las zonas más bajas, el cual ocasiona una temperatura de 28°. Mientras que hacia los Llanos de Monagas los vientos marítimos que se cruzan por encima de este permiten las medias de 27° y 26° en las Mesas Orientales. Debido a que el área no posee mucha vegetación producto de la alta permeabilidad del suelo se originan estas temperaturas y no permitiendo un descenso térmico. Las elevaciones que rodean las fuentes del río Orinoco y que oscilan algo por encima de los 1000 metros, permiten aceptar una precipitación abundante seguramente superior a la medida de los 2000 mm. La zona de mayor precipitación se localiza hacia las cercanías del Macizo Oriental (Vila, 1950).

De acuerdo a la clasificación de Köppen (1935), La precipitación es muy

abundante hacia el estado Amazonas y la parte de Bolívar con más de 3.000 mm/año correspondiente al territorio más al sur del país. Como clima típico tropical se distinguen únicamente dos estaciones: una lluviosa de siete meses y otra seca de cinco meses. En las planicies del Orinoco, la altura sobre el nivel del mar está entre los 0 y 100 metros, las diferentes zonas climáticas se presentan a medida que se va incrementando más o menos la altitud (ver Figura 2.3).

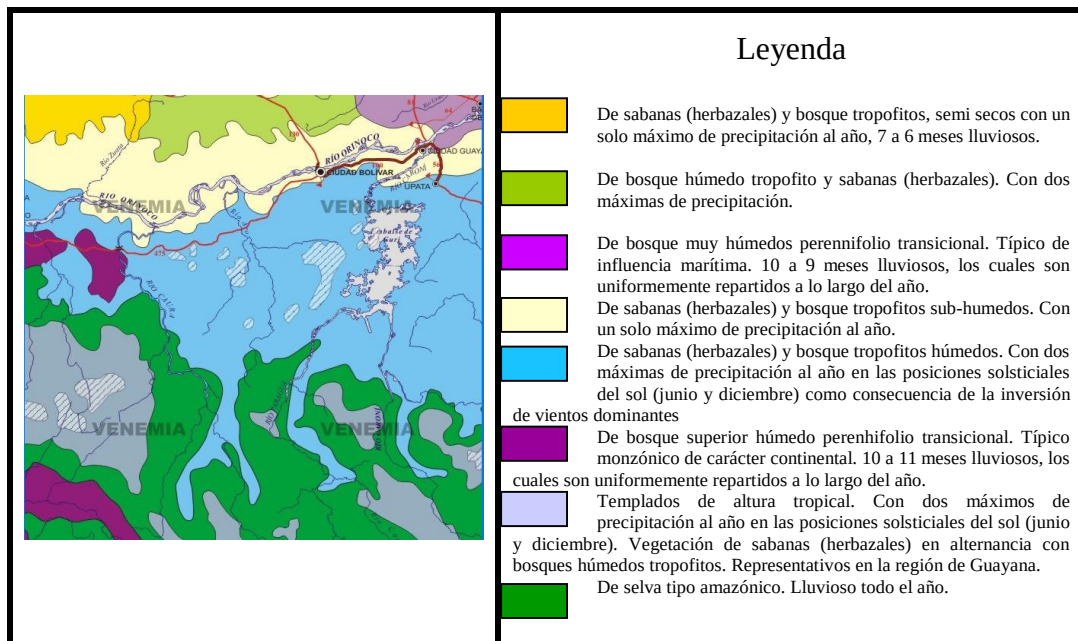


Figura 2.3. Clasificación climática del área de estudio según Köppen (Tomado y modificado de www.venemia.com).

Debido a la influencia de los climas tropicales provenientes de la cuenca amazónica y de los vientos alisios que vienen del sureste y del noreste, las curvas de precipitación en la zona de estudio varían en forma paralela desde el sur del país hacia el norte y desde la zona deltaica del Orinoco y noreste de Guayana (Figura 2.4).

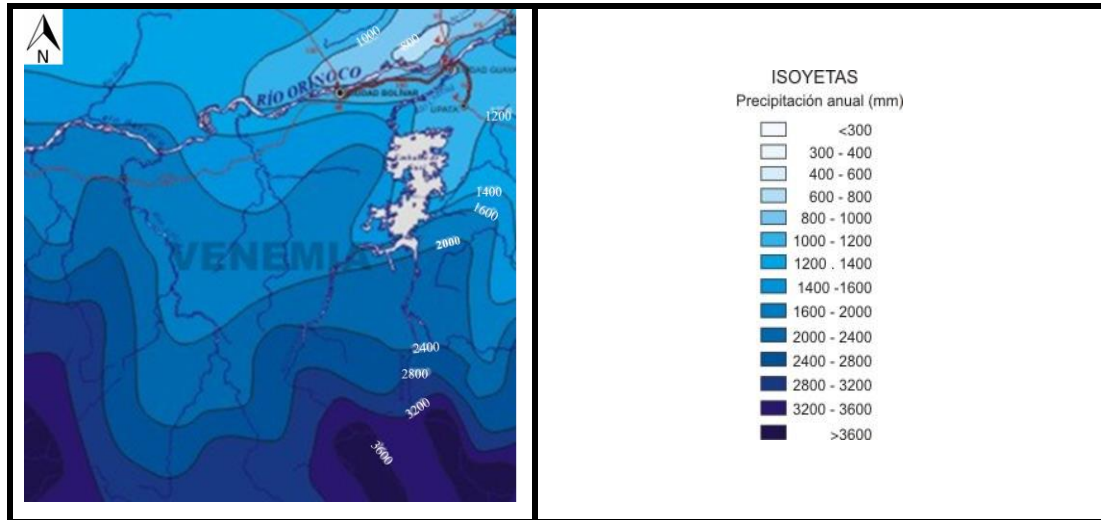


Figura 2.4. Tasa de precipitación anual promedio para el área de estudio (Tomado y modificado de www.venemia.com).

Por medio de la clasificación climatológica se pueden inferir 6 pisos térmicos en Venezuela (Thornthwaite, 1948), donde estos se relacionan directamente con la altitud y de acuerdo a las características del relieve. Estos pisos térmicos se encuentran a lo largo de la Cordillera de Los Andes, Cordillera de la Costa y Macizo Guayanés. A continuación se evidencia de manera más ilustrativa en la Figura 2.5 los tipos climáticos y de temperatura en la zona de estudio.

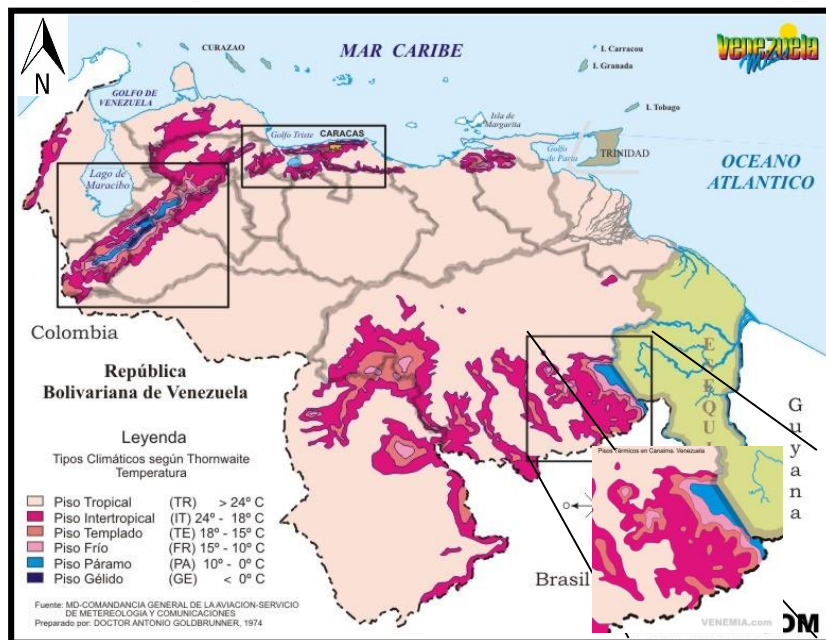


Figura 2.5. Tipos climáticos de Venezuela según Thornwaite, pisos térmicos (Tomado y modificado de www.venemia.com).

2.3.4 Hidrografía

Por ser una zona altamente permeable los ríos son de poco caudal, donde la mayoría de ellos desaparecen durante la estación de sequía al menos que reciban el beneficio de las filtraciones conservando así su caudal a lo largo de todo el año. Producto de la poca dureza de los suelos los valles fluviales son profundos. La permeabilidad en estos suelos produce una filtración muy enmarcada de las aguas de lluvia pero debido a que hacia los horizontes inferiores se hayan capas impermeables las aguas filtradas se ven obligadas a salir de nuevo a la superficie (Vila, 1950).

Las mesas despliegan las aguas hacia las vertientes del Atlántico y del Caribe. Debido al poco desnivel que existe en los sectores más altos de la región no es posible visualizar las divisorias de agua, a pesar de la separación del nacimiento del río Ipire y su afluente el Santa Lucia del nacimiento del Suatá, hace que no se evidencie la divergencia de las aguas pluviales.

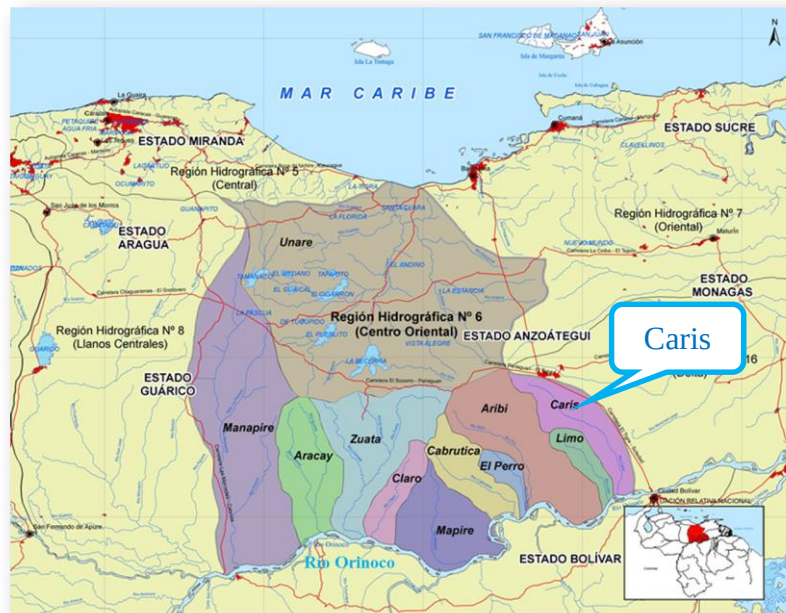
Según Vila (1950), ríos como: Ipire, Unare, Misa Cantada, Güere, Guarío, Anaco, Quiamare, entre otros provenientes de la vertiente caribiana desembocan sus

aguas en el río Unare. Estos ríos nacen cerca del borde de las Mesas con la depresión de Unare y al desembocar cambian sus características y dejan de ser caudaloso para ser un río calmado debido al cambio de montaña a llanura.

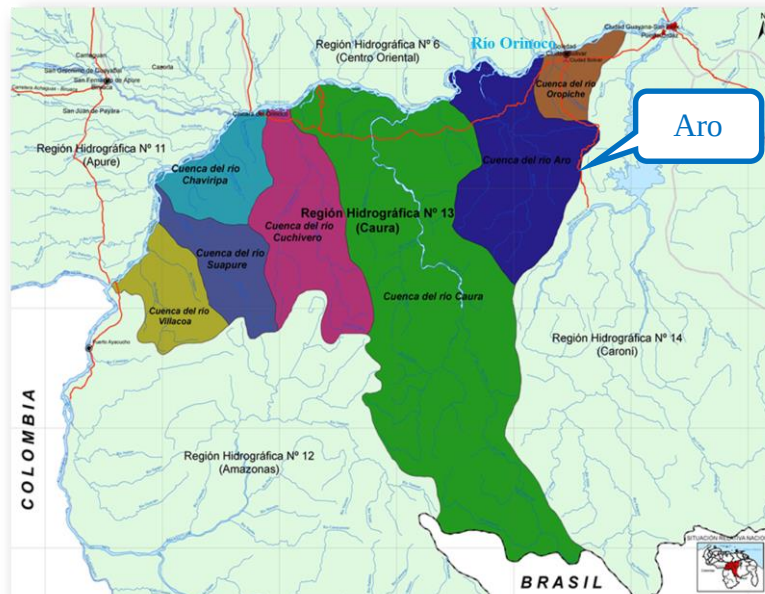
Las corrientes cuyas aguas provienen del Atlántico se dividen en dos cursos, una que va hacia el río Orinoco en dirección norte-sur y otras que terminan drenando en tierras deltaicas o al Atlántico con dirección oeste-este. Entre los ríos que van a desembocar al río Orinoco se encuentran los ríos Espino, Iguana, Suata (con sus afluentes El Chivata y el Muerto), Mapire Pao, y Caris (ver Figura 2.6). Todos estos ríos presentan una diferencia de caudal en las estaciones de sequía y lluvias. Una vez que las precipitaciones han terminado y durante un mes más o menos, el caudal no varía debido a que sigue recibiendo las aguas filtradas, pero cuando este proceso de filtración cesa, la disminución de las aguas de los ríos es considerable y las quebradas afluentes se reducen a cero.

En características generales, los ríos que conforman Las Mesas es la de forma profunda, cañadas a las mismas, originado por la inerte estructura de los suelos, lo cual explica que la erosión de los valles fluviales se haya realizado con facilidad. Es importante mencionar que, en la región no existe lagos pero si lagunas artificiales como por ejemplo, la encontrada cerca de Santa María de Ipire.

Las redes hidrográficas que comprende la zona de estudio se encuentran representadas en la Figura 2.6, donde en la cuenca Caris comprende al fundo Mata Linda y en la cuenca del río Aro se localizan las sub cuencas de Moitaco, Peñón Aro, Borbón detrítico y Borbón roca.



(a)



(b)

Figura 2.6 Red Hidrográfica que comprende la zona de estudio. (a) Cuenca Caris (b) Cuenca Aro.
(extraído de http://siga.geoportalsb.gob.ve/rios_embalses/).

2.4 GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se encuentra ubicada entre dos regiones geológicas opuestas, las cuales están divididas por el río Orinoco transversalmente, donde la parte norte es la región de los Llanos, el cual es de edad Cenozoica y la otra es la región del Escudo de Guayana de edad Precámbrico. La formación aflorante en la zona de estudio es la Formación Mesa (Pleistoceno), la cual se encuentra apoyada sobre la Cuenca Oriental y el Escudo de Guayana. A continuación se muestra en la Figura 2.7 la Formación Mesa que está representada por el color amarillo y así como también las diferentes cuencas analizadas en la presente investigación.

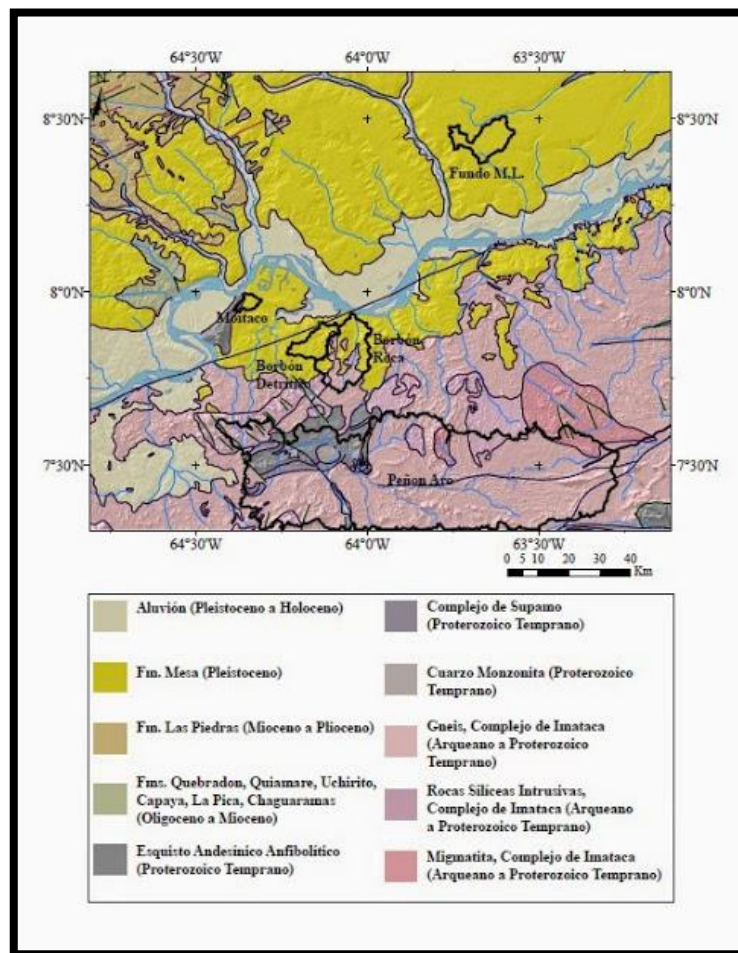


Figura 2.7 Mapa geológico de Venezuela con las cuencas de interés superpuestas (Modificado de Hackley et al., 2006).

2.4.1 Marco Estratigráfico

La estratigrafía del área está definida principalmente por la Formación Mesa, la cual es de edad Cuaternario (Pleistoceno) identificada por Hedberg y Pyre (1944). La Figura 2.7 muestra la distribución en superficie de esta formación. La litología de la formación según González de Juana (1946), *“consiste de arenas de grano grueso y gravas, con cemento ferruginoso cementadas y muy duras; conglomerado rojo a casi negro, arenas blanco-amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita. Los sedimentos de la Formación Mesa, gradan de norte a sur, de más gruesos a más finos al alejarse de las cadenas montañosas del norte; desde la parte central de Monagas al macizo de Guyana, gradan de más finos a más gruesos”*.

La Figura 2.8 muestra los estratos conglomeráticos que caracterizan a la Formación Mesa y la Figura 2.9 el área de afloramiento.



Figura 2.8. Estratos conglomeráticos de la Formación Mesa (LEV, 2010).

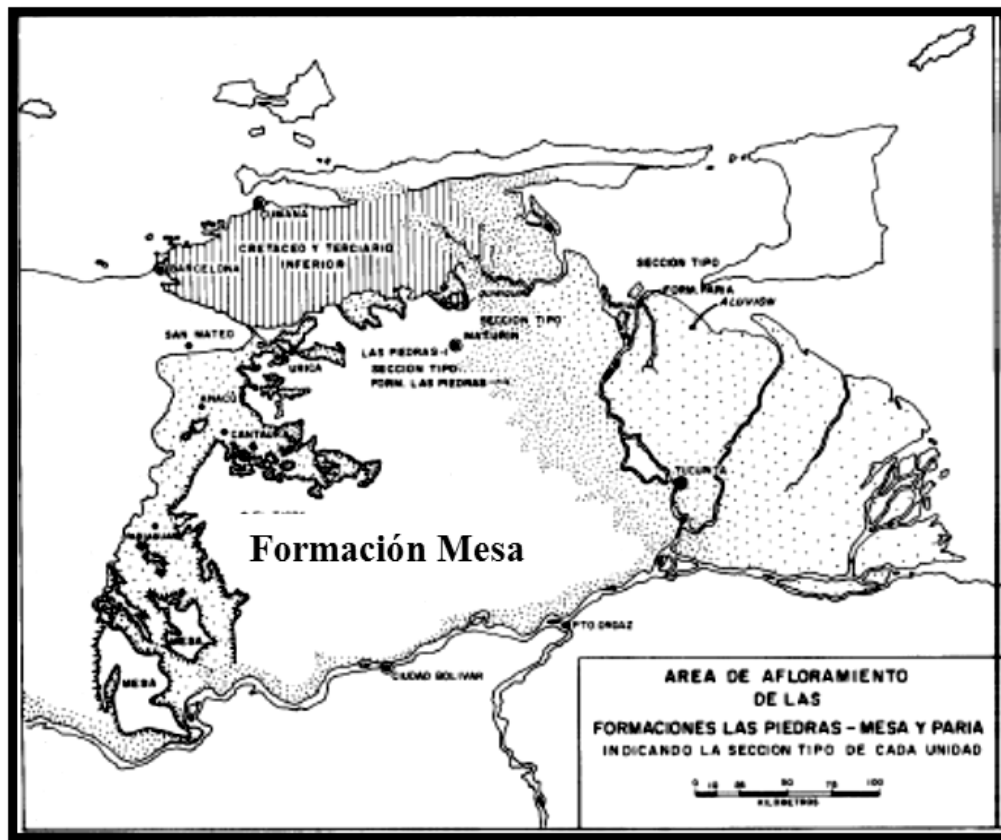


Figura 2.9 Área de afloramiento de las formaciones en la Cuenca Oriental (Tomado de: González de Juana, et al., 1980).

La Formación Mesa suprayace a la Formación Las Piedras (Plioceno) en contacto discordante producto de una erosión a finales del Terciario, esto se evidencia por medio de la litología, ya que la Formación Mesa es totalmente detrítica y terrestre (sin fósiles), correspondiendo a la primera acumulación no marina desde el Cretáceo, en comparación a la Formación Las Piedras, que es aun marina y corresponde a un ambiente predominantemente de aguas salobres (restos de plantas, peces, moluscos y foraminíferos de aguas salobres a dulces).

La estratigrafía de la Formación Mesa consiste, según González de Juana (1946), en una intercalación coalescente de abanicos aluviales, sedimentos fluviales, deltaicos y pantanosos. En cambio Zinck y Urriola (1970), consideran a la formación bajo criterios geomorfológicos y pedoestratigráfico como un depósito torrencial de ambiente semi-árido, contemporáneo con un levantamiento de la Serranía del Interior

a principios del Pleistoceno.

Estas relaciones estratigráficas indican que la Formación Mesa constituye un cambio completo de las condiciones ambientales, tanto en las zonas ablacionales como en los sectores depositacionales. Este cambio podría lógicamente coincidir con el inicio del Cuaternario (Zinck, 1970). La Figura 2.10 representa un bosquejo de lo antes mencionado.

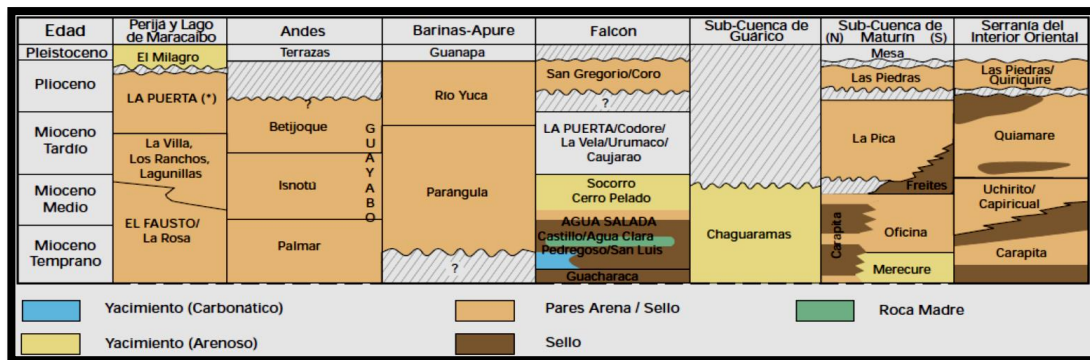


Figura 2.10. Cuadro de correlación a nivel nacional de las unidades más importantes dentro del Neógeno de Venezuela (Yoris y Ostos, 1997).

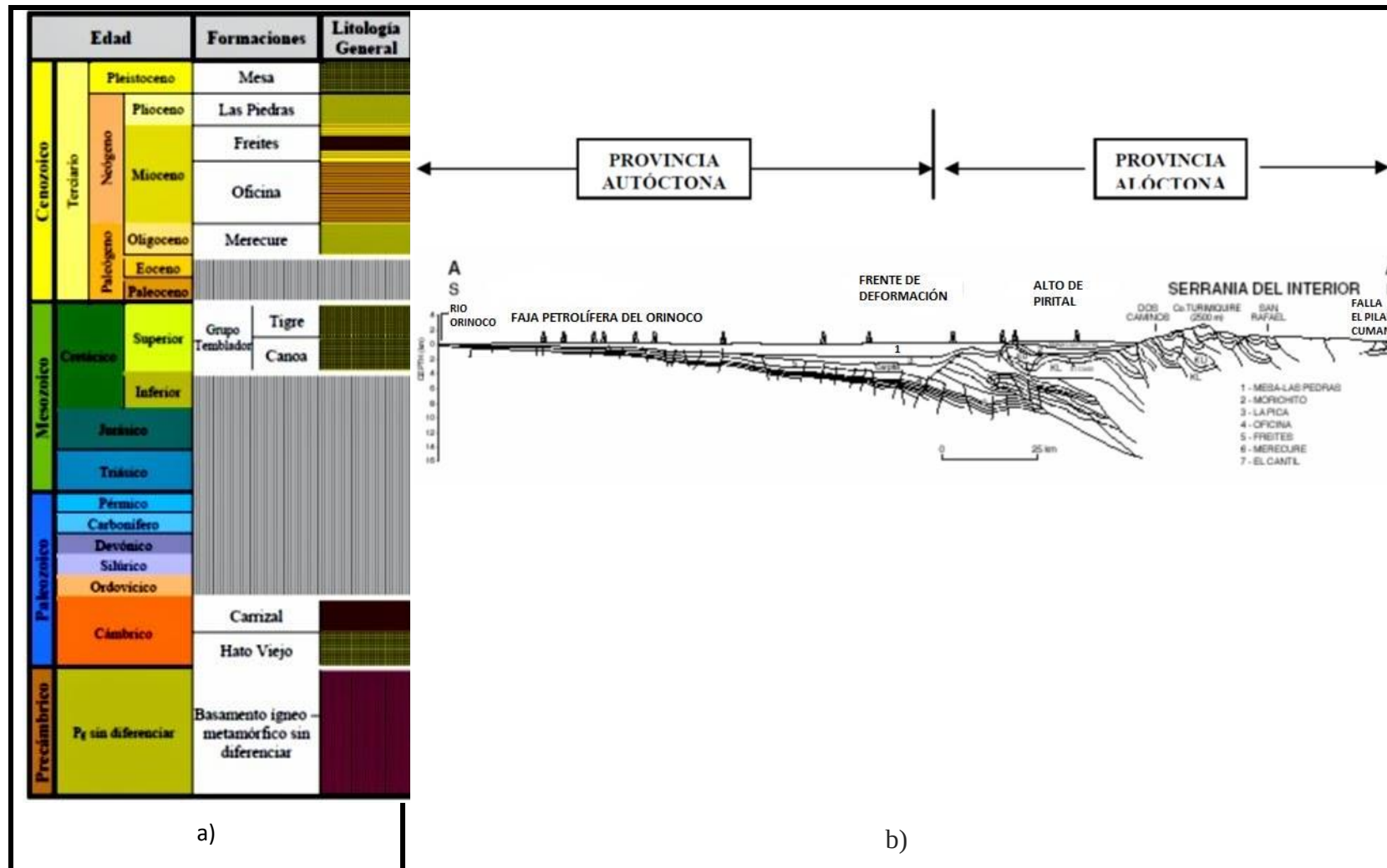


Figura 2.11 a) Columna estratigráfica y b) Corte Geológico de la Cuenca Oriente (Yoris y Ostos, 1997).

La Cuenca Oriental presenta un perfil estratigráfico (ver Figura 2.11), en el cual se puede observar el adelgazamiento de la misma hacia el Sur, donde el Cratón emerge, evidencias de esto es el mapa de gravimetría (ver Figura 2.12), presentando el aumento de los valores de Norte a Sur, esto demuestra que el Cratón es el basamento de la cuenca.

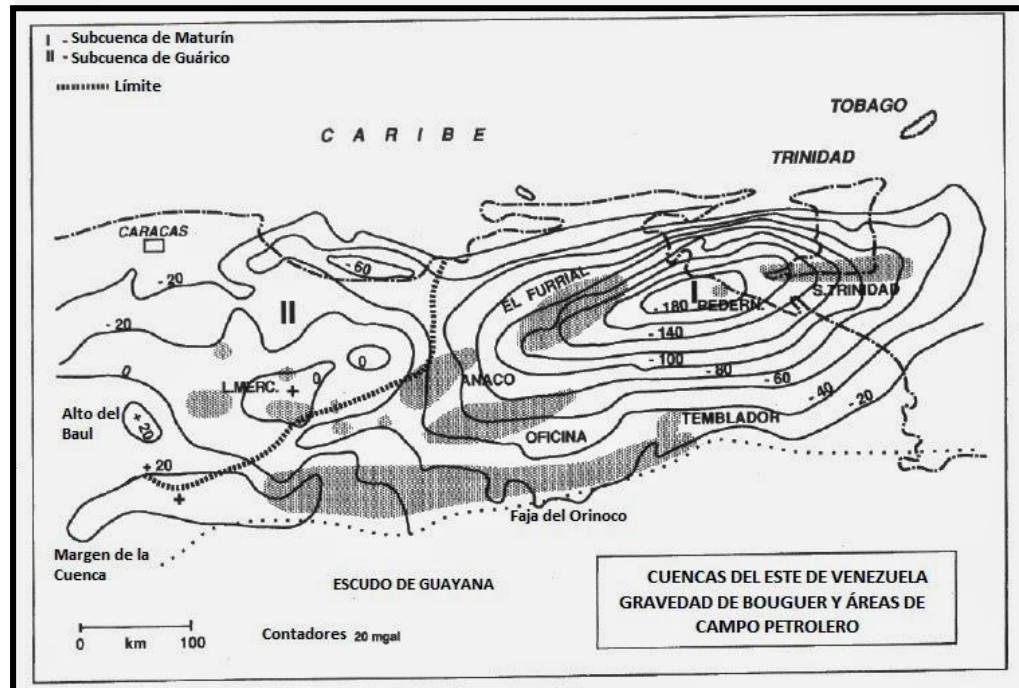


Figura 2.12. Mapa gravimétrico de Bouguer de la cuenca Oriental de Venezuela (Pratsch, 1994).

2.4.2 Aspectos Geomorfológicos de las zonas circundantes a la cuenca del río Aro

La zona circundante a esta cuenca se caracteriza por la presencia de mesetas de arenas, conglomerados, arcillas y limos no consolidados, que alcanzan los 140 metros de altura. Las mesetas se encuentran sobre un basamento Precámbrico, en este caso el Complejo de Imataca, que aflora como colinas de 20 m de desnivel, éstas son rocas cristalinas, las diaclasas horizontales presentes en la zona son producto de la descompresión causada por la erosión, mientras que las verticales se originaron por los eventos tectónicos durante millones de años. Las dos topoformas más importantes son los cerros Curiapo con 290 m de altura y La Carolina con 50 m, son cuerpos de cuarcita

rodeados de gneises que actúan como roca más blanda, generando el desnivel. Las mesetas no presentan un único nivel de explanada, sino que existe un escalonamiento, producto probablemente de un levantamiento por etapas que permitió la generación de diferentes superficies horizontales, como muestra la Figura 2.13.

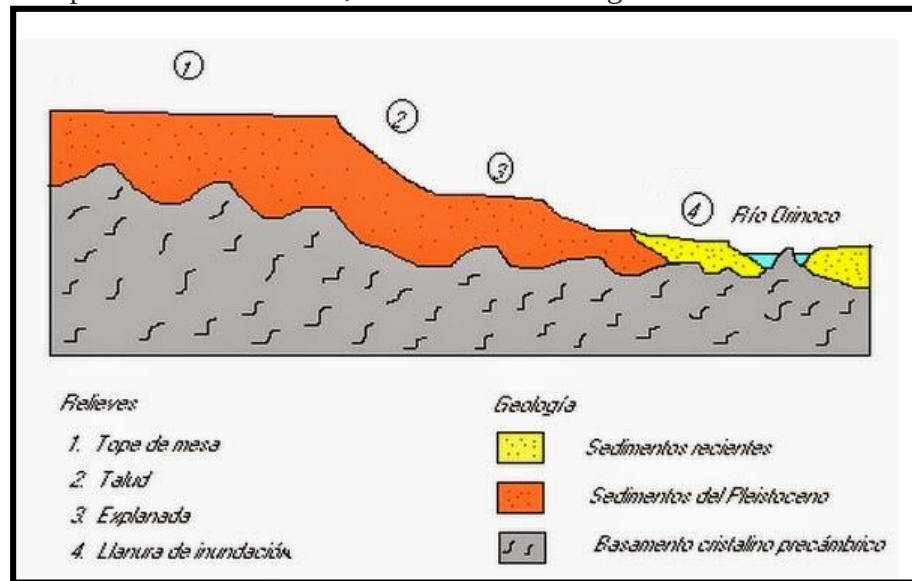


Figura 2.13. Perfil geomorfológico de la Formación Mesa, sector almacén. (Modificado de Santiago, 2003)

Los bordes de las mesetas son susceptibles a la erosión, debido a la naturaleza no consolidada de las mismas, lo que genera barrancos de pendiente aguda en muchos sitios, alguno de éstos presentan pendientes suaves debido a que el río llega hasta el basamento y por ser más resistente a la erosión, comienza a ensanchar el cauce desgastando los barrancos en pendientes más suaves y estables. La actividad humana, y la construcción de superficies de concreto y asfalto cercanos a los bordes, ha ocasionado que las mesetas no dispongan de cárcavas naturales para el desagüe, por lo que éstas tienden a colapsar de forma abrupta.

2.4.3 Marco Estructural

La zona de estudio se encuentra dividida en dos partes por el río Orinoco, al norte los Llanos Orientales, los cuales están caracterizados por el graben de Espino (Jurásico); según Yoris y Ostos (1996) se formaron por la apertura del Proto-Caribe, lo que originó valles de extensión con dirección preferencial Noreste (ver Figura 2.14).

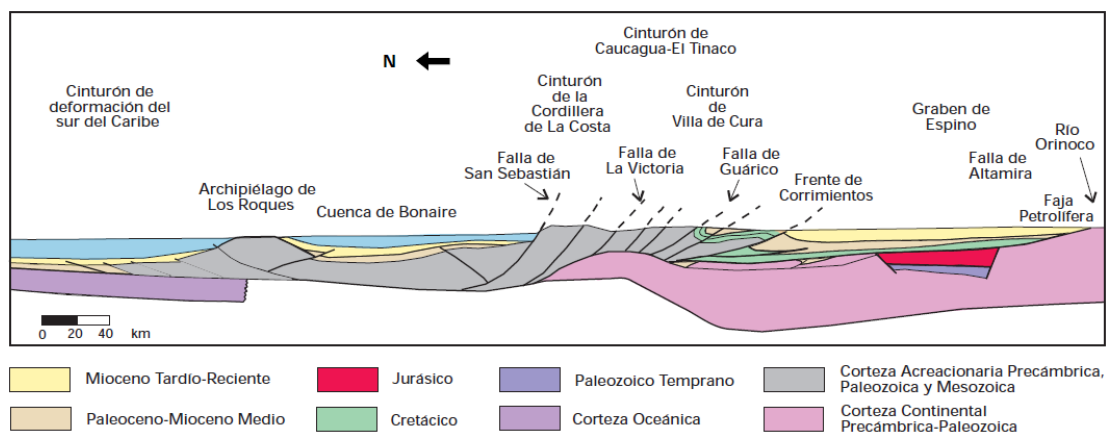


Figura 2.14. Corte geológico representando estructuras expuestas al norte del río Orinoco (Tomado de: Yoris y Ostos, 1997).

El rasgo estructural característico de la parte sur del río está influenciado por el Cratón de Guayana, marcado por la alineación tectónica de rumbo Sur-Oeste al Noreste. Esta orientación preponderante se manifiesta especialmente en los contactos geológicos y en el rumbo de los afloramientos de las rocas volcánicas. Las observaciones indican, la influencia predominante de un fallamiento normal de rumbo noreste, durante la mayor parte del ciclo Cuchivero. Por tanto, los movimientos verticales iniciales entre los diferentes bloques de la corteza, desarrollaron pliegues y fallas incipientes en la cobertura riolítica (Mc Candless, 1965).

Existe una estructura significativa representada por un sinforme este-oeste con plegamientos superpuestos y pliegues isoclinales apretados situados en la región del río Aro, en el extremo noreste de la Provincia de Imataca (Mendoza, 2005). Además, se encuentra la falla de Guri que constituye el rasgo megatectónico más relevante del Escudo de Guayana, la cual separa las Provincia de Imataca, al norte de Guri, de Pastora, al sur (considerada una falla muy antigua).

Existen dos fallas principales y sistemas de fallas menores que cortan las rocas del complejo de Imataca, donde se pueden encontrar las fallas de El Pao y Ciudad Piar-Guri, de tipo transcurrentes así como también la falla de río Claro. Igualmente se puede encontrar la falla de Santa Bárbara que se interpreta como una falla inclinada con el lado norte levantado (Kalliokoski, 1965).

En la zona de Borbón se han deducido pequeñas fallas como la de Canaguapana

con dirección sureste, la falla del río Aro con dirección suroeste- noreste y la falla de Agua Blanca, pero son escasas las evidencias de fallamiento. No obstante, los gneises encontrados en el área han sufrido un intenso cataclasismo (Ortegano, 2012).

De forma general en la Figura 2.15 se pueden observar las estructuras geológicas encontradas al norte del río Orinoco.

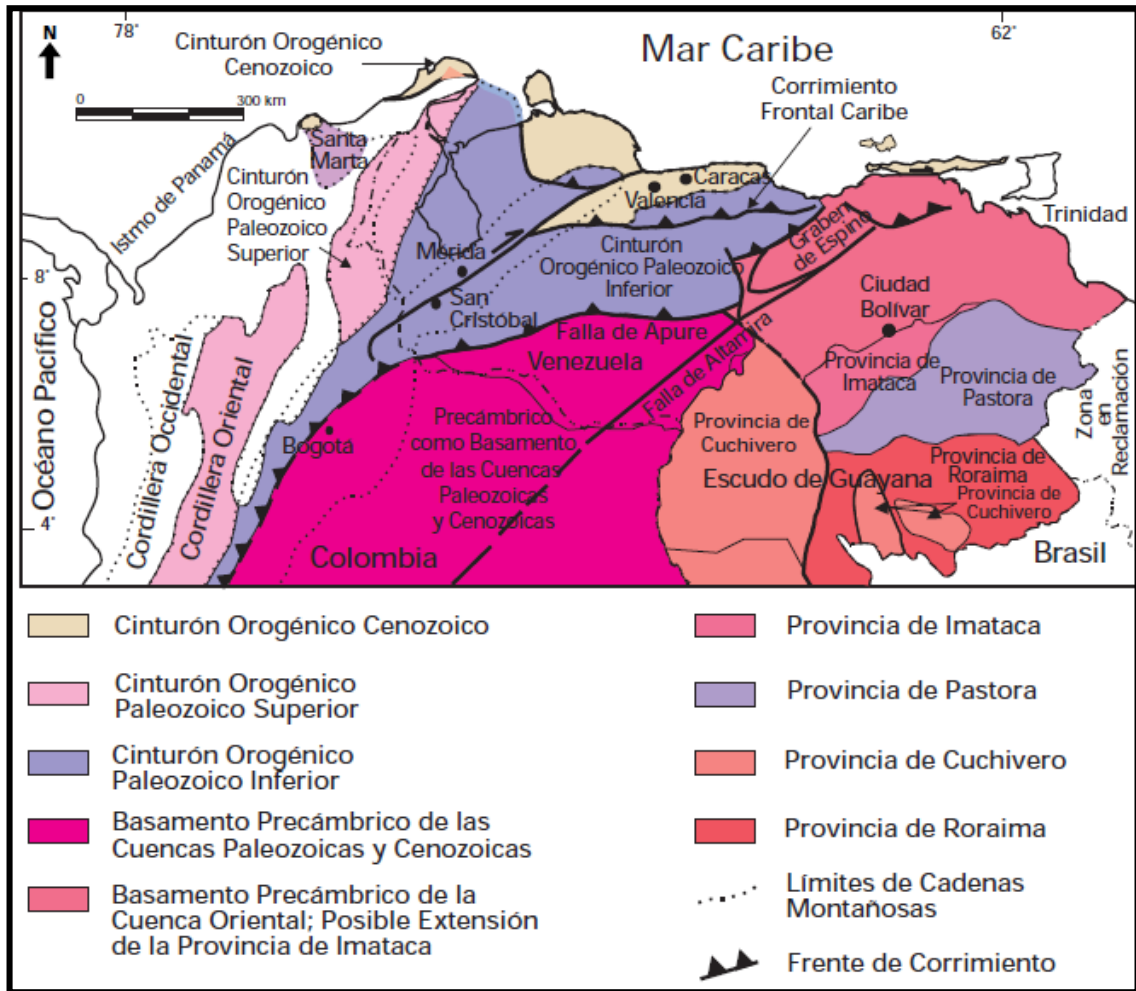


Figura 2.15. Aspectos generales relacionados con la tectónica, geología estructural y superficial del delta del Orinoco. (Yoris y Ostos, 1997).

2.4.4 Marco Tectonoestratigráfico

La Formación Mesa se encuentra en la Cuenca Oriental, la cual según Parnaud, *et al* (1995), presenta una evolución geodinámica dividida y caracterizada en cuatro

fases principales descrita a continuación:

☉ Fase de la mega secuencia Prerifting:

Las formaciones Carrizales y Hato Viejo de edad Paleozoica que están asociadas a la subcuenca de Guárico, fueron depositadas en ambientes marinos costeros a neríticos. Las secuencias encontradas son arenas de grano grueso ligeramente calcáreas con intercalaciones de conglomerados y lutitas verdes.

☉ Fase de la mega secuencia Rifting

La fase se desarrolla durante el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano. En la región central se encuentra una unidad en el Graben de Espino, que ha sido descrita como una megasecuencia compuesta principalmente de lutitas rojas con sills basálticos, con un espesor reconocido sísmicamente en semi-grábenes que puede alcanzar los 3.600 m; la cual es correlacionable con la Formación La Quinta en el occidente.

El Albiense marca el inicio de la deposición diacrónica de este a oeste de la cuenca, producto de la transgresión marina que llega a cubrir grandes zonas del Sur que se encontraban erosionadas.

☉ Fase de la mega secuencia del Margen Pasivo

La fase se caracteriza por la subsidencia pasiva del margen Norte de Suramérica desde el Cretácico temprano hasta el Eoceno. Durante este tiempo se depositaron de 3 a 4 km de rocas clásticas marinas, además de unidades carbonáticas durante el Cretácico Temprano. Las unidades cretácicas del margen pasivo inician con la deposición de la Formación Barranquín, sobre esta se depositan las unidades carbonáticas de plataforma, Formación El Cantil, que marcan el nivel máximo transgresivo y son diacrónicos de norte a sur.

☉ Fase de la mega secuencia de Colisión Oblicua

Los primeros indicios de esta fase ocurren en el Eoceno Medio, donde aparecen unidades carbonáticas en el Oeste, formaciones Peña Blanca y Caratas, producto de los surcos que se estaban formando al Norte.

La fase del Margen Pasivo finaliza en el Oligoceno Medio por la colisión de la

Placa del Caribe con la Suramericana, a partir de allí la cuenca pasa a ser de tipo ante-país. La colisión se va desplazando hacia el este, lo que ocasiona una disminución de la influencia de los frentes de corrimientos, ocasionando así la migración del surco de Guárico hacia el sur, dando origen a la Formación Roblecito, en la actualidad continua el levantamiento. La cuenca pasó a tener secuencias de Flysch y Olistostromos, propias de la actividad tectónica del levantamiento del Arco de Islas.

El cierre de la Cuenca Oriental con la colmatación de los Llanos crea la migración de los Deltas provenientes de los afluentes del Escudo para formar el Delta actual del Orinoco, esto crea las condiciones para la depositación de la Formación Mesa. González de Juana et al.(1980), relaciona las llanuras del Orinoco con una superficie subhorizontal de meteorización-erosión, la cual posee un nivel topográfico bien marcado, correlacionado con la superficie de los llanos y tomado como indicador de períodos de pleniplanación en el pasado geológico.

2.4.4.1 Origen de la Formación Mesa

Debido a las diferentes discusiones expuestas por los distintos autores, Zinck (1970), llegó a las siguientes conclusiones en cuanto al origen de la Formación Mesa:

- Explicación fluvial: empieza desde el frente de montaña por un plano inclinado de explayamiento generalizado, que nunca llega a asimilar antiguos conos de deyección. La baja proporción de limos, a su vez, indica que el medio de transporte no ha sido de tipo fluvial.
- Explicación deltaica y palustre: hasta el Este de Maturín, donde buza por debajo de sedimentos más recientes, la Formación Mesa no presenta muestra ni organización espacial, ni facies de delta. No hay brazos deltaicos ni cubetas. Las posiciones y los sedimentos de explayamiento son exclusivos. Sin embargo, es muy probable que la parte fosilizada, aguas abajo de Maturín, haya pasado progresivamente a un sistema deltaico, como ocurre hacia el Este con todas las acumulaciones más recientes.
- Explicación periglacial: se han realizado investigaciones en la Serranía del

Interior y no han revelado influencia glacial alguna, como por ejemplo evidencias de morrenas. La Formación Mesa en sí no presenta, ningún síntoma de eventuales influencias periglaciales.

2.4.4.2 Características generales descritas por las principales edades que marcaron importantes eventos geológicos en la Formación Mesa

- Pre- Cámbrico

Según Stanley (1999), estableció por medio del magnetismo y otras evidencias geológicas que entre los tiempos de la orogénesis Grenviliana, entre 1200- 1000 millones de años, y hace 500 millones de años, se comenzaron a producir los primeros grandes sucesos de fragmentación y saturación continental (ver Figura 2.16), al menos un supercontinente, probablemente dos, efectuándose hasta los eones Proterozoico y Fanerozoico. Producto de la extensa sutura, las masas que luego serían Gondwana rodearon la mayor parte de Laurasia, llamándose a estas dos partes en conjunto como Rodinia (ver Figura 2.17). Uno de los más importantes eventos de rifting de todos los tiempos, se originó entre los 800 y 700 millones de años atrás debido al fracturamiento a la mitad de Rodinia y ocasionando la ruptura de un gran bloque de Laurasia teniendo como producto al Océano Pacífico. Luego de que se formara el Océano Pacífico, el bloque remanente produjo un fragmento oriental de Gondwana.

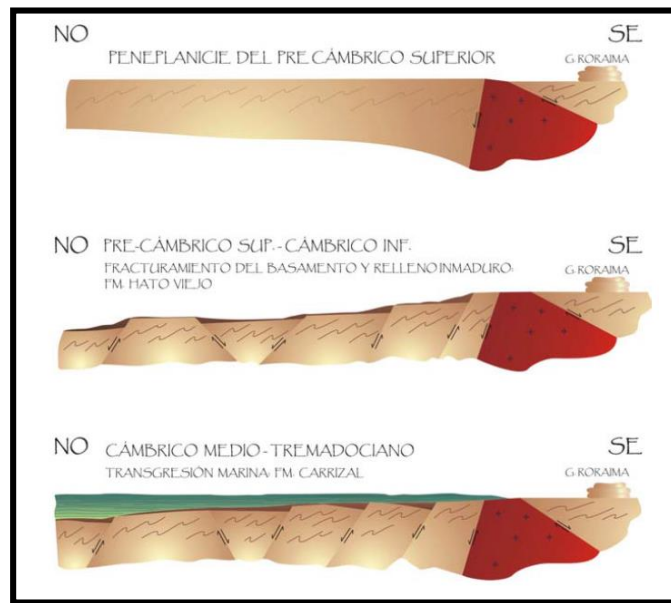


Figura 2.16 Modelo de evolución geológico (Ramirez, 1982).

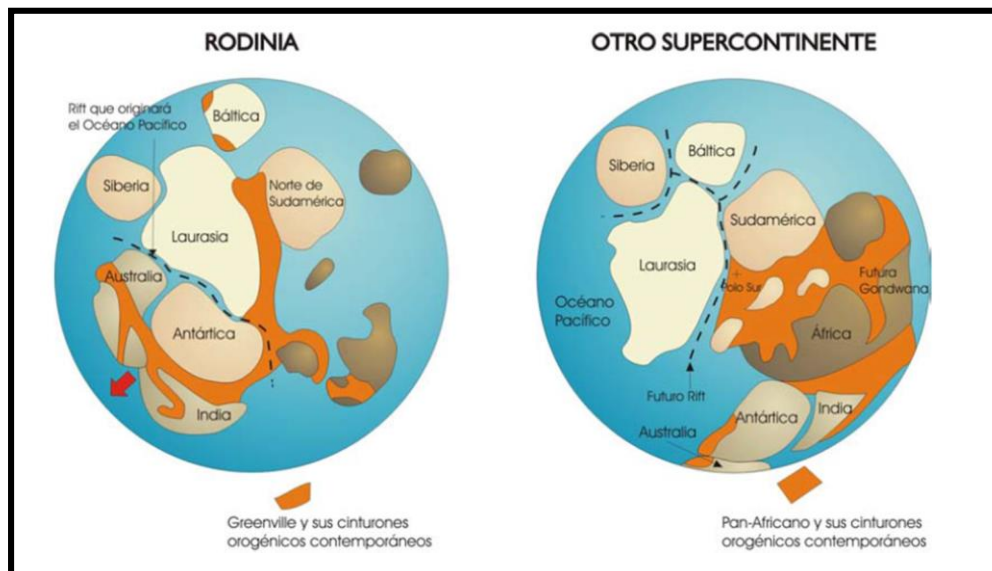


Figura 2.17. Cambio en los patrones paleogeográficos a finales de la Era Proterozoica y principios del Paleozoica (Stanley, 1999).

- Cámbrico (540- 500 m.a)

Los cratones Norafricano y de Guayana a principios del paleozoico formaron parte de un extenso margen continental que se extendía hacia el norte en dirección Geosinclinal Caledoniano, con dirección este- oeste a lo largo del borde oriental del Escudo de Brasil (Bennedetto, 1982).

En el período Pre-Cámbrico debido a que los mares eran muy extensos, las masas continentales sufrían inundaciones notables y levantamientos periódicos por tiempos aproximadamente largos (ver Figura 2.18), mientras esto ocurría los cratones terrestres se encontraban generalmente por encima del nivel del mar (Stanley, 1999). Producto de las inundaciones que sufrían los continentes, los sedimentos siliciclásticos fueron erosionados y acumulados alrededor del margen continental, formando cinturones de depositación marina, también tuvo contribución de los sedimentos derivados del cratón depositados en el cinturón más interno. Estos cinturones se encuentran alternados en el interior a lo largo de la línea de costa en el Cámbrico medio a tardío y fueron arreglados con patrón concéntrico



Figura 2.18. Imagen representativa del Periodo Precambrico (Hönninger, 2010).

- Silúrico (440- 360 m.a)

Principalmente la sedimentación en Sudamérica ocurrió en el Silúrico temprano a tardío. Los sedimentos de esta edad se encuentran alojados en Matto Grosso (Brasil) y al oeste, lo que probablemente señala una conexión entre el Amazonas y la cordillera al norte de Bolivia (Weeks, 1946).

- Devónico (415- 360 m.a)

En los periodos Silúrico y Devónico se mantuvo un alto nivel del mar con relación a la superficie de los principales cratones originada por la migración de la línea

de costa hacia el noroeste desde el Cámbrico hasta el Silúrico y como consecuencia se obtuvo la ausencia de capas al norte de América del Sur en el Silúrico Devónico relacionada directamente con un movimiento suave de ascenso del Cratón de Guayana (Benedetto y Ramírez, 1985).

- Carbonífero- Pérmico (360- 260 m.a)

En este período de tiempo se originó la orogenia llamada Herciniana, el cual describe un movimiento hacia el norte de Gondwana produciendo una colisión del continente con Eurasia.

En el Carbonífero tardío, se produjo una emersión de las placas continentales y actividad orogénica (ver Figura 2.19).



Figura 2.19. Imagen representativa del Periodo Carbonifero ((Hönninger, 2010).

La actividad orogénica para este periodo fue intensa. Se formó el supercontinente denominado Pangea, a causa de la unión entre los principales continentes a principios de la era Mesozoica (ver Figura 2.20).



Figura 2.20. Imagen representativa del Periodo Pérmico ((Hönninger, 2010).

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de facilitar la comprensión de los conceptos aquí utilizados y explicar los principios teóricos y prácticos que soportan la presente investigación, se proporciona en este capítulo los conceptos básicos, el marco teórico y la metodología usada con el objetivo de entender la metodología utilizada para discriminar la relación entre clima, tectónica y procesos superficiales de la región circundante a la zona donde se deposita la Formación Mesa.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Minerales Pesados

Se definen operacionalmente, como aquellos minerales que poseen una gravedad específica de $2,8 \text{ gr/cm}^3$ (Carver, 1971). Se encuentran clasificados de acuerdo a su origen en alogénicos y autigénicos. Los alogénicos o minerales detríticos, representan las acumulaciones derivadas de rocas fuentes y han sobrevivido a la destrucción por meteorización, abrasión y descomposición o por soluciones entre los estratos; por otra parte, los autigénicos o minerales secundarios, se han formado en el lugar donde se les encuentra (Feo- Codecido, 1956).

Es importante mencionar que dentro de los minerales pesados, existe un grupo que es resistente a los procesos de meteorización y de transporte, estos son denominados minerales pesados estables o resistatos pesados. Los resistatos son aquellos minerales de la roca fuente que permanecen relativamente intactos en el proceso de meteorización, sin sufrir cambios químicos; como ejemplo, entre éstos se tiene: el cuarzo (SiO_2), circón (ZrSiO_4), magnetita (Fe_3O_4), ilmenita (FeTiO_3), rutilo (TiO_2), entre otros.

3.2.1.1 Reconocimiento de minerales pesados

El reconocimiento de los minerales pesados presentes en las muestras analizadas en este trabajo se realizó en dos etapas. La primera consiste en la agrupación de minerales por medio de la visualización del microscopio petrográfico (ver Figura 3.1), ésta se realizó observando las características de cada grano de forma que no se vean afectadas por agentes externos, como son el color refractado y reflejado, lo que permitió establecer grupos que servirían para escoger los más representativos de cada muestra. La siguiente etapa requirió la toma de fotografías digitales por medio de una cámara conectada al microscopio, también llamadas micrografías, estas fotografías consistieron en dos grupos, unas para crear una panorámica o un mapa de distribución de los granos que permitiera establecer la ubicación de los mismos para el análisis y otras a cada grano o grupo de granos hasta conseguir 80 o más, escogidos todos en la etapa visual previamente mencionada, que puedan representar la población total de la sección montada.



Figura 3.1. Microscopio petrográfico dotado de una cámara usada en este trabajo para el reconocimiento de minerales.

3.2.2 Factores que operan en los ambientes naturales y que afectan la abundancia de los minerales pesados en los sedimentos

Los minerales pesados se ven influenciados por una serie de factores, como:

- a) Concentración de minerales pesados en la roca fuente: dependiendo de la concentración de los minerales pesados en la roca fuentes (ver Tabla 3.1), existirá una mayor o menor disponibilidad de los mismos en los sedimentos generados por los procesos de meteorización y transporte (Morton y Hallsworth, 1994; Morton, 1999).
- b) Marco fisiográfico y clima del área fuente: estos factores controlan la entrada de minerales pesados a la fuente sedimentaria, ya que de esto depende la meteorización, erosión y transporte de la roca fuente.

Tabla 3.1. Asociaciones de minerales pesados y procedencia (Feo- Codecido, 1956)

Asociación	Fuente
Apatito, biotita, brookita, circón, hornblenda, monacita, moscovita, rutilo, titanita, turmalina (variedad rosada).	Pegmatitas graníticas.
Casiterita, dumortierita, fluorita, gránate, monacita, moscovita, topacio, turmalina (variedad azul), wolframita, xenotima.	Rocas ígneas félsicas.
Augita, cromita, diopsido, hipersteno, ilmenita, magnetita, olivino, pirrotita	Rocas ígneas máficas
Andalucita, condrodita, corindón, granate, estaurolita, flogopita, topacio, vesuvianita, wollastonita, zoicita.	Rocas producto del metamorfismo de contacto
Andalucita, cianita, cloritoide, epidoto, estaurolita, glaucofano, granate, silimanita, titanita, zoicita- clinozoicita.	Rocas producto de metamorfismo dinamothermal
Barita, circón, (fragmentos redondeados), leucoxenos minerales de hierro, rutilo, turmalina (fragmentos redondeados).	Rocas sedimentarias

- c) Abrasión y destrucción mecánica durante el transporte: es un factor que afecta a los minerales pesados al momento que son liberados de la roca fuente y se incorporan al sistema de transporte. Los minerales experimentan una alteración física debida a la erosión que se refleja principalmente en el tamaño, la fragmentación y la redondez de los granos de minerales pesados, sin embargo, sus efectos están relacionados con la estabilidad mecánica de los mismos. Aunque algunos pocos minerales pesados pueden ser destruidos durante el transporte y diagénesis, el remanente de minerales pesados son comúnmente los mejores y algunas veces la única guía de procedencia (Carver, 1971).
- d) Meteorización química: el proceso de transporte involucra la meteorización, que genera una alteración química del material original (Torres, 1984). Debido al desgaste que el mineral presenta al ser transportado y también por la erosión (agentes externos), los granos de minerales pierden adherencia y se disuelven o desprenden mejor ante la acción de estos agentes físicos. Si el proceso de transporte ocurre antes de que la meteorización afecte considerablemente la estabilidad química de los minerales pesados, se mantendrán los mismos minerales en los sedimentos que los que están presentes en la roca fuente. Por el contrario, si los sedimentos son transportados después que se meteorizan, esto afecta considerablemente la estabilidad química de los minerales pesados, la relación entre éstos con los que están presentes en la roca fuente será distinta (Morton y Hallsworth, 1994).
- e) Factor hidráulico: ocurre durante el proceso de transporte, el cual está controlado por las condiciones de flujo presentes en la zona. Debido a las corrientes de agua se generan una disponibilidad relativa de granos en función a su tamaño, forma y densidad, que varía con la distancia de transporte y de ello se obtienen la disponibilidad de los minerales pesados.
- f) Post-depositacional: los minerales pesados que son acarreados al ser depositados en una cuenca estable sufren efectos de disolución incitando a la corrosión y descomposición química de los mismos. Este proceso genera

características importantes originales acerca de las condiciones de diagénesis, pero a pesar de ello la solución que ocurre en los estratos puede destruir completamente los minerales que son indicadores de procedencia como es el caso de los piroxenos, hornblenda, entre otros. La disolución puede ser causada por fluidos como las aguas meteóricas que percolan en el ambiente de depositación, o el agua expulsada de los poros del sedimento debido a la compactación de los mismos (Morton y Hallsworth, 1990 y 1999).

3.2.3 Forma de los minerales pesados

Las características de la forma de los minerales pesados son muy importante, ya que los minerales de hábito esferoidal o prismático se comportan de manera diferente que aquellos con hábito hojoso o laminar. Se tiene como ejemplo, el caso de las micas, debido a que aunque las partículas de las micas son más densas que el cuarzo, son hidráulicamente equivalentes a los granos de cuarzo tamaño limo (Morton y Hallsworth, 1994; Morton y Hallworth, 1999). Es por ello que los mejores resultados para la evaluación de procedencia serán alcanzados por la comparación de granos con hábitos similares (Morton y Hallworth, 1994).

3.2.3.1 Análisis automatizado de morfologías de minerales pesados

En este trabajo, se usó el programa *ImageJ* el cual permite el procesamiento y análisis de imágenes para PC compatible con IBM, está fundamentado en el programa NIH *Image* del sistema operativo Macintosh. En este programa se pueden adquirir, mostrar y modificar imágenes. Sólo reconoce y guarda imágenes bajo los formatos TIFF y BMP, proporcionando compatibilidad con otras aplicaciones, incluyendo programas donde se editen y modifiquen imágenes (Flores, 2013).

El ImageJ es un programa que funciona bajo ambiente Windows el cual puede ser utilizado para determinar área, media, perímetro, así como otros puntos dependiendo del interés del usuario. De igual manera, este programa permite analizar partículas, medir longitudes de trayectorias y ángulos. Este programa igualmente permite calibraciones para obtener datos reales y medidas de longitud (Ferreira y

Rasband, 2012).

Análisis visual de formas de granos: El análisis se realizó de manera subjetiva por medio de la tabla de Krumbein y Sloss (1955), este análisis es descrito en detalle en el marco teórico. En la Figura 3.2, se puede observar cómo se clasifica según la forma del grano desde un punto de vista óptico.

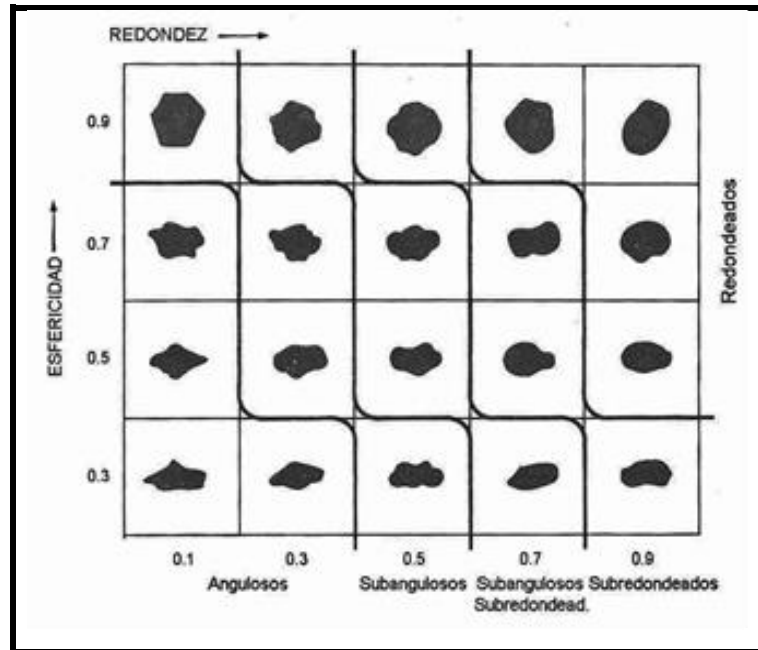


Figura 3.2. Gráfica para la determinación de la esfericidad y la redondez de granos (Krumbein y Sloss, 1955).

El análisis digital de los granos se realizó utilizando el programa ImageJ, Figura 3.3.

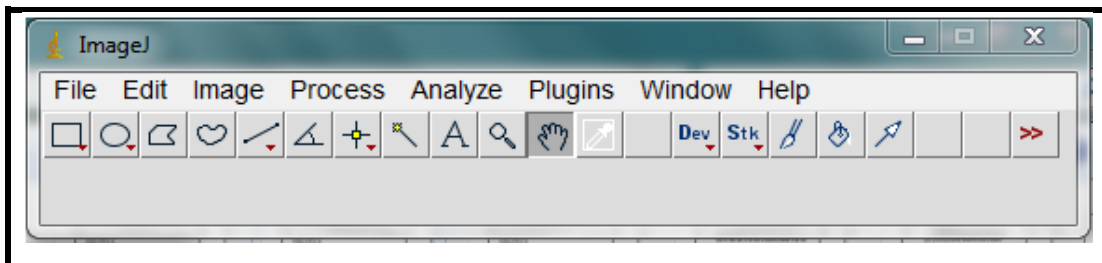


Figura 3.3. Menú del programa ImageJ.

En la Figura 3.4 se observa el grafico de esfericidad y redondez (Krumbein y Sloss, 1955) de la Figura 3.2, después de haber sido analizado por el programa ImageJ.

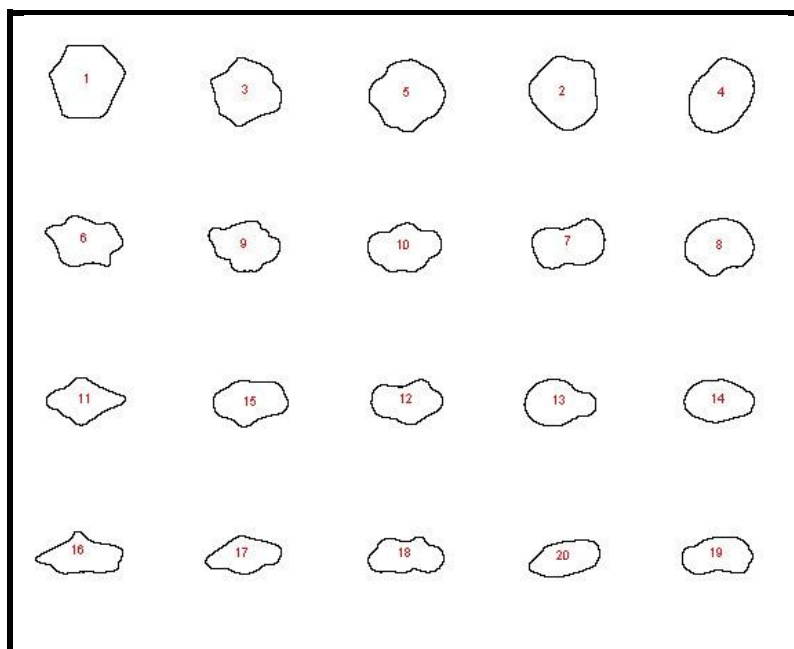


Figura 3.4. Gráfico de esfericidad y redondez basado en el programa ImageJ para el análisis digital (Krumbein y Sloss, 1955).

Luego de tomar las fotos con el microscopio polarizado, estas imágenes se abren en el programa ImageJ para comenzar su análisis, Figura 3.5.

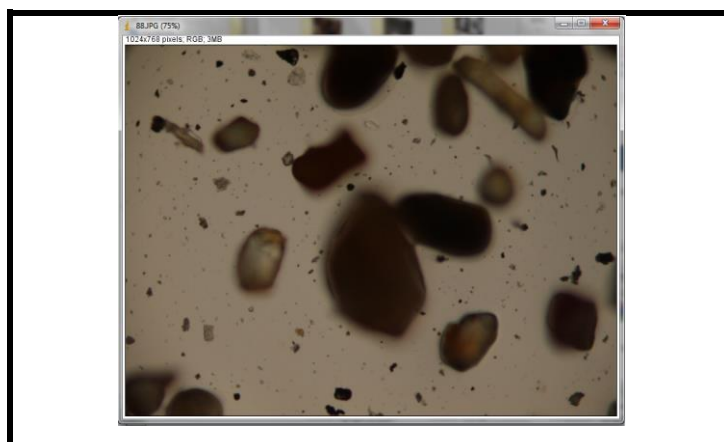


Figura 3.5. Ventana del programa donde se visualiza la fotografía a analizar.

La Figura 3.6, muestra cómo se procesan las imágenes en el programa ImageJ.

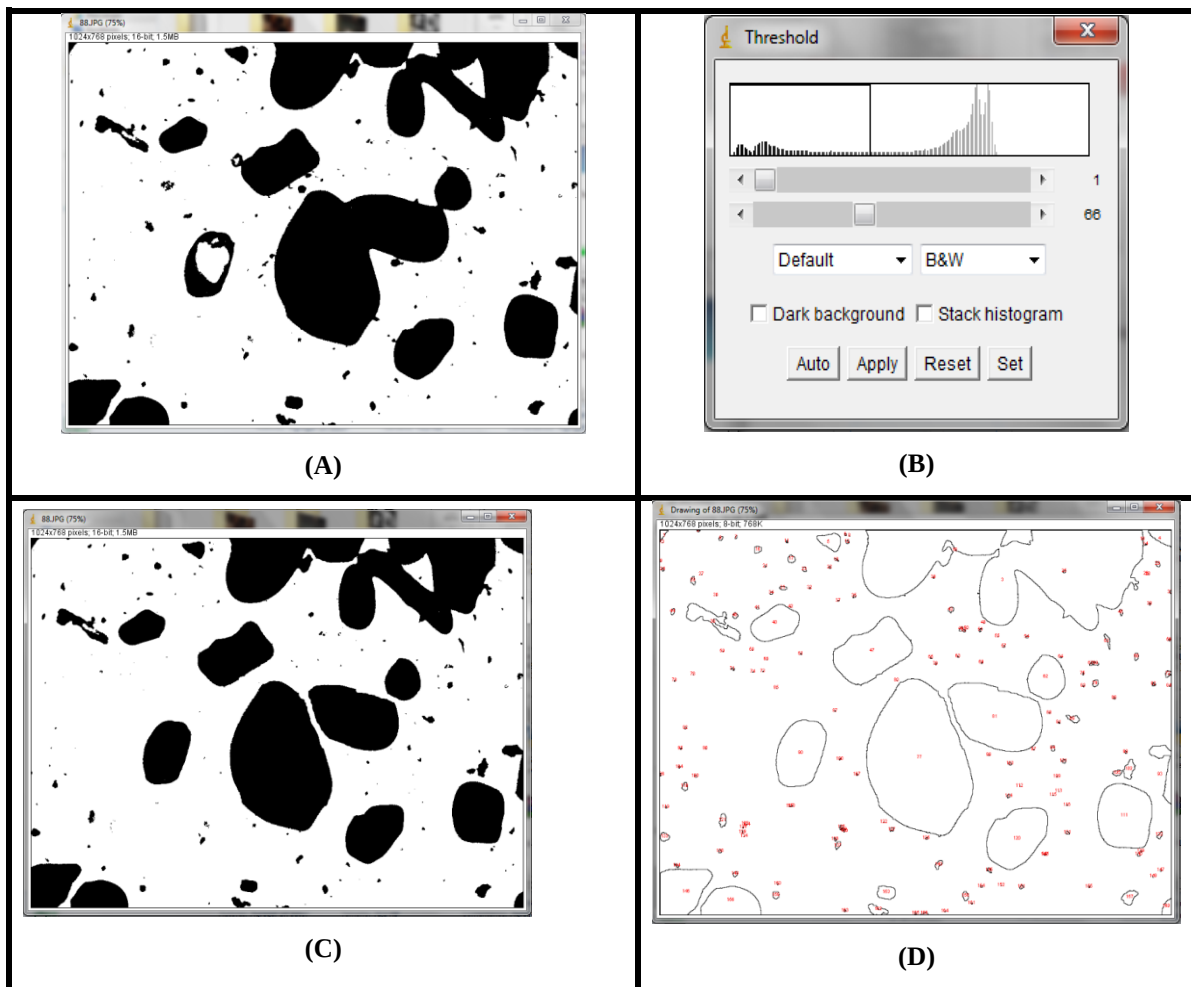


Figura 3.6. Imágenes que muestran el procesamiento de las fotos con el programa ImageJ. A) Aplicación de la herramienta Threshold para que el espectro de colores quede en blanco y negro. B) Ventana que muestra el gráfico del espectro de colores. C) Imagen editada con las herramientas del programa para que se puedan diferenciar los granos entre sí. D) Ventana que muestra el análisis digital y la separación de los granos por números para su posterior ubicación en la tabla.

El resultado que se obtiene con el programa ImageJ, consiste en una tabla de datos que se origina por medio del análisis comparativo entre las imágenes de los granos y la Figura 3.4 asociado al gráfico de esfericidad y redondez de Krumbein y Sloss (1955).

	Area	Mean	StdDev	Mode	Min	Max	X
160	467	40.418	11.369	29	20	66	101
161	7	61	2.828	60	57	65	624
162	495	25.570	15.550	15	9	66	434
163	11	55.091	7.327	45	45	66	370
164	3	63.333	0.577	63	63	64	570
165	14	57.357	5.786	56	48	66	511
166	47	55.957	5.771	49	46	66	530

Figura 3.7. Tabla de resultados arrojada por el programa ImageJ

3.2.4 Tamaño de los minerales pesados

El tamaño de grano del sedimento depositado está relacionado con la naturaleza de la roca fuente y la alteración de la misma y no producto del proceso de transporte, por el contrario se presenta el caso de la distribución del tamaño de grano, el cual es el producto de la relación entre la acción hidráulica y la abrasiva (Morton y Hallsworth, 1999). El tamaño inicial de la roca fuente de los minerales pesados se encuentra controlada por el proceso de cristalización.

Es importante mencionar, que cuando ocurre el proceso de sedimentación de los minerales pesados, son más difíciles de mover que el cuarzo, esto se conoce como “dificultad de arrastre”, debido a que “los minerales pesados de tamaño más pequeños son los menos móviles y menos transportables que su equivalente liviano”. Este hecho se debe a que los intersticios que existen entre los granos livianos más grandes se suelen “esconder” los granos pesados pequeños (Mange y Maurer, 1992).

3.2.5 Estabilidad química de los minerales pesados

Los minerales pesados poseen una estabilidad mecánica (resistencia a la abrasión) o estabilidad química, el cual está constituida por los procesos de disolución y de descomposición de los minerales (Pettijohn, 1975).

Mange y Maurer (1992), analizaron secuencias de sedimentos del Mar del Norte y resumiendo los trabajos previos sobre la estabilidad química de la estabilidad de los

minerales pesados concluyen un orden de estabilidad de los minerales pesados en los ambientes geoquímicos ácidos y básicos.

Pettijohn (1941), basado en estudios proclama que la ausencia de minerales pesados en sedimentos antiguos se debe a la remoción de minerales inestables por solución en los estratos, considera que la edad de los minerales pesados en un sedimento es un factor dominante en la supervivencia de estos en los sedimentos, el cual fue definido como el “orden de supervivencia” de los minerales pesados presentados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Orden de persistencia y orden generalizado de la estabilidad química de los minerales pesados comunes. Los minerales están ordenados en forma creciente de estabilidad (Mange y Maurer, 1992).

Orden de persistencia Modificado de Pettijohn (1992)	Orden generalizado de estabilidad química		
	Pettijohn et al, (1975)	Lixiviación ácida (Morton, 1985)	Profundidad de soterramiento, fluido de poro alcalino o salino (Morton, 1985)
Olivino Silimanita Piroxeno Esfena Andalucita Anfiboles- Ca Serie glaucofano- Riebeckita Epidoto	Muy inestable: Olivino Inestables: Hornablenda Actinolita Augita Diópsido Hipersteno Andalucita	Olivino, piroxeno Anfibol Esfena Apatito Epidoto, granate Cloritoide, espinela Estaurolita Cianita	Olivino, piroxeno Andalucita, silimanita Anfibol Epidoto Esfena Cianita Estaurolita Granate*
Cianita Estaurolita Monacita Xenotima Apatito Granate Circón Turmalina Rutilo	Moderadamente estables: Epidoto Cianita Granate (ricos en hierro) Silimanita Esfena Zoicita Estables: Apatito Granate (pobre en hierro) Estaurolita Monacita Muy estables: Rutilo Circón Turmalina Anatasa	Andalucita Silimanita, turmalina, rutilo, circón	Apatito*, cloritoide, espinela Rutilo, turmalina, circón *De acuerdo a algunas observaciones granate y apatito parecen ser más estables que el cloritoide y espinela.

3.2.7 Métodos de separación de minerales pesados

3.2.7.1 Método de la batea

Consiste en utilizar una batea con concavidad al interior (centro de gravedad) para que los minerales más pesados se vayan al fondo de la misma, al ser removido y disgregado todo el material original por el agua. Una muestra de concentrado en batea se debe tomar del material presente en las corrientes, siendo los sitios de muestreo más favorables las curvas del lecho de un afluente (donde la corriente pierde velocidad súbitamente), en sitios de acumulación de gravas, material areno - arcilloso, presencia de raíces y principalmente en el piso del cauce, donde se presentan barreras o trampas naturales. La muestra final de concentrado debe ser mínimo de 100 gr., se debe tener en cuenta el peso del material de cada bateada y el número de bateadas por muestra.

3.2.7.2 Mesa de Separación Hidrogravimétrica

Este método separa los minerales pesados de los livianos, utilizando la Mesa de Wilfley, el cual es un equipo diseñado para la separación de minerales según su densidad. Consiste en una tabla inclinada provista de una serie de separaciones no muy altas y paralelas entre sí, con movimientos continuos vibratorios, los cuales permiten la distribución precisa de la muestra hacia los depósitos ubicados en la parte baja de dicha Mesa, en la Figura 3.8 se presenta la mesa utilizada en este trabajo.



Figura 3.8. Mesa de separación hidrogravimétrica Wilfley.
Separación mediante líquidos pesados

Se debe concentrar la muestra con la finalidad de poseer una mayor cantidad de minerales pesados y para esto es necesario usar el Bromoformo (CHBr_3) obteniendo una fracción mayor o igual a $2,89 \text{ gr/cm}^3$. También se puede emplear tetrabromuro (Tetrabromoetano, acetyl tetrabromuro, TBE tetrabromoacetileno o líquido de Muthmann's). La Figura 3.9 muestra la disposición de los embudos utilizados durante este proceso.



3.2.7.3 Separación magnética

a) Separación mediante imán

Haciendo uso de un imán para la separación manual de minerales magnéticos, se acerca el mismo a la muestra, protegido con un papel parafinado o una bolsa, para evitar que los granos se adhieran directamente al imán y así facilitar la recolección, en esta fracción se hayan generalmente ilmenita y magnetita, entre otros (Gamero y Reveti, 2011).

b) Separador Magnet Lift

Una vez aplicado el imán a mano se utilizará un separador magnético de alta intensidad conocido como Magnet- Lift (ver Figura 3.10), para separar los minerales magnéticos que no fueron recolectados con el imán.

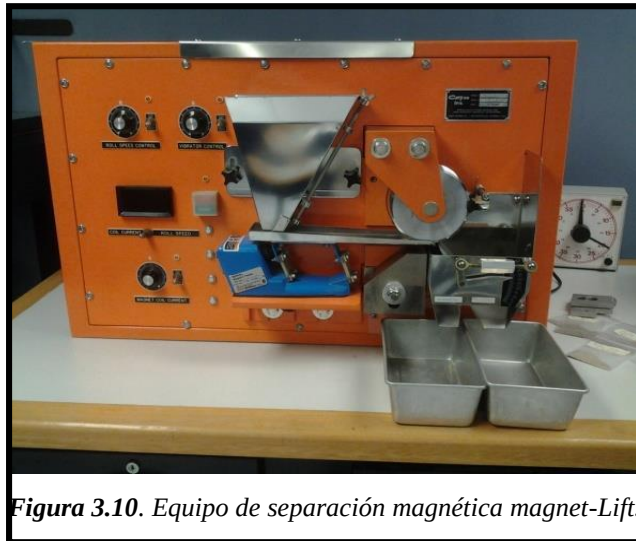


Figura 3.10. Equipo de separación magnética magnet-Lift.

c) Separador Frantz

El equipo está compuesto por un riel con dos canales, en un riel estarán los minerales no magnéticos o de menor susceptibilidad magnética y en el otro los minerales magnéticos o con mayor susceptibilidad magnética (ver Figura 3.11). Este riel se encuentra entre dos bobinas que generan un campo magnético variable controlado por un amperímetro. La muestra se introduce en pequeñas cantidades por la parte superior del equipo, los granos son interceptados por un borde que divide y dirige las dos fracciones en recipientes separados (magnéticos y no magnéticos). Este proceso se repite varias veces cambiando el amperaje para cada fracción.

Existen diferentes formas de utilizar el separador magnético Frantz, ya que se puede variar su inclinación de funcionamiento de $20^\circ - 5^\circ$ y así aprovechar tanto el campo magnético del equipo como la fuerza de atracción de la tierra.



Figura 3.11. Separador Magnético Frantz

3.2.8 Análisis de minerales pesados por Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido es un instrumento de emisión secundaria que posee un haz móvil de electrones que “barre” o recorre el espécimen en áreas seleccionadas, la cual brinda información sobre la morfología y textura de la superficie de los sólidos (granos de minerales), lo cual es indispensable para entender el comportamiento de las superficies (Skoog, 2001). Es una de las herramientas posiblemente más usadas para el estudio de minerales pesados, ya que facilita el análisis y proporciona las características morfológicas y químicas generales para la identificación del mineral.

El microscopio electrónico de barrido (MEB)

A continuación se presenta un diagrama esquemático de los constituyentes de un microscopio electrónico de barrido. A la derecha de la figura se observa cómo se encuentra compuesto el microscopio electrónico de transmisión (TEM) y a la izquierda se observa la computadora para el análisis directo (ver Figura 3.12).

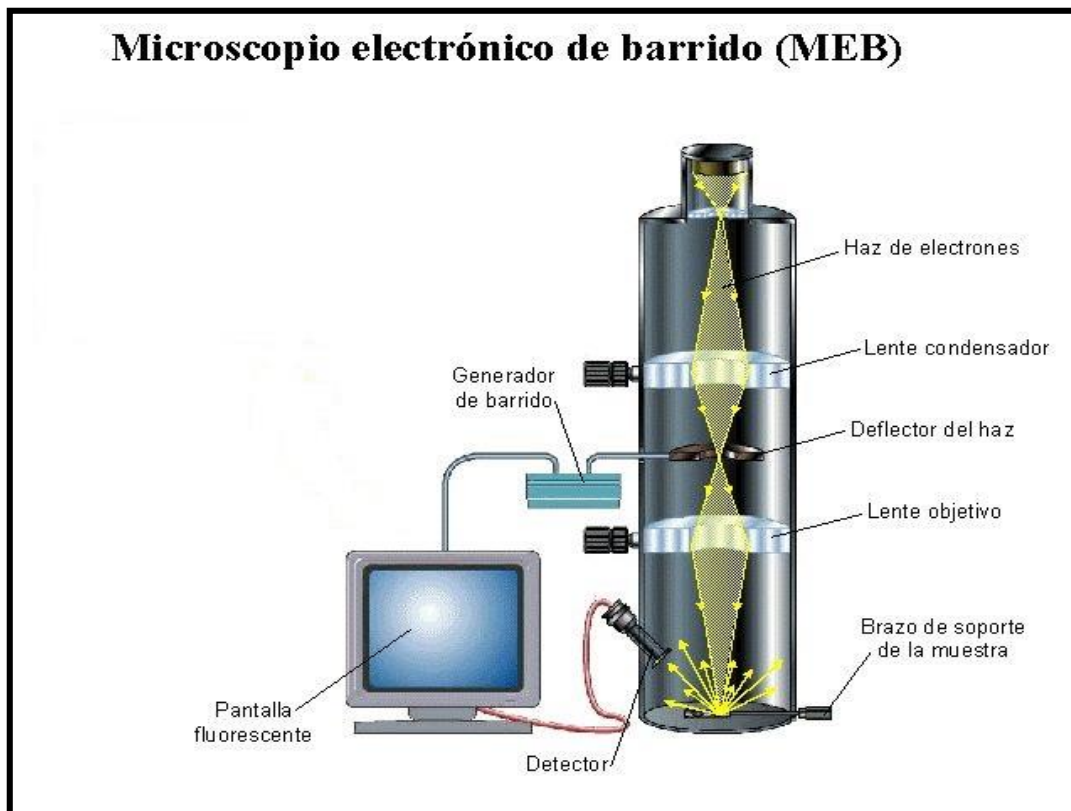


Figura 3.12 Diagrama esquemático de un microscopio electrónico de barrido (tomado de <http://almez.pntic.mec.es>)

Para realizar el estudio de las secciones montadas por medio de MEB, son estudiadas previamente para determinar los granos a ser evaluados a través de este instrumento. Luego se recubre la superficie de cada muestra con una película metálica delgada producida por bombardeo o por evaporación al vacío, en nuestro caso se utilizó una aleación de oro-paladio. Es importante señalar que se debe encontrar un equilibrio en el espesor para obtener un recubrimiento delgado y uniforme, no enmascare los detalles de la superficie y a la vez pueda ser conductor (Skoog, 2001).

El estudio con el microscopio electrónico de barrido (MEB), permite saber la composición de los minerales por medio de un detector señalando dos puntos en un mismo grano, esto arroja unas tablas que se utilizarán para identificar el mineral apoyándose en la Tabla 3.3, luego con la primera clasificación o agrupación de minerales que se hizo visualmente, se busca la identificación de todos los granos de las muestras con el soporte entre los resultados de cada sección montada, debido a que se

consiguieron similitudes entre los grupos de muestras distintas (ver Figura 3.13).

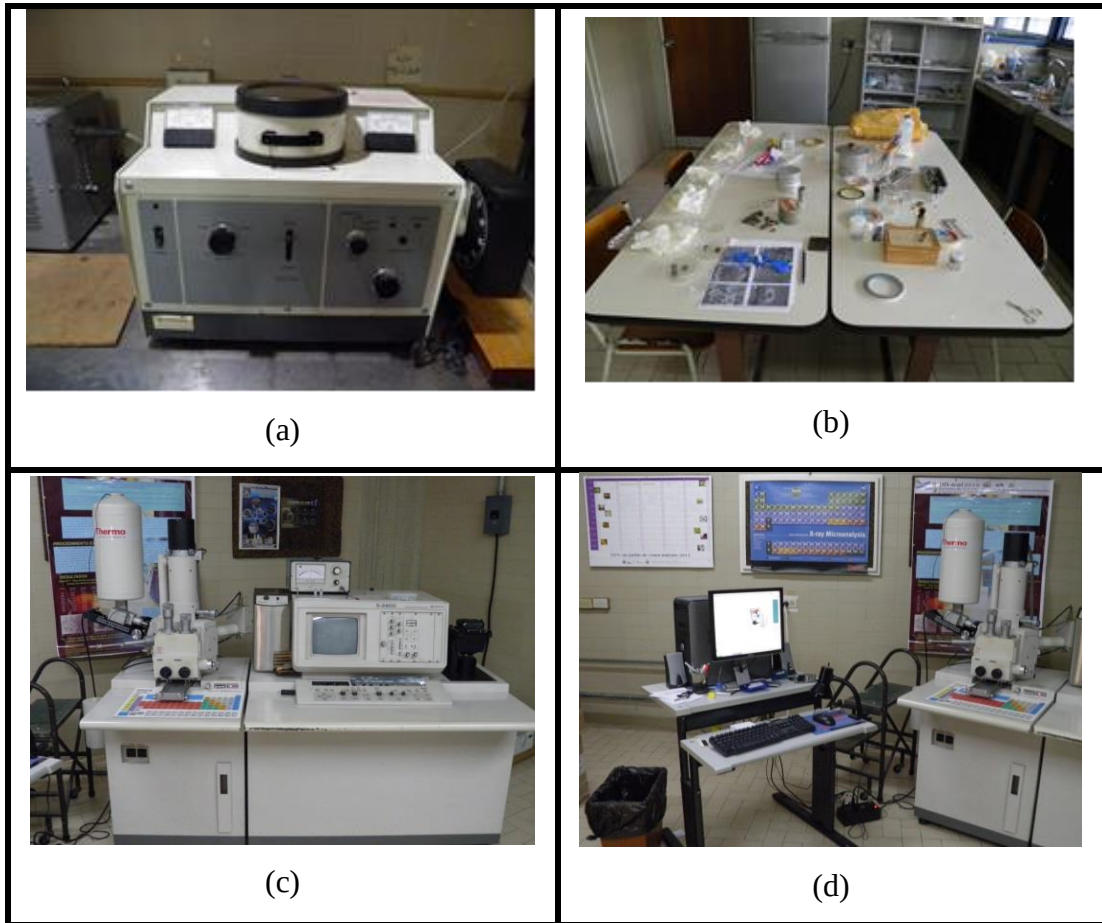


Figura 3.13. Cuadro representativo de los procesos que se deben llevar a cabo para realizar la microscopia electrónica de barrido. (a) instrumento que se utiliza para cubrir las muestras de secciones montadas en oro y paladio; b) mesa donde se preparan las secciones montadas antes de ser evaluadas en el MEB; c) a la izquierda se puede observar el instrumento donde son introducidas las secciones montadas ya preparadas a evaluar, a la derecha se encuentra el monitor donde se observan las imágenes emitidas por el MEB; d) correcciones y preparación de datos arrojados a través del MEB.

Tabla 3.3. Minerales pesados (Klein, 1997)

Nombre	Formula química	Densidad (g/cm ³)
Aragonito	CaCO ₃	2,94
Turmalina	Na(Fe,Mg,Al,Li) ₃ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	3,00- 3,25
Apatito	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F, Cl, OH)	3,15- 3,20
Espodumena	LiAlSi ₂ O ₆	3,15- 3,20
Andalucita	Al ₂ O SiO ₄	3,16- 3,20
Fluorita	CaF ₂	3,18
Hornblenda	(Na,Ca) ₂ -3(Mg,Fe,Al) ₅ (Al,Si) ₈ O ₂₂ (OH) ₂	3,20
Silimanita	Al ₂ OSiO ₄	3,23
Diópsido	CaMgSi ₂ O ₆	3,20-3,30
Olivino	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄	3,27-4,37
Enstatita	MgSiO ₃	3,20-3,50
Epidoto	Ca ₂ (Al,Fe) ₃ SiO ₁₂ (OH)	3,35-3,45
Esfena	CaTiSiO ₅	3,40-3,55
Topacio	Al ₂ (Fe,OH) ₂ SiO ₄	3,40-3,60
Diamante	C	3,50
Granate	(Mg,Fe,Mn,Ca) ₃ (Al,Fe,Cr) ₂ (SiO ₄) ₃	3,50-4,30
Espinela	MgAl ₂ O ₄	3,60-4,00
Cianita	Al ₂ SiO ₅	3,56-3,66
Estaurolita	FeAl ₄ (OH) ₂ Si ₂ O ₁₀	3,65-3,75
Psilomelana	(Ba, H ₂ O) ₂ Mn ₅ O ₁₀	3,70-4,70
Rutilo	TiO ₂	4,18-4,25
Pirita	FeS ₂	5,02
Cromita	FeCr ₂ O ₄	5,85
Pirrotina	Fe _{0,8-1} S	4,58-4,65

Tabla 3.3. Continuación

Nombre	Formula química	Densidad (g/cm ³)
Ilmenita	FeTiO ₃	4,70
Circón	ZrSiO ₄	4,68
Franklinita	(Fe,Mn,Zn)(Fe,Mn) ₂ O ₄	5,15
Monacita	(Ce,La,Y,Th)PO ₄	5,00-5,30
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5,18
Cobalita	As(Co,Fe)S	6,33
Platino	Pt	21,45
Oro	Au	19,3

3.2.9 Geomorfología Cuantitativa

La Geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la Tierra. Se institucionalizó a finales del siglo XIX y principios del XX y sus haberes se asientan en los saberes acumulados por las demás Ciencias de la Tierra que se sistematizaron a partir de la actitud ilustrada respecto de la naturaleza y sus complejas consecuencias en nuestra cultura (Duque, 2013).

La geomorfología cuantitativa consiste en la aplicación de expresiones matemáticas sobre modelos digitales de elevación las cuales permiten entender los procesos naturales que dan origen a las geoformas existentes en el paisaje (Mayer, 1990).

3.2.9.1 Cálculos de Atributos Topográficos Primarios y Secundarios

El análisis digital del terreno según Wilson y Gallant (2000), se basa en el cálculo de los atributos topográficos primarios y secundarios, donde algunas de estas expresiones son expuestas en las tablas 3.5 y 3.6. Estos cálculos permiten analizar y entender de una manera más fácil los procesos que dan origen a las geoformas del paisaje.

Según Wilson y Gallant (2000), un atributo primario es el que puede ser calculado principalmente por el modelo digital de elevación (MDE) así como se muestra en la figura 3.14 y estos atributos son: altitud, pendiente, área, longitud de la trayectoria de flujo, longitud de la cuenca, perfil de curvatura, plano de curvatura, proporción de elevación, redes de drenaje, entre otros.

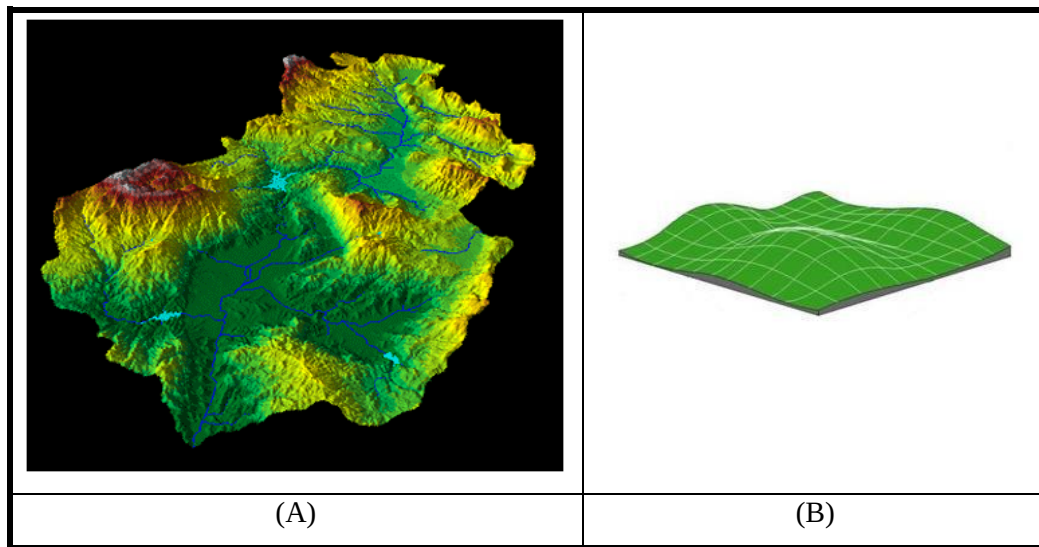


Figura 3.14. (A) Modelo digital de elevación con vista en perspectiva. (B) Representación de un modelo digital de elevación en formato ráster. (Tomado de <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//009z00000005n0000000> y <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>).

Los atributos secundarios se obtienen por las integraciones de los atributos primarios y forman un conjunto de derivados empíricamente (Moore *et al.*, 1991; 1993). Estos atributos caracterizan un modelo de paisaje por medio de la redistribución de agua en la topografía, la Tabla 3.4 resume los principales atributos topográficos primarios que pueden ser observados a partir del MDE.

Tabla 3.4. Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados mediante el análisis digital de terreno de los modelos de elevación digitales (Moore, Grayson y Ladson, 1991).

ATRIBUTO	DEFINICIÓN	SIGNIFICADO
Altitud	Elevación	Clima, Vegetación y Energía Potencial
Aspecto de altura cuesta arriba	La altura promedio del área cuesta arriba	Energía Potencial
Aspecto	Pendiente azimuthal	Insolación Solar, Evapotranspiración distribución y abundancia, de flora y la fauna
Pendiente	Gradiente	Velocidad de flujo superficial y subsuperficial, tasa de escurrimiento, precipitación, vegetación, geomorfología, contenido de agua en el suelo (% de humedad), tipo de suelo competente
Pendiente cuesta arriba	Pendiente media del área cuesta arriba	Velocidad de Escurrimiento
Pendiente de dispersión	Pendiente media del área dispersa	Tasa de drenaje del suelo
Pendiente de captación	Pendiente promedio de la cuenca	Tiempo de concentración
Área cuesta arriba	Área de captación encima de un tramo corto de contorno	Volumen de escorrentía, estado estacionario de la tasa de escorrentía
Área dispersa	Área pendiente abajo de una longitud corta de contorno	Tasa de drenaje del suelo
Área de captación (Cuenca)	Área de drenaje a la salida de la cuenca	Volumen de escorrentía
Área específica de la cuenca	Área cuesta arriba por unidad de ancho de contorno.	Volumen de escorrentía, estado estacionario de la tasa de escorrentía, características del suelo, contenido de agua en el suelo (% de humedad) y geomorfología.
Longitud de la Trayectoria de flujo	Máxima distancia del flujo de agua a un punto en la cuenca.	Las tasas de erosión, tiempo de concentración, y acumulación de sedimentos.
Longitud de la cuesta arriba	Longitud promedio de los modelos de flujos hasta un punto en la cuenca	Tasas de erosión, aceleración de flujos.
Longitud dispersa	Distancia a un punto a las afueras de la cuenca.	Impedancia (resistencia) del drenaje del suelo.

ATRIBUTO	DEFINICIÓN	SIGNIFICADO
Longitud de la cuenca	Distancia del punto más alto de las afueras de la cuenca.	Atenuación del flujo superficial.
Perfil de curvatura	Pendiente del perfil de curvatura.	Aceleración de flujo, tasa de erosión/depositación y geomorfología.
Plano de curvatura	Contorno de curvatura.	Convergencia/Divergencia de flujo, contenido de agua del suelo (%de humedad), características del suelo.
Curvatura Tangencial	Plan de curvatura múltiple para pendientes.	Proporciona la medida alternativa de convergencia y divergencia de flujo local.
Proporción de elevación	Proporción de las celdas definidas por el usuario, el círculo más bajo del centro de la celda.	Posición relativa del paisaje distribución y abundancia de flora y fauna.

A continuación se presenta la Tabla 3.5, el cual resume los atributos secundarios del terreno que pueden ser obtenidos a partir del MDE.

Tabla 3.5. Características Topográficas Secundarias que puede ser calculado mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Moore, Grayson y Ladson, 1991).

ATRIBUTOS	DEFINICIÓN	OBJETIVO
INDICES DE HUMEDAD TOPOGRÁFICA	$W_T = \text{LN}\left(\frac{A_s}{T \tan \beta}\right)$	Esta ecuación asume las condiciones de estado estacionario y describe la distribución espacial y las extensiones de las áreas de saturación (por ejemplo áreas de fuentes variables) por la formación de escorrentías en función del área de contribución cuesta arriba, transmisividad del suelo y gradiente de la pendiente.
	$W = \text{LN}\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right)$	Es un índice cuasi dinámico sustituye el área efectiva de drenaje por el área de contribución cuesta arriba y supera las limitaciones que se asume el estado estacionario en las primeras ecuaciones.
ÍNDICE POTENCIAL DEL RIO	$SPI = A_s \tan \beta$	Mide la potencia erosiva de la corriente de agua basado en el supuesto que la descarga (caudal) (q) es proporcional al área de la cuenca específica (A_s). Predice la erosión neta en el área del perfil de convexidad y la concavidad tangencial. (Las zonas de convergencia y aceleración de flujo) y la depositación neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo)

Tabla 3.5. Continuación

ATRIBUTOS	DEFINICIÓN	OBJETIVO
	$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n$	Índice de capacidad de transporte de sedimentos, se derivó de la teoría de la unidad de potencia de drenaje y es equivalente al factor longitud de pendiente. En ciertas circunstancias, la ecuación universal revisada de pérdida de suelos. Otra forma a veces de utilizar esta ecuación es para predecir los lugares de erosión neta y las áreas netas de deposición.
	$CIT = A_s (\tan \beta)^2$	La variación del índice de potencia de flujo, a veces se utiliza para predecir la ubicación de las cabeceras de los arroyos de primer orden (es decir, canal de iniciación)

Adicionalmente a los atributos mostrados en las Tablas 3.4 y 3.5 pueden calcularse a lo largo de la zona de estudio otras aplicaciones hidrológicas, como por ejemplo: cálculo de la red de drenajes, morfometría de la cuenca, puntos de captura, acumulación de flujo, dirección de flujo, orden de Strahler, y orden de Shreve, entre otros, la Tabla 3.6 resume los algunos cálculos morfométricos que pueden ser realizados para cada una de las cuencas analizadas en el presente trabajo.

Tabla 3.6. Tabla representativa de los cálculos de variables y parámetros morfométricos de la microcuenca y la red de drenaje. (Gardiner, 1981; Gregory y Walling, 1973; Guevara y Cartaya, 1991; Henao, 1998; Horton, 1945; Leopold et al., 1964; Monsalve, 2000; Pastrana, 2003; Pérez, 1979; Senciales, 1998; Smith y Stopp, 1978; Strahler, 1964; Strahler, 1984)

Variable	Parámetro	Símbolo	Ecuación	Dimensión
Escala de la cuenca	Área	A	-	L ²
	Perímetro	P	-	L
	Longitud	L	-	L
	Ancho	W	-	L
	Diámetro	D	$D = (4A/\pi)^{1/2}$	L
Gradiente y forma del relieve de la cuenca	Altura máxima	H	-	L
	Altura mínima	h	-	L
	Relieve máximo	H _b	$H_b = H - h$	L
	Radio del relieve	R	$R = H_b/L$	-
	Pendiente mediana	S _{md}	Construcción gráfica	%
Forma de la cuenca	Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal	S _m	$S_m = (\sum \sqrt{S_{mi}/m})^2$ $S_{mi}^{(1)}$ $S_{mi}^{(2)}$	%
	Elongación	S _e	$S_e = A^{0.5}/L$	-
	Factor forma	F _f	$F_f = A/L^2$	-
	Coefficiente de compacidad	K _c	$K_c = P/A^{1/2} \cdot 0.28$	-
	Longitud de la corriente principal	L _{cp}	-	L
Extensión de la red de drenaje	Longitud total de las corrientes	C _t	$C_t = \sum \text{longitud de las corrientes}$	L
	Densidad de drenaje	D _d	$D_d = C_t/A$	L/L ²

Donde S_{mi} = pendiente media de cada intervalo del perfil longitudinal de la corriente principal; m = número de intervalos en que se divide el perfil longitudinal de la corriente principal y N_1 = número de corrientes de orden 1.

Para realizar todos estos cálculos de todos los atributos tanto primarios como secundarios del terreno y también los cálculos hidrológicos se usó el Sistema de Información Geográfico (SIG), ArcGIS 9.3.

3.2.9.2 Índices de Erosión

Para cálculos de la tasa de gasto de energía potencial en flujo de agua, el índice de erosión puede ser calculado de distintas maneras (Bermúdez, *et al.*, 2012), como a continuación se exhibe:

$$\dot{e} = k A_s^m S^n$$

$\dot{e}$: Tasa de erosión local.

A_s : Área de drenaje aguas arriba (usada como una aproximación para la descarga).

S : Pendiente local.

k : capacidad de erodabilidad del terreno, el cual depende fuertemente de la litología.

m, n y k : Constantes.

Si se desea obtener el índice de erosión con precipitación, se realiza la sumatoria de las variables incorporando la tasa de precipitación (P) y así poder estudiar su influencia sobre el índice de erosión,

$$\dot{e}_p = \sum (A_p P)^m S^n$$

$\dot{e}_p$: Índice de erosión con precipitación.

A_p : Área de cada píxel que compone la cuenca.

P : Patrón de precipitaciones promedios en metros/año registrados en la cuenca.

Esta expresión también permite estudiar la influencia sobre el índice de erosión.

Bermúdez et al., (2012), designa $\dot{e}_p$ al índice de erosión con precipitación.

3.2.9.2.1 Índices de erosión según la tasa de gasto de energía potencial en flujo de agua

- Poder de flujo total o "Total Stream Power " (TSP): La erosión es controlada por el poder de flujo de agua que puede existir en la cuenca, en este caso $m=1$, y $n=1$.

$$TSP = A_s S$$

- Poder de flujo unitario "Stream Power Per Unit Channel Width" (USP): La tasa de erosión es controlada por la amplitud o ancho del canal, en este caso: $m = \frac{1}{2}$, $n = 1$. Así,

$$USP = \sqrt{A_s} S$$

- Poder de flujo de cizalla o "Fluvial Shear Stress" (SSP): La erosión es controlada por el caudal de agua. En este caso $m = \frac{1}{3}$ y $n = \frac{2}{3}$. Quedando la siguiente expresión:

$$SSP = \sqrt[3]{A_s S^2}$$

3.2.9.3 Relieve

La diferencia entre dos rásters origina el cálculo del relieve. Donde uno de los ráster es el proporcionado por la máxima elevación dentro de un radio variable (1, 3 y 5 km) y el otro es proporcionado por el modelo de elevación digital del área de estudio (Bermúdez, *et al.*, 2012).

$$R = H_r - h$$

H_r : ráster obtenido por la máxima elevación en un radio r .

h : ráster de elevaciones dato por el MED.

3.2.9.4 Índice de Humedad

Es un índice cuasi dinámico, es decir, sustituye el área efectiva de drenaje por el área de contribución cuesta arriba y supera las limitaciones que se asume el estado estacionario en las primeras ecuaciones.

El cálculo de los índices de humedad ocupa las condiciones de etapas estacionarias y caracteriza la distribución espacial y las extensiones de las áreas de saturación (por ejemplo áreas de fuentes variables) por la formación de escorrentías en función del área de contribución cuesta arriba, transmisividad del suelo y gradiente de la pendiente, adicionalmente este proporciona propiedades del suelo, así como también la pendiente del terreno. Este índice puede ser calculado mediante las siguientes expresiones:

$$WI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan(\beta)}\right)$$

$$W_T = \ln\left(\frac{A_s}{T \cdot \tan(\beta)}\right)$$

Estas expresiones son conocidas como índice de humedad (WI) e índice de humedad topográfico (WT) respectivamente. En estas expresiones A_s es el área de drenaje, β es la pendiente del terreno y T es la topografía.

3.2.9.5 Índice de capacidad de transporte de sedimentos

Es un índice que estima el potencial topográfico para la erosión o deposición de sedimentos a través de una expresión que constituye el cambio en la capacidad de transporte de los mismos en la dirección del flujo. Puede predecir los lugares de erosión neta y las áreas netas de deposición. Viene dado por la siguiente expresión:

$$LS = (m+1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin(\beta)}{0.0896} \right)^n$$

LS = Índice de la capacidad de transporte de sedimentos

A_s = Área de drenaje específica

β = es la pendiente local

m y n =son constantes análogas a los valores para los índices de erosión TSP, USP y SSP. En el caso particular de este Trabajo Especial de Grado consideramos que $m=n=1$.

3.3 MARCO METODOLÓGICO

A continuación se describe brevemente la metodología aplicada para cada una de las fases consideradas en este Trabajo Especial de Grado:

3.3.1 Pre campo

- Recopilación bibliográfica y/o hemerográfica: Libros, tesis, artículos, informes técnicos.
- Recopilación cartográfica: Mapas geológicos, mapas topográficos, mapas de precipitaciones, fotografías aéreas, imágenes de satélite y de elevación digital.
- Uso del programa Arcmap 9.3 para delimitar la geometría de cada una de las cuencas a estudiar.
- Elaboración del mapa fotogeológico y planificación del campo (vías de acceso, afloramientos a visitar, etc). En el mapa se observaran las estructuras, el drenaje haciendo la división por cuencas, las unidades en las que está dividida y vías de acceso de la zona, con esto se escogerá el afloramiento a estudiar según la viabilidad del lugar de estudio.

3.3.2 Campo

El campo tuvo una duración de 15 días, en estos trabajos se recolectaron 45 muestras (de 5 a 10 kilogramos de peso) entre rocas in-situ y sedimentos actuales de río Orinoco. Todas las muestras detríticas pertenecen a diferentes tributarios de la parte occidental y central de la cuenca del río Orinoco. De estas muestras fueron analizadas en el presente trabajo 5 de ellas. Los materiales usados fueron mapas de la zona, brújula, GPS, libreta, piqueta, palas, bolsas plásticas, coladores y bateas.

3.3.3 Laboratorio y oficina

1. Se compiló del mapa geológico-estructural de la zona de estudio, y cálculos de tasas de erosión y medidas geomorfológicas cuantitativas de la zona mediante el programa *Arcmap* 9.3.
2. Se analizó las propiedades del terreno mediante geomorfología cuantitativa usando *Matlab* y otros códigos desarrollados en *ForTran* por el Prof. Bermúdez. Con el estudio de los índices topográficos primarios y secundarios del terreno se obtendrán una serie de datos, luego serán integrados a una base de datos donde existen las observaciones tomadas en el campo. Los códigos numéricos antes mencionados fueron utilizados con la finalidad de calcular las tasas de erosión teórica y relacionarlas con tasas de incisión calculadas a partir de observaciones de campo y otros datos.
3. Se realizó un análisis preliminar de procedencia sedimentaria, mediante análisis de forma, como redondez, esfericidad sobre minerales pesados pertenecientes a terrenos circundantes de la Formación Mesa.
4. Se realizó la separación y concentración de minerales pesados siguiendo la metodología que se describe a continuación:
 - Separación de los minerales pesados por sistema hidrogravimétrico
 - Separación magnética de minerales pesados mediante el imán a mano, posteriormente se pasa la muestra por el magnet-lift.
 - Separación por líquidos densos (bromoformo, densidad > 2.9 grs/cm³)
 - Separación magnética de la fracción pesada por el Frantz
 - Separación por líquidos densos (diyodometano, densidad > 3.3 grs/cm³)
 - Montaje de los minerales en un portaobjeto y fijado del mismo mediante resinas, para esto se elaboraron 10 secciones montadas de las muestras pertenecientes a 5 cuencas en porta objetos, dos secciones para cada muestra, una para la fracción no magnética y otra para la sección no

magnética, esto se hace colocando una pequeña cantidad de resina en un área definida y encima se esparce de manera homogénea una parte de la fracción de sedimento a estudiar.

- Una vez que las muestras son montadas se realizó el análisis visual morfológico y descriptivo de los granos que constituyen las muestras.
- Se realizó el cálculo de las medidas morfométricas mediante ImageJ.
- Se realizó el análisis por microscopía electrónica con la finalidad de reconocer granos oscuros cuya identificación visual había sido difícil, esto también permitió validar la identificación óptica.
- Se calcularon los atributos primarios y secundarios del terreno para cada cuenca y zona de estudio.
- Se construyeron gráficas y tablas que facilitaron la discusión de los resultados.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

A continuación se muestran en este capítulo los diferentes resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación. Estos serán divididos en dos partes: la primera, relacionada con los análisis morfo-texturales, químicos y mineralógicos de los minerales pesados existentes en las muestras recolectadas a lo largo de la zona de estudio. La segunda parte de los resultados, comprende los parámetros obtenidos del análisis geomorfológico cuantitativo, es decir, el análisis digital del terreno. En este capítulo se presentan una serie de mapas y tablas que serán discutidos en el capítulo V.

4.2 MINERALES PESADOS

Las cinco cuencas de interés son denominadas Borbón detrítico, Borbón roca, Fundo Mata Linda, Moitaco y Peñón Aro, de éstas se concentraron los minerales pesados y así son separadas en dos subgrupos según la fracción que arrojará el separador magnético isodinámico Frantz, es decir, estas son minerales magnéticos y no magnéticos, en total se dispone de 10 secciones de minerales pesados.

4.2.1 Análisis morfo-textural

Las muestras obtenidas fueron analizadas con el programa ImageJ, explicados previamente en la metodología, lo que permitió crear tablas de esfericidad y redondez para cada una de las muestras pertenecientes a las zonas anteriormente mencionadas, posteriormente éstos resultados derivados automáticamente son comparados con los resultados del análisis visual siguiendo la tabla de Krumbein y Sloss (1954).

Las tablas a continuación presentan los valores promedio de esfericidad y redondez. La tabla 4.1 muestra los valores de Borbón detrítico magnético a manera de resumen, incluyendo los porcentajes de cada mineral, lo que permite evidenciar como mineral mayoritario el circón (53,2%), seguido de la anortita (34,9%), el topacio (6,4%), el

rutilo (4,6%) y la esfena (0,9%).

Tabla 4.1. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón detrítico magnético.

Morfología	Circón (58) 53,2%	Esfena (1) 0,9%	Rutilo (5) 4,6%	Topacio (7) 6,4%	Anortita (38) 34,9%
Esfericidad	0,77	0,82	0,76	0,77	0,79
Redondez	0,65	0,96	0,61	0,70	0,67

Los datos de la tabla son usados para la creación de diagramas de barras en las Figuras 4.1 y 4.2, donde se puede observar la cantidad de minerales presentes, la esfericidad y la redondez del mismo.

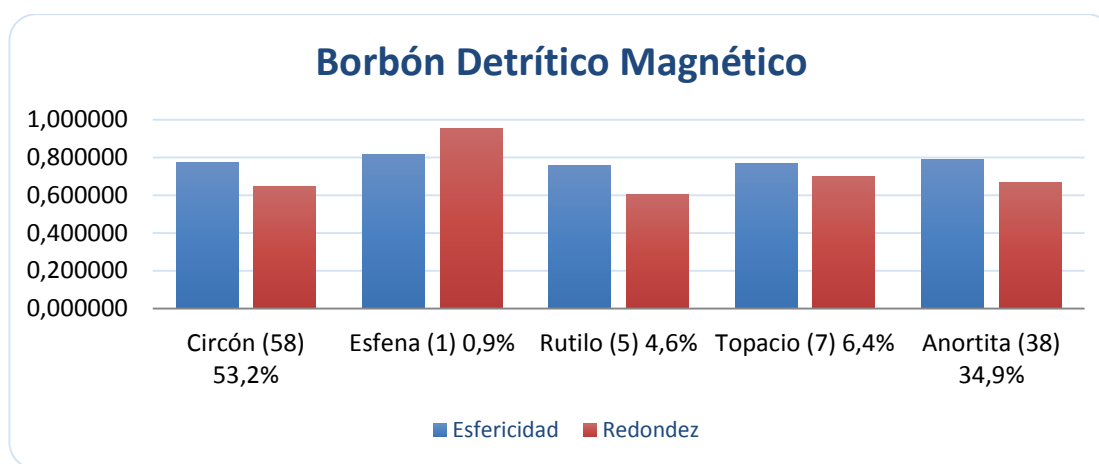


Figura 4.1. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón detrítico magnético.



Figura 4.2. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón detrítico magnético.

La Tabla 4.2 muestra los valores de Borbón detrítico no magnético a manera de resumen, incluyendo los porcentajes de cada mineral, así se observa lo siguiente: mineral mayoritario el circón (88%), seguido del rutilo (5,5%), la esfena (4,6%) y el topacio (1,9%).

Tabla 4.2 Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón Detrítico No Magnético

Morfología	Circón (95) 88%	Esfena (5) 4,6%	Rutilo (6) 5,5%	Topacio (2) 1,9%
Esfericidad	0,78	0,80	0,80	0,75
Redondez	0,69	0,68	0,64	0,54

Los datos de la tabla anterior son usados nuevamente para la creación de las Figuras 4.3 y 4.4, donde se puede observar la comparación entre los minerales presentes.

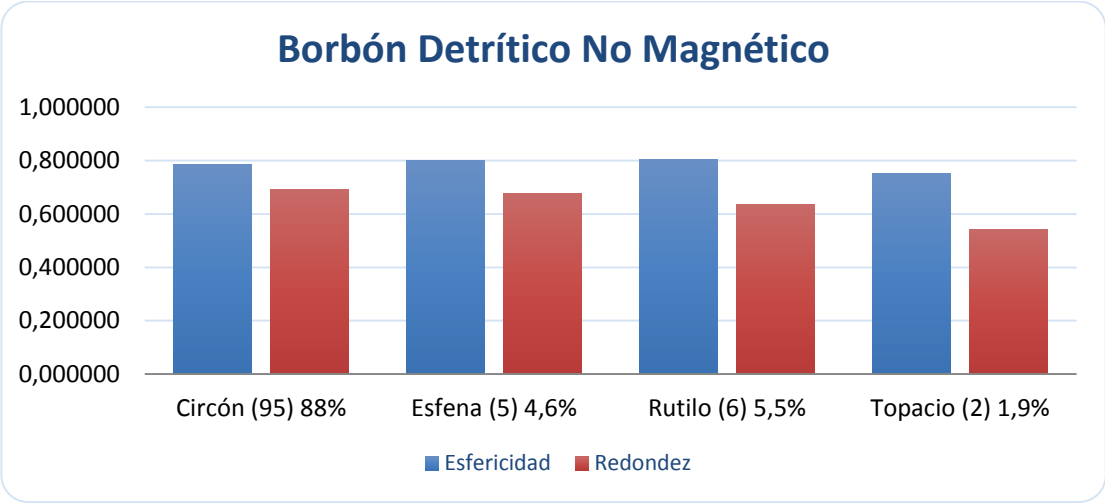


Figura 4.3. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón detrítico no magnético.

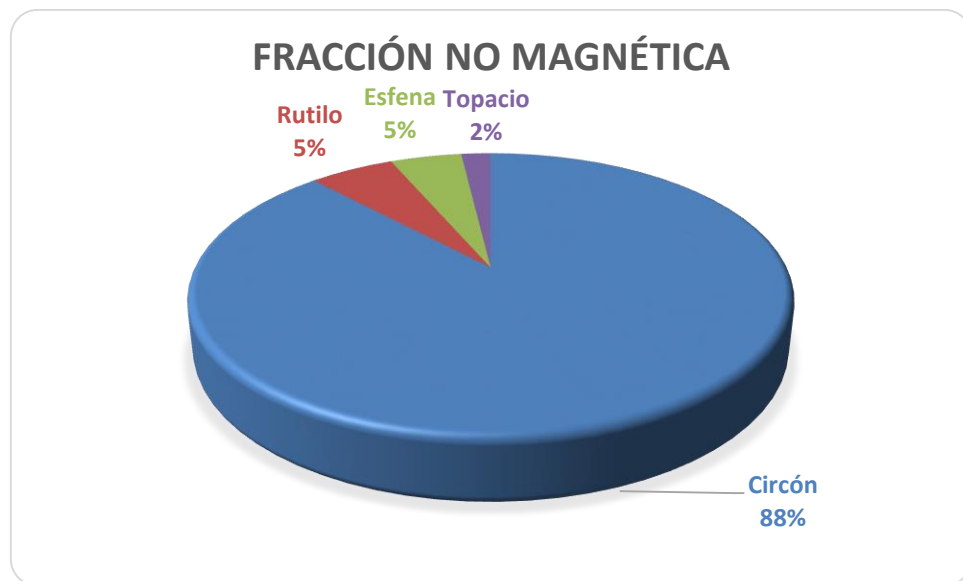


Figura 4.4. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón detrítico no magnético.

La Tabla 4.3 muestra los valores de Borbón Roca magnético a manera de resumen, incluyendo los porcentajes de cada mineral, observándose como mineral mayoritario el circón (96,2%) y el topacio (3,8%).

Tabla 4.3. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón roca magnético

Morfología	circón (100) 96,2%	topacio (4) 3,8%
Esfericidad	0,64	0,78
Redondez	0,43	0,70

En las Figuras 4.5 y 4.6, se muestra la comparación en términos de redondez y esfericidad de los minerales presentes.

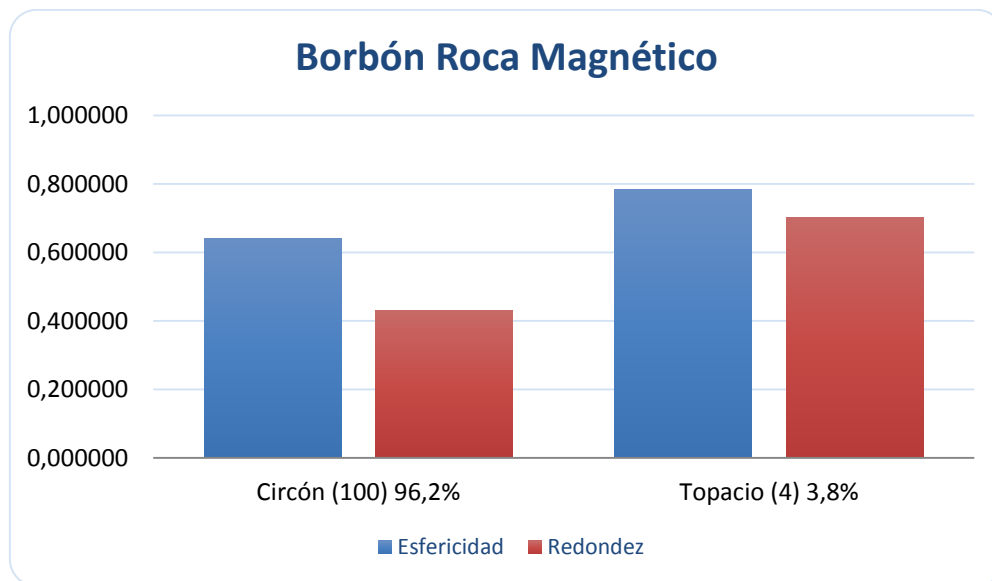


Figura 4.5. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón roca magnético.



Figura 4.6. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón roca magnético

La Tabla 4.4 muestra los valores de Borbón roca no magnético a manera de resumen, incluyendo los porcentajes de cada mineral, lo que permite evidenciar como mineral mayoritario el circón (64,6%), rutilo (19,1%), el topacio (12,7%), esfena (2,7%) y óxidos (0,9%)

Tabla 4.4. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón roca no magnético

Morfología	Circón (71) 64,6%	Esfena (3) 2,7%	Rutilo (21) 19,1%	Topacio (14) 12,7%	Óxidos (1) 0,9%
Esfericidad	0,67	0,79	0,69	0,67	0,71
Redondez	0,47	0,69	0,48	0,46	0,50

Los datos de la tabla son usados para la creación de las Figuras 4.7 y 4.8, donde se puede observar la comparación entre los minerales presentes.

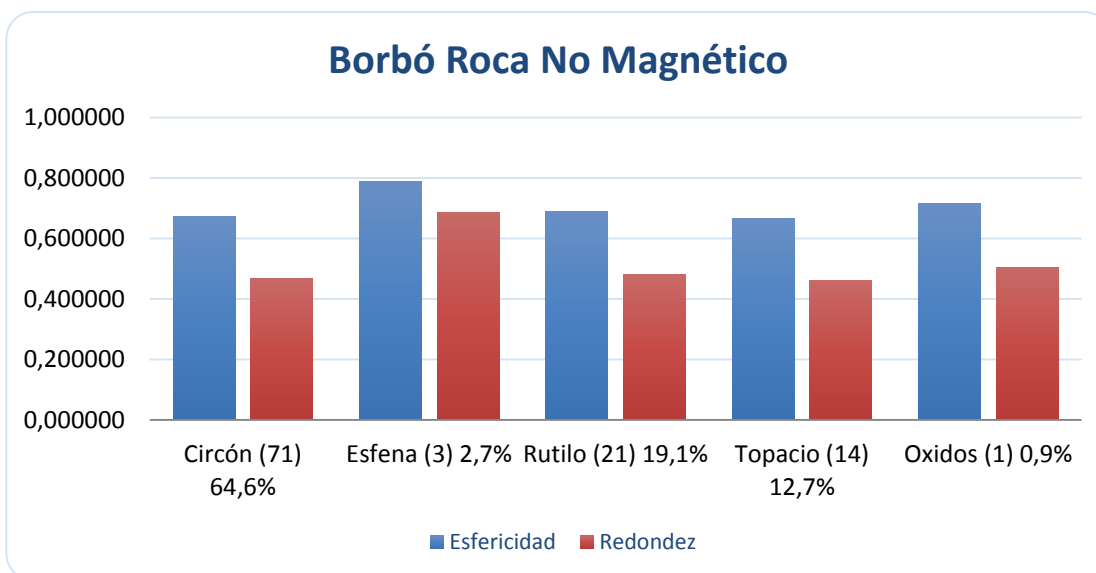


Figura 4.7. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Borbón roca no magnético.



Figura 4.8. Porcentaje de minerales en la muestra Borbón roca no magnético.

La Tabla 4.5 muestra los valores de Fundo Mata Linda magnético a manera de resumen,

incluyendo los porcentajes de cada mineral, lo que permite evidenciar como mineral mayoritario el circón (60,6%), rutilo (24%,), óxidos (8,7%) y topacio (6,7%).

Tabla 4.5. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda magnético.

Morfología	Circón (63) 60,6%	Rutilo (25) 24%	Topacio (7) 6,7%	Oxido (9) 8,7%
Esfericidad	0,82	0,84	0,81	0,81
Redondez	0,74	0,78	0,74	0,71

Las figuras 4.9 y 4.10 resumen los resultados mostrados en la tabla anterior.

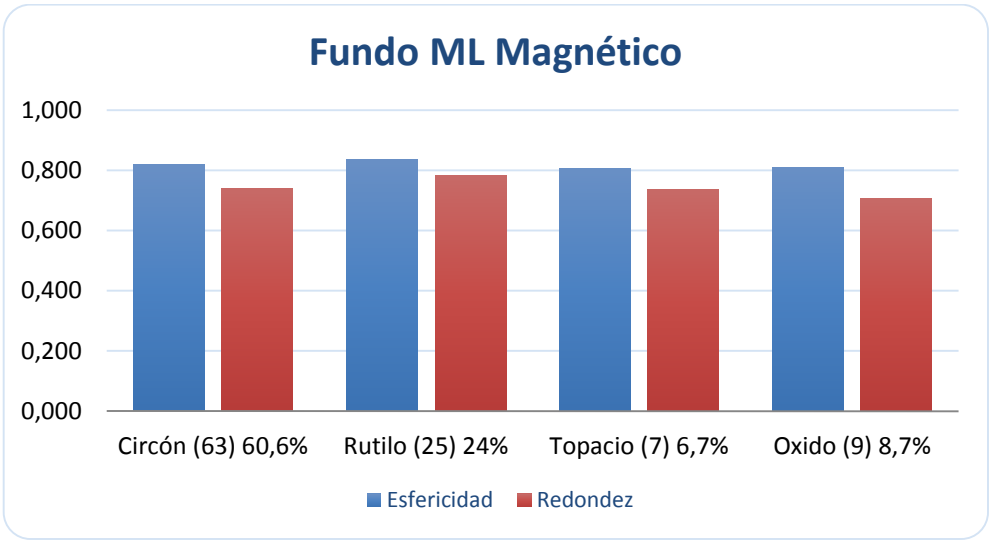


Figura 4.9. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda magnético.



Figura 4.10. Porcentaje de minerales en la muestra Fundo Mata Linda magnético.

La Tabla 4.6 muestra los valores de esfericidad y redondez de la muestra perteneciente al Fundo Mata Linda no magnético, esta incluye los porcentajes de cada mineral, encontrándose como mineral mayoritario el circón (60,6%), seguido del rutilo (24%), óxidos (8,7%) y topacio (6,7%).

Tabla 4.6. Valores promedios de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda no magnético

Morfología	Circón (76) 66,7%	Esfena (2) 1,8 %	Rutilo (27) 23,7%	Topacio (9) 7,8%
Esfericidad	0,78	0,84	0,82	0,83
Redondez	0,65	0,73	0,80	0,78

Los datos de la tabla son usados para la creación de las Figuras 4.11 y 4.12, donde se puede observar la comparación entre los minerales presentes.

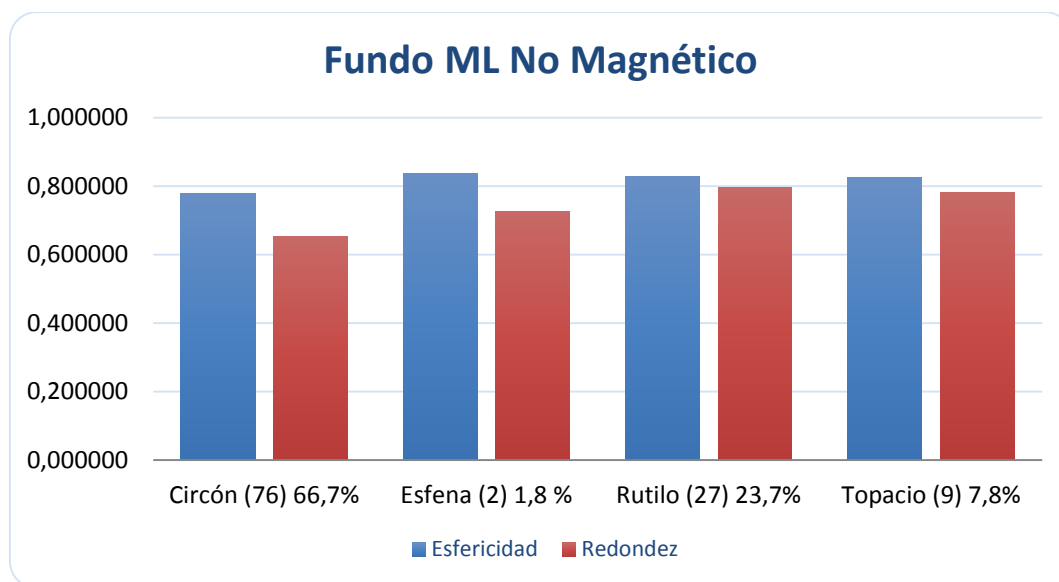


Figura 4.11. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Fundo Mata Linda no magnético.



Figura 4.12. Porcentaje de minerales en la muestra Fundo Mata Linda no magnético.

La Tabla 4.7 muestra los valores de esfericidad y redondez promedio para la muestra Moitaco magnético a manera de resumen, incluyendo los porcentajes de cada mineral, se observa en esta figura la siguiente distribución: anortita (33%), circón (31,1%), pirita (20,4%), rutilo (6,8%), topacio (4,9%), esfena (6,8%) y calco-olivino (0,9%).

Tabla 4.7. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco magnético

Morfología	Circón (32) 31,1%	Esfena (3) 2,9%	Rutilo (7) 6,8%	Topacio (5) 4,9%	Pirita (21) 20,4%	Anortita (34) 33%	Calco-Olivino (1) 0,9%
Esfericidad	0,77	0,63	0,72	0,84	0,76	0,77	0,61
Redondez	0,73	0,60	0,68	0,83	0,71	0,72	0,49

Los datos de la tabla anterior permitieron son resumidos en las Figuras 4.13 y 4.14, donde se puede observar la comparación entre los minerales presentes.

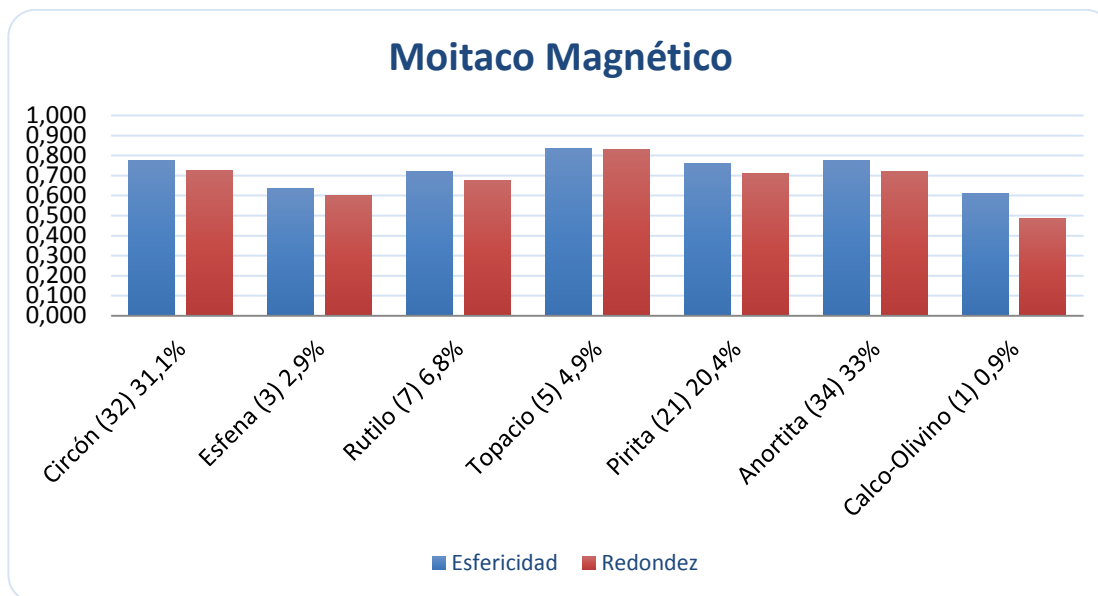


Figura 4.13. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco magnético.

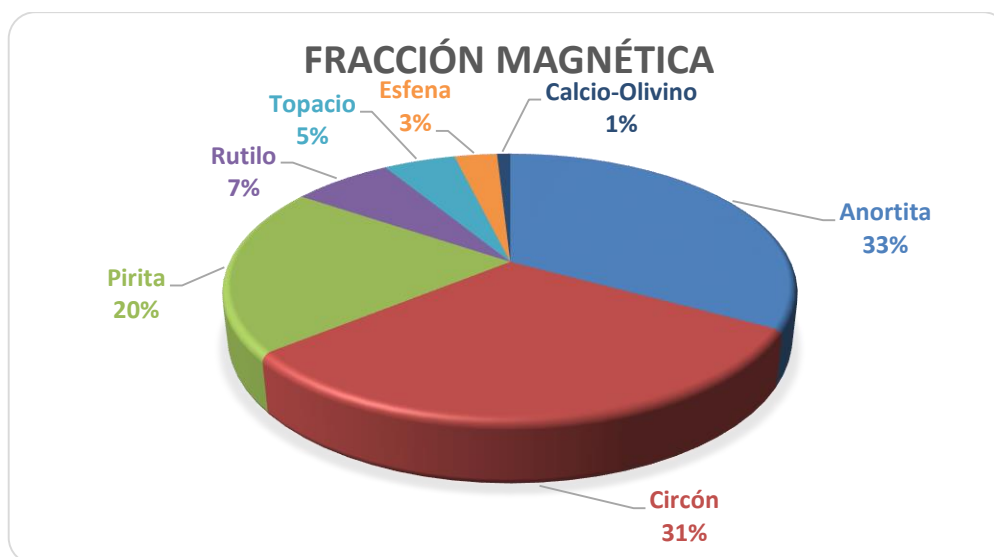


Figura 4.14. Porcentaje de minerales en la muestra Moitaco magnético.

La Tabla 4.8 muestra los valores de esfericidad y redondez promedio para la muestra Moitaco No Magnético, se discriminan el circón (73,9%), calco-olivino (9,1%), anortita (6,8%), topacio (5,7%), rutilo (2,3%), pirita (1,1%) y esfena (1,1%).

Tabla 4.8. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco no magnético

Morfología	Circón (65) 73,9%	Esfena (1) 1,1%	Rutilo (2) 2,3%	Topacio (5) 5,7%	Pirita (1) 1,1%	Anortita (6) 6,8%	Calcio- Olivino (8) 9,1%
Esfericidad	0,76	0,76	0,69	0,81	0,726	0,79	0,72
Redondez	0,74	0,68	0,60	0,80	0,67	0,78	0,65

Las Figuras 4.15 y 4.16 resumen los valores de la tabla anterior.

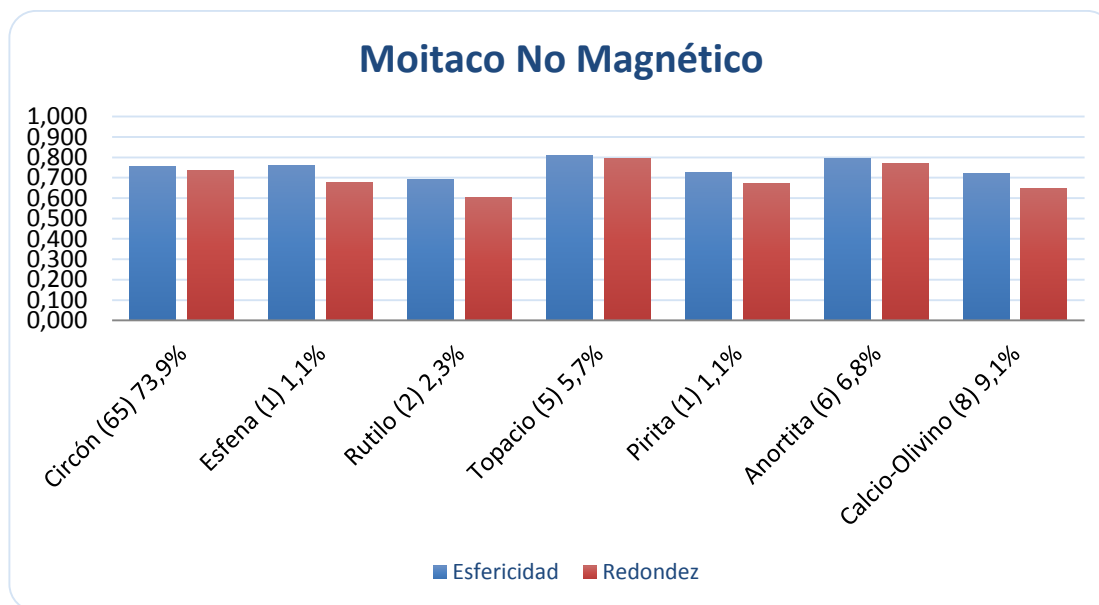


Figura 4.15. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Moitaco no magnético.



Figura 4.16. Porcentaje de minerales en la muestra Moitaco no magnético.

La Tabla 4.9 muestra los valores promedios de redondez y esfericidad obtenidos para la muestra Peñón Aro magnético, para ésta se discriminan los siguientes minerales: circón (72%), esfena (15%), rutilo (7%) y topacio (6%).

Tabla 4.9. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñón Aro magnético.

Morfología	Circón (72) 72%	Esfena (15) 15%	Rutilo (7) 7%	Topacio (6) 6%
Esfericidad	0,81	0,83	0,83	0,79
Redondez	0,74	0,80	0,82	0,79

La tabla anterior es mostrada en las Figuras 4.17 y 4.18.

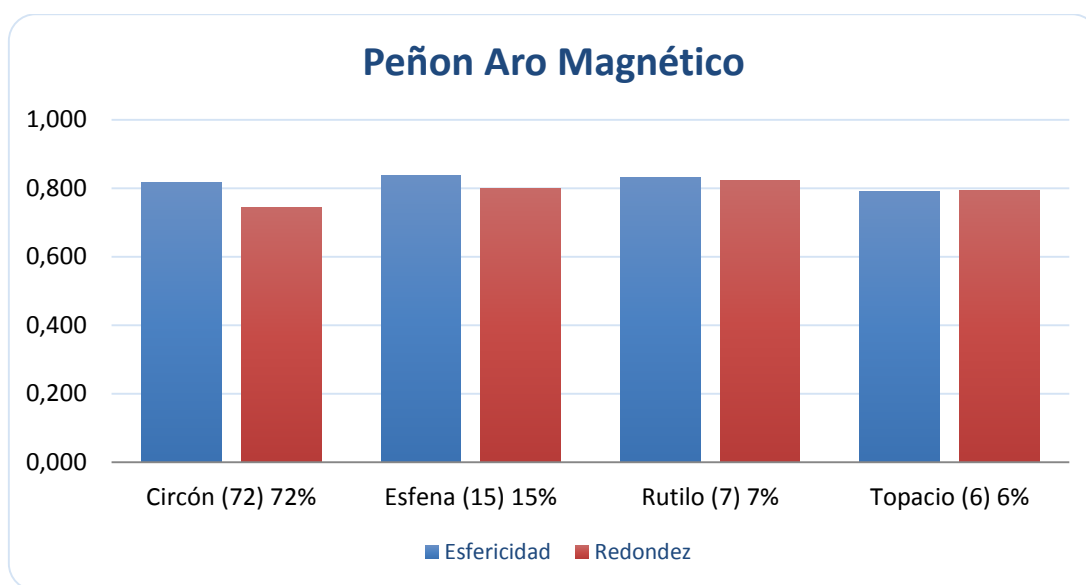


Figura 4.17. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñón Aro magnético.



Figura 4.18. Porcentaje de minerales en la muestra Peñón Aro magnético.

La Tabla 4.10 muestra los valores de esfericidad y redondez promedio para la muestra Peñón Aro magnético a manera de resumen, incluyendo los porcentajes de cada mineral, se discriminan en esta figura el circón (72%), esfena (15%), rutilo (7%) y topacio (6%).

Tabla 4.10. Valores promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñón Aro magnético.

Morfología	Circón (73) 70,2%	Esfena (7) 6,7%	Rutilo (6) 5,8%	Topacio (18) 17,3%
Esfericidad	0,78	0,81	0,74	0,81
Redondez	0,69	0,77	0,59	0,76

Los datos de la tabla son usados para la creación de histogramas en las Figuras 4.19 y 4.20, donde se puede observar la comparación entre los minerales presentes.

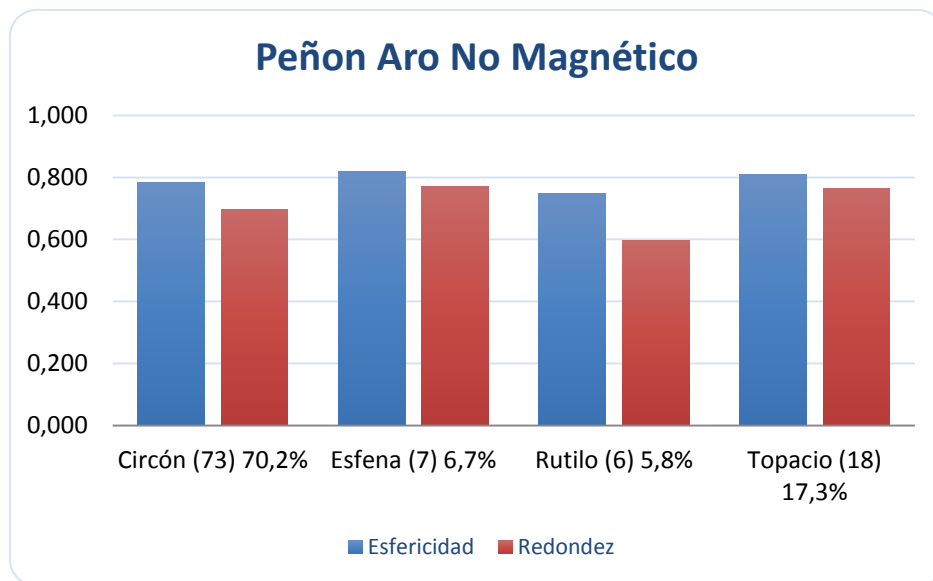


Figura 4.19. Promedio de esfericidad y redondez de la muestra Peñon Aro no magnético.



Figura 4.20. Porcentaje de minerales en la muestra Peñon Aro no magnético.

La Tabla 4.11 contiene los promedios de esfericidad de los minerales de la fracción magnética entre las cuencas, esta permite comparar también la presencia de minerales, como por ejemplo, el Circón y Topacio están presentes en todas las cuencas, pero la Pirita y el Calcio-Olivino solo en Moitaco.

Tabla 4.11. Esfericidad promedio entre los granos de la fracción magnética.

Cuenca	Circón	Topacio	Esfena	Rutilo	Pirita	Anortita	Calcio-Olivino	Óxido
Peñón Aro	0,81	0,79	0,83	0,83				
Moitaco	0,77	0,83	0,63	0,72	0,76	0,77	0,61	
Fundo Mata Linda	0,81	0,80		0,83				0,81
Borbón Detrítico	0,77	0,76	0,81	0,75		0,78		
Borbón Roca	0,64	0,78						

Los valores de la tabla se utilizaron para hacer el siguiente histograma, ver Figura 4.21, que permite ver la comparación de los promedios de esfericidad de manera gráfica.

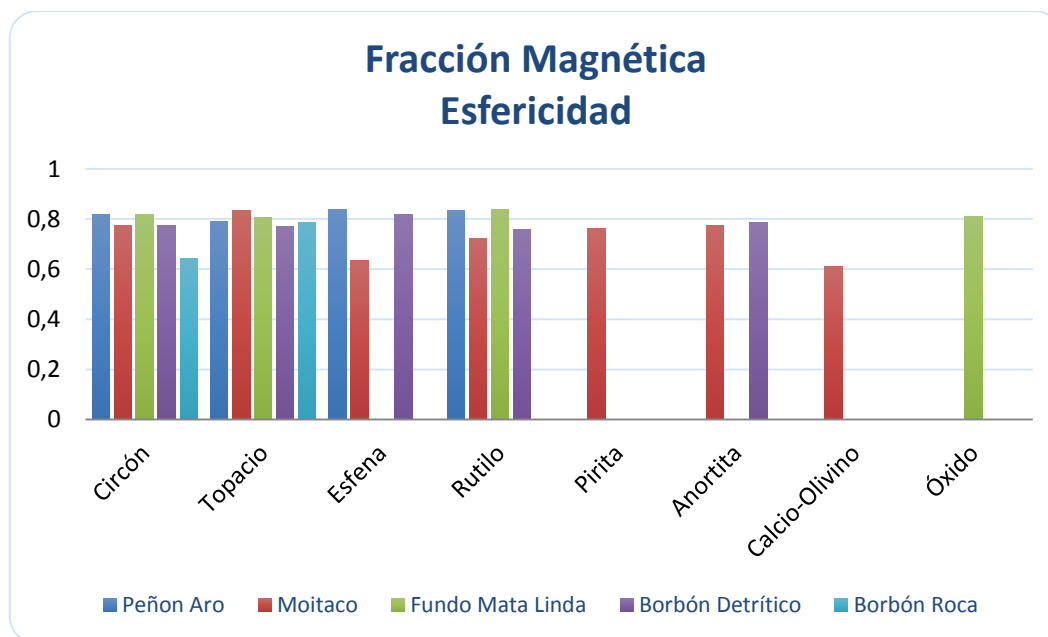


Figura 4.21. Gráfico de esfericidad promedio de la fracción magnética entre las cuencas.

La Tabla 4.12 contiene los promedios de redondez de los minerales de la fracción magnética entre las cuencas.

Tabla 4.12. Redondez promedio entre los granos de la fracción magnética.

Cuenca	Circón	Topacio	Esfena	Rutilo	Pirita	Anortita	Calcio-Olivino	Óxido
Peñón Aro	0,74	0,79	0,79	0,82				
Moitaco	0,72	0,83	0,60	0,67	0,71	0,72	0,48	
Fundo Mata Linda	0,73	0,73		0,78				0,70
Borbón Detrítico	0,64	0,69	0,95	0,60		0,66		
Borbón Roca	0,43	0,70						

Los datos de la tabla anterior sirvieron para realizar el siguiente gráfico, ver Figura 4.22, que demuestra los valores más altos en promedio de redondez entre las cuencas en Peñón Aro.

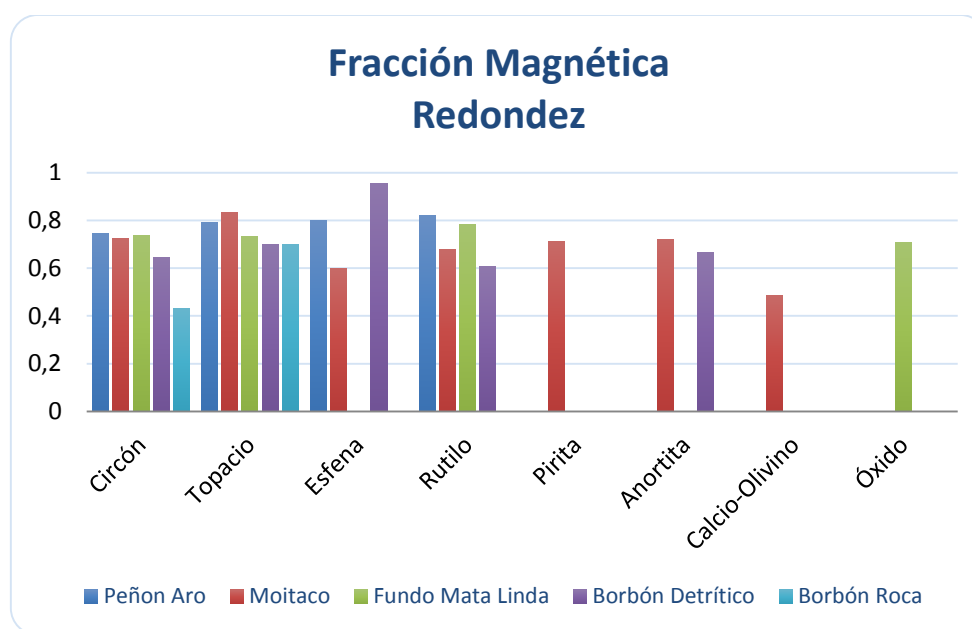


Figura 4.22. Valores promedios de redondez para la fracción magnética de las cuencas.

La Tabla 4.13 contiene los promedios de esfericidad de los minerales de la fracción no magnética entre las cuencas, esta permite comparar también la presencia de minerales, como por ejemplo el Circón, Topacio, Esfena y Rutilo están presentes en todas las cuencas, pero la Pirita, la Anortita y el Calcio-Olivino solo en Moitaco.

Tabla 4.13. Esfericidad promedio entre los granos de la fracción no magnética.

Cuenca	Circón	Topacio	Esfena	Rutilo	Pirita	Anortita	Calcio-Olivino	Óxido
Peñón Aro	0,78	0,81	0,81	0,74				
Moitaco	0,75	0,80	0,76	0,69	0,72	0,79	0,72	
Fundo Mata Linda	0,77	0,82	0,83	0,82				
Borbón Detrítico	0,78	0,75	0,79	0,80				
Borbón Roca	0,67	0,66	0,79	0,68				0,71

Los valores de la tabla se utilizaron para hacer el siguiente histograma, ver Figura 4.23, que permite ver la comparación de los promedios de esfericidad de manera gráfica.

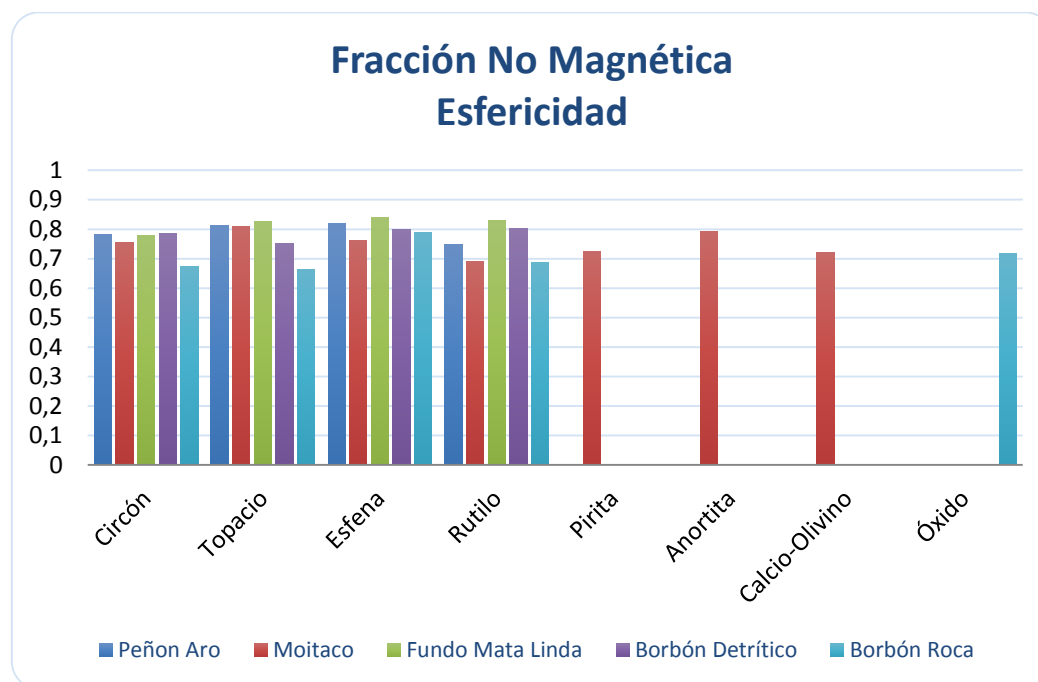


Figura 4.23. Gráfico de esfericidad promedio de la fracción magnética entre las cuencas.

La Tabla 4.14 contiene los promedios de redondez de los minerales de la fracción magnética entre las cuencas.

Tabla 4.14. Redondez promedio entre los granos de la fracción no magnética.

Cuenca	Circón	Topacio	Esfena	Rutilo	Pirita	Anortita	Calcio-Olivino	Óxido
--------	--------	---------	--------	--------	--------	----------	----------------	-------

Peñón Aro	0,69	0,76	0,77	0,59				
Moitaco	0,73	0,79	0,67	0,60	0,67	0,77	0,64	
Fundo Mata Linda	0,65	0,78	0,72	0,79				
Borbón Detrítico	0,69	0,54	0,67	0,63				
Borbón Roca	0,46	0,46	0,68	0,48				0,50

Los datos de la tabla anterior sirvieron para realizar el siguiente gráfico, ver Figura 4.22, que demuestra los valores más altos en promedio de redondez entre las cuencas corresponde a Moitaco.

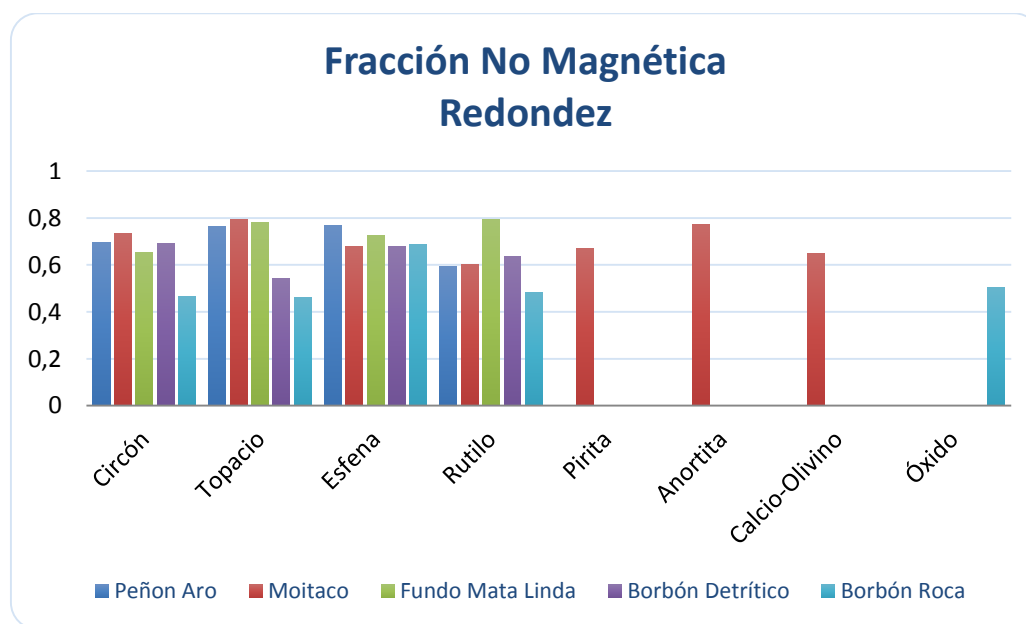


Figura 4.24. Promedio de redondez para la fracción no magnética de las cuencas.

4.2.2 Identificación de los minerales pesados por el Microscopio Electrónico de Barrido (M.E.B.)

El análisis en el M.E.B. se realizó a 20 granos, los cuales representan a 2 granos por cada una de las 10 muestras estudiadas. El estudio sirvió para corroborar la identificación visual de los minerales, así como los granos que no se reconocieron a través de microscopio convencional de luz polarizada. Los elementos C, S y Au no se toman en cuenta debido a que los dos primeros están asociados al esmalte utilizado

para fijar los granos, el Au es producto del baño Oro-Paladio que se le aplica a la muestra para que pueda circular la corriente del microscopio electrónico, por lo que generalmente el operador lo bloquea. Los nombres de los minerales identificados serán recopilados en la Tabla 4.55.

4.2.2.1 Borbón detrítico magnético

- Grano 1

La Figura 4.25 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomó en cuenta para identificar el nombre del mineral. Además aparece Yb, la cual es una tierra rara, por lo que no fue posible reconocerlo.

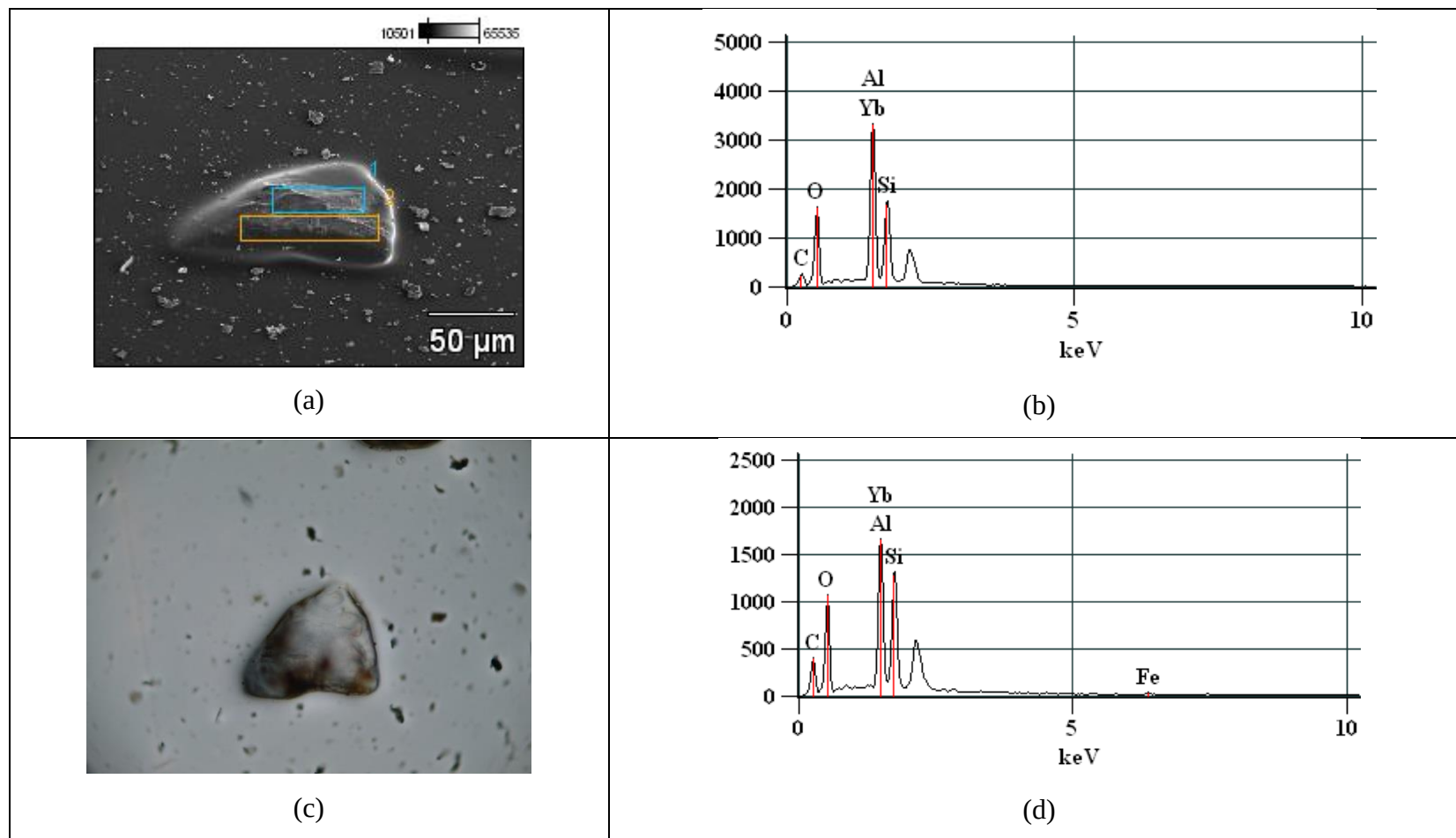


Figura 4.25. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.15 y 4.16 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector. Los valores que estén por debajo de 0,25% de la segunda tabla se deben considerar ruido según las especificaciones del fabricante del equipo.

Tabla 4.15. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Yb-L
Punto 1	29.89	35.08	17.74	11.77	-	5.52
Punto 2	42.16	32.57	10.41	9.82	0.90	4.14
Tabla 4.16. Porcentaje atómico de los elementos						
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Yb-L
Punto 1	42.98	37.87	11.36	7.24		0.55
Punto 2	55.52	32.21	6.10	5.53	0.26	0.38

- Grano 2

La Figura 4.26 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe, Al y Yb en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

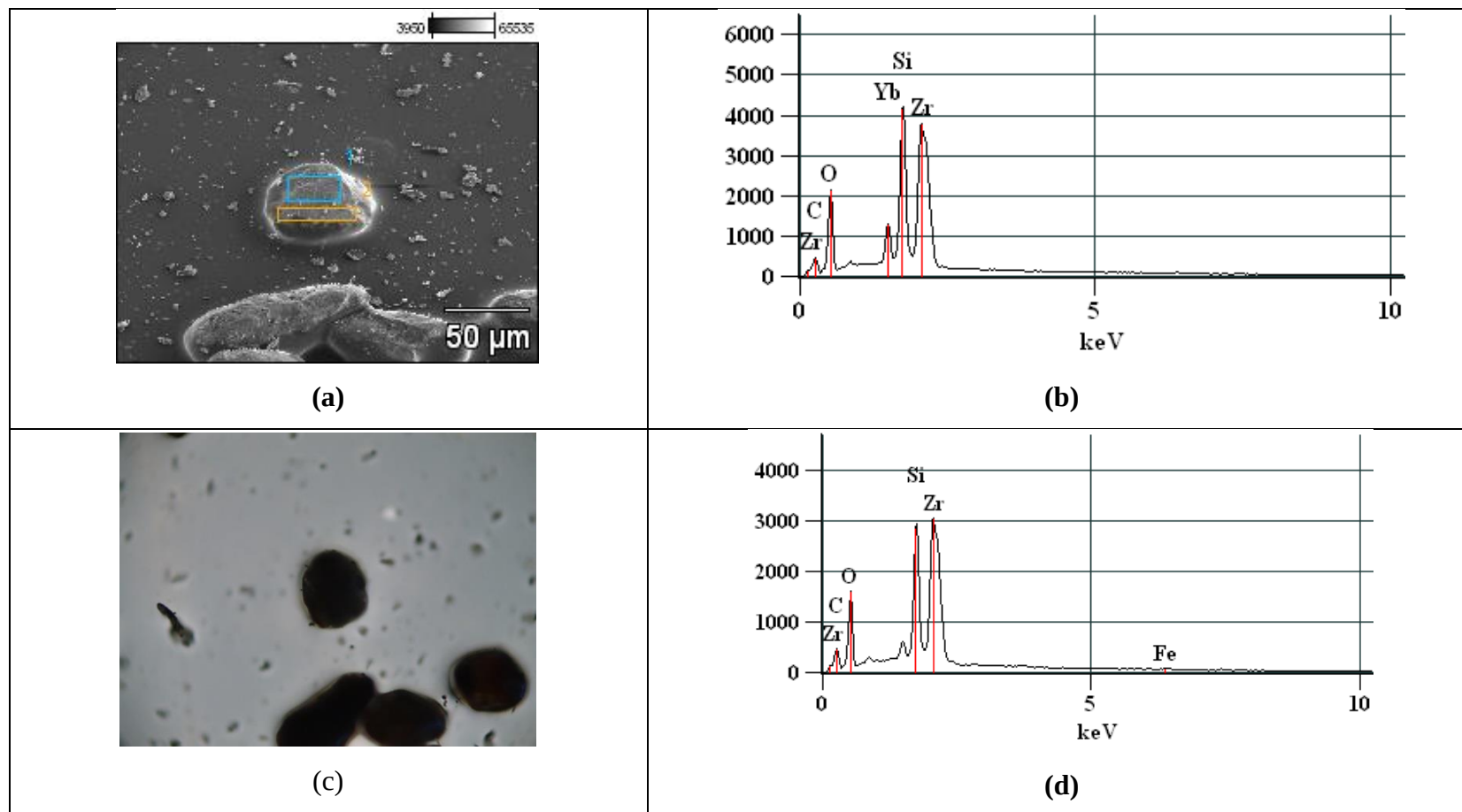


Figura 4.26. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.17 y 4.18 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.17. Porcentaje en peso de los elementos							
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Zr-L	Yb-L
Punto1	0.75	18.94	0.88	15.82		51.16	12.45
Punto 2	9.46	23.78		12.78	2.28	51.70	
Tabla 4.18. Porcentaje atómico de los elementos							
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Zr-L	Yb-L
Punto 1	2.53	47.83	1.31	22.76		22.66	2.91
Punto2	23.60	44.55		13.64	1.23	16.99	

4.2.2.2 Borbón detrítico no magnético

- Grano 1

La Figura 4.27 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Al y Ca en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

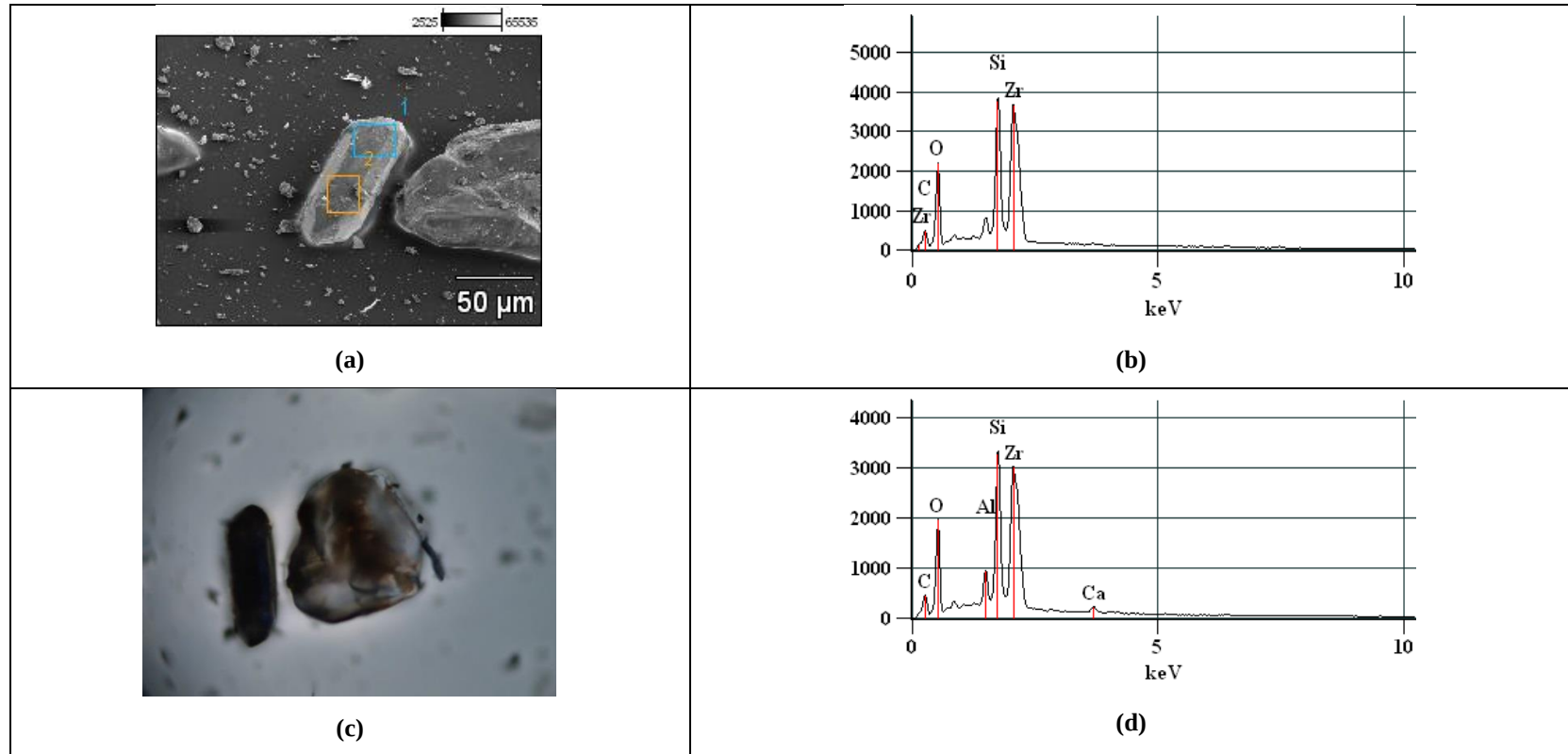


Figura 4.27. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.19 y 4.20 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.19. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Zr-L
Punto 1	1.08	27.95		15.80		55.17
Punto 2	4.49	29.69	0.57	14.94	0.38	49.93
Tabla 4.20. Porcentaje atómico de los elementos						
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Zr-L
Punto 1	3.00	58.14		18.72		20.13
Punto 2	11.20	55.57	0.63	15.93	0.28	16.39

- Grano 2

La Figura 4.28 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomó en cuenta para identificar el nombre del mineral.

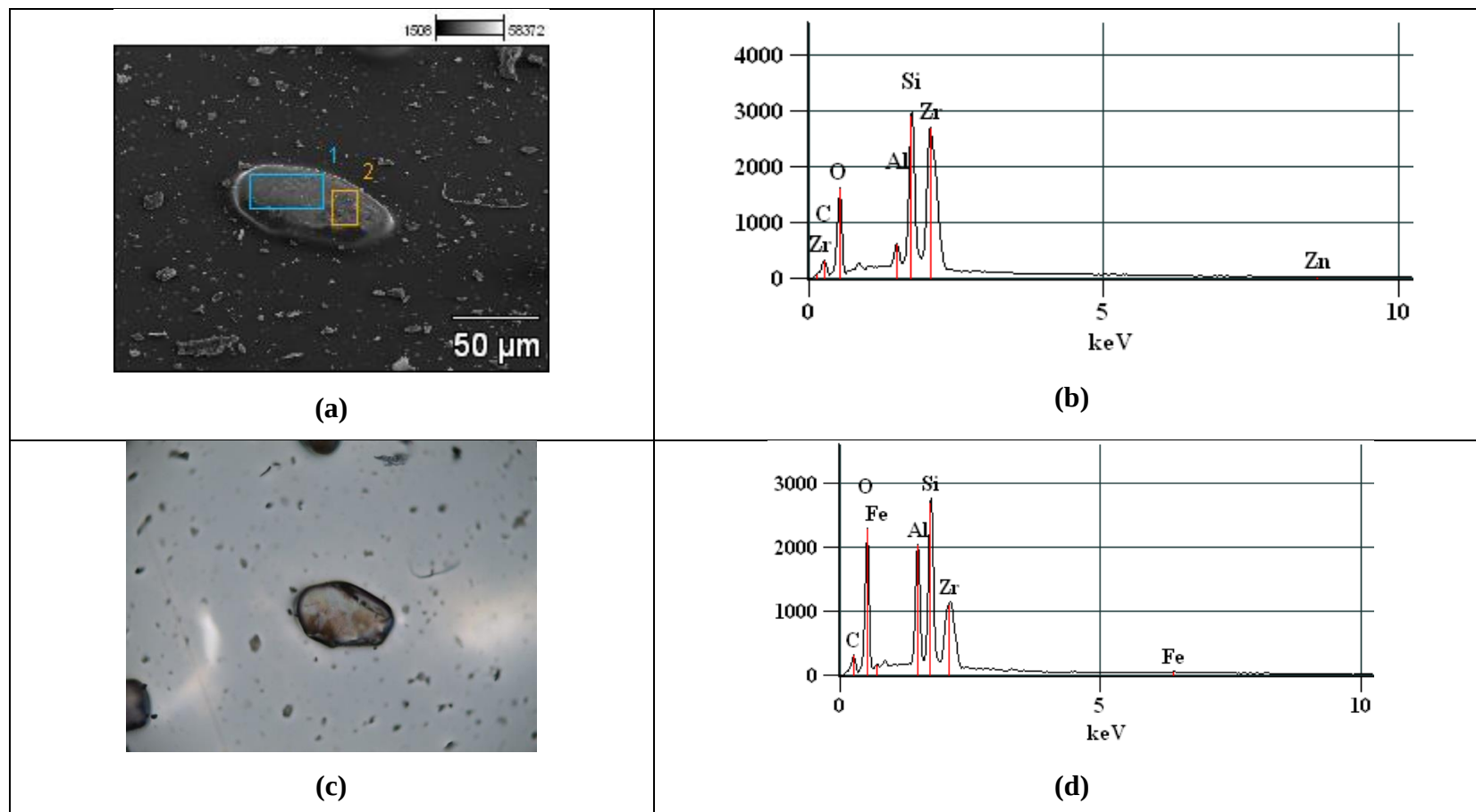


Figura 4.28. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón detrítico no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.21 y 4.22 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.21. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	11.42	30.33	0.28	14.37		43.60
Punto2	20.49	40.16	8.56	13.91	0.94	15.95
Tabla 4.22. Porcentaje atómico de los elementos						
Átomos	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	24.72	49.29	0.27	13.30		12.43
Punto 2	32.68	48.09	6.08	9.48	0.32	3.35

4.2.2.3 Borbón roca magnético

- Grano 1

La Figura 4.29 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomó en cuenta para identificar el nombre del mineral.

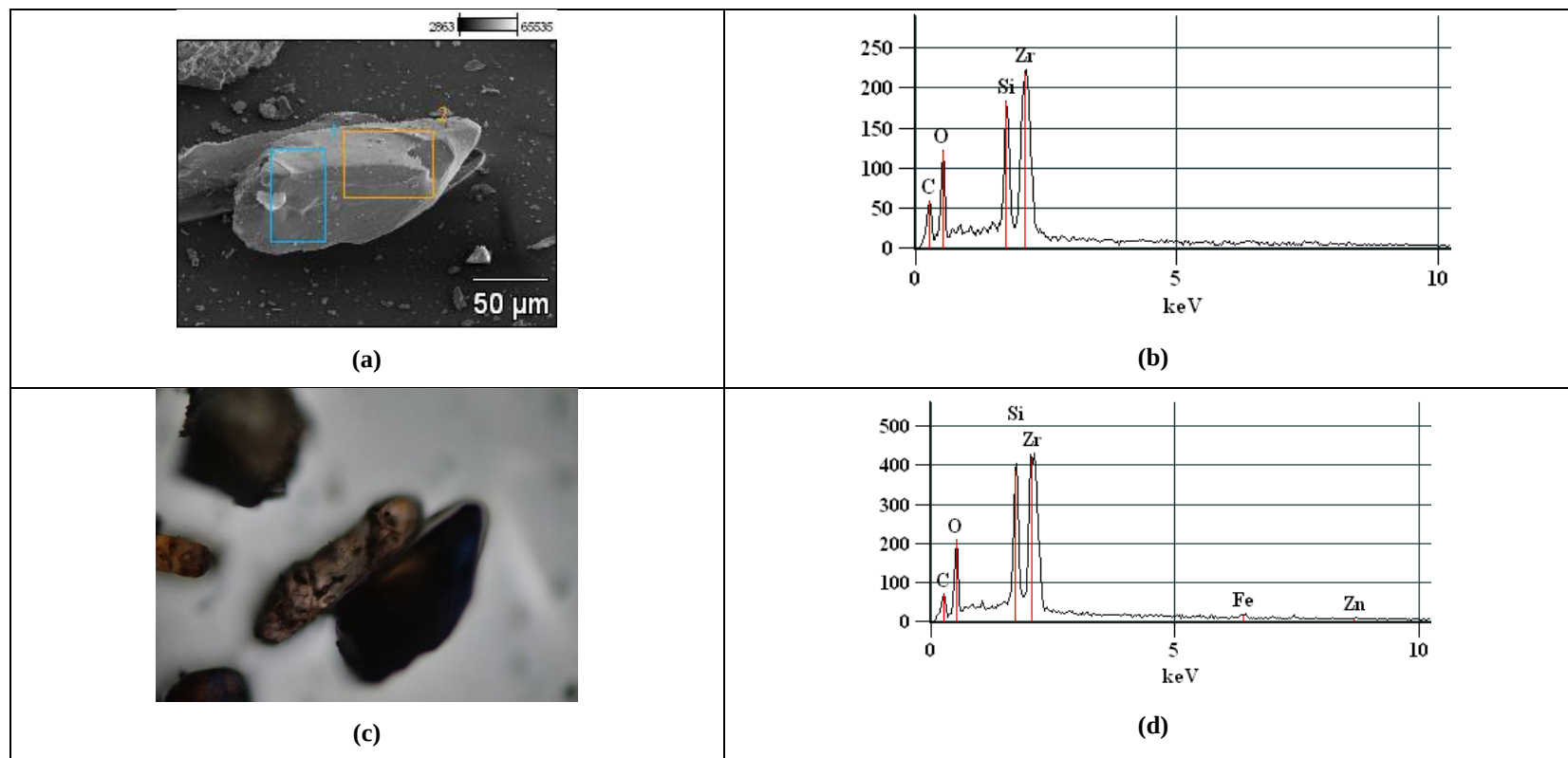


Figura 4.29. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicols paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.23 y 4.24 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.23. Porcentaje en peso de los elementos					
Peso (%)	C-K	O-K	Si-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	40.48	26.98	6.70		25.83
Punto 2	32.33	27.07	9.04	0.32	31.24
Tabla 4.24. Porcentaje atómico de los elementos					
Átomos (%)	C-K	O-K	Si-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	60.42	30.23	4.28		5.08
Punto2	53.27	33.47	6.37	0.11	6.78

- Grano 2

La Figura 4.30 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe y Al en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

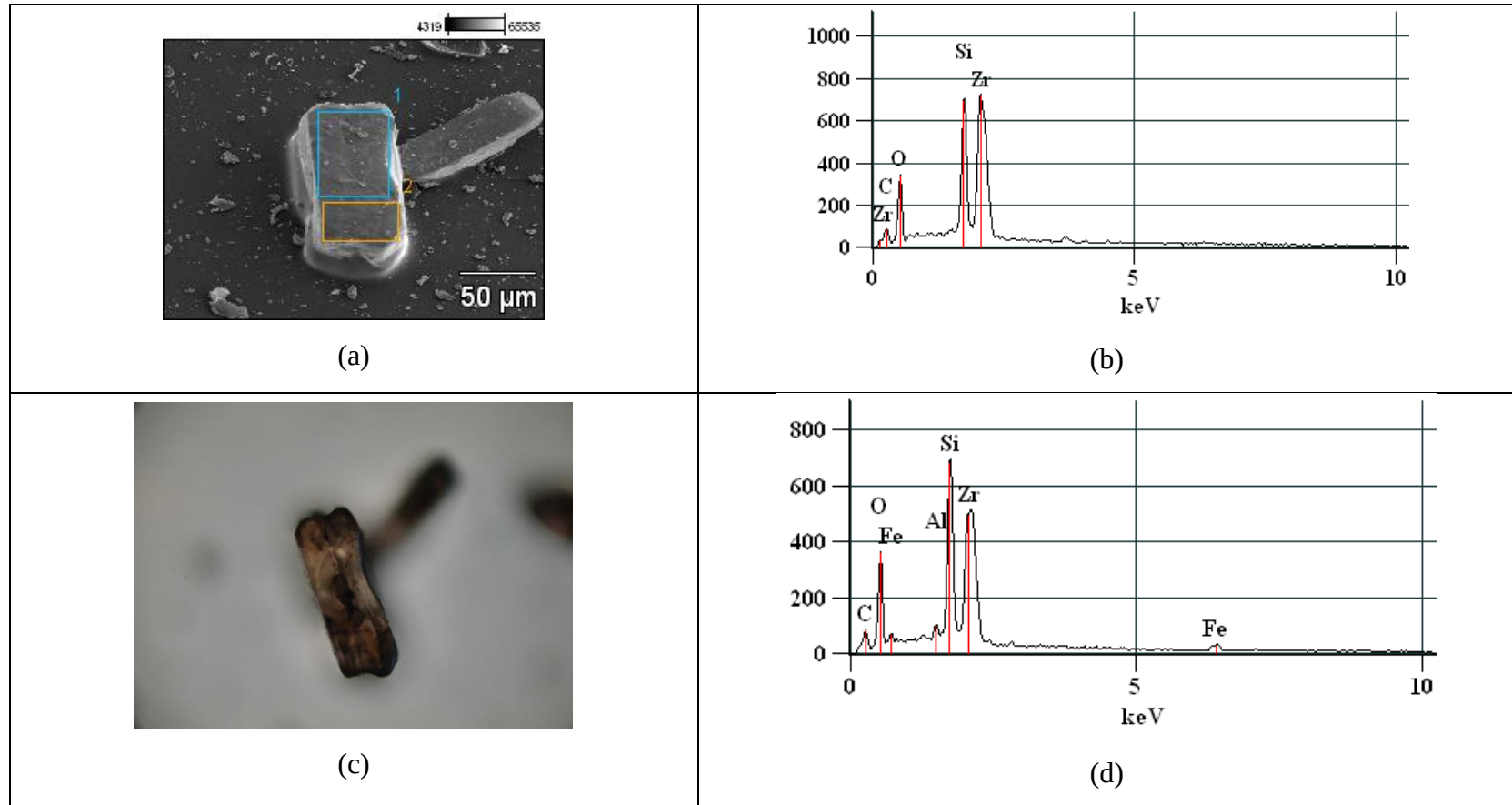


Figura 4.30. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.25 y 4.26 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.25. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	26.21	27.63		10.02		36.14
Punto 2	27.81	30.67	0.32	11.54	0.47	29.19
Tabla 4.26. Porcentaje atómico de los elementos						
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	46.80	37.05		7.65		8.50
Punto 2	46.46	38.46	0.24	8.24	0.17	6.42

4.2.2.4 Borbón roca no magnético

- Grano 1

La Figura 4.31 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta.

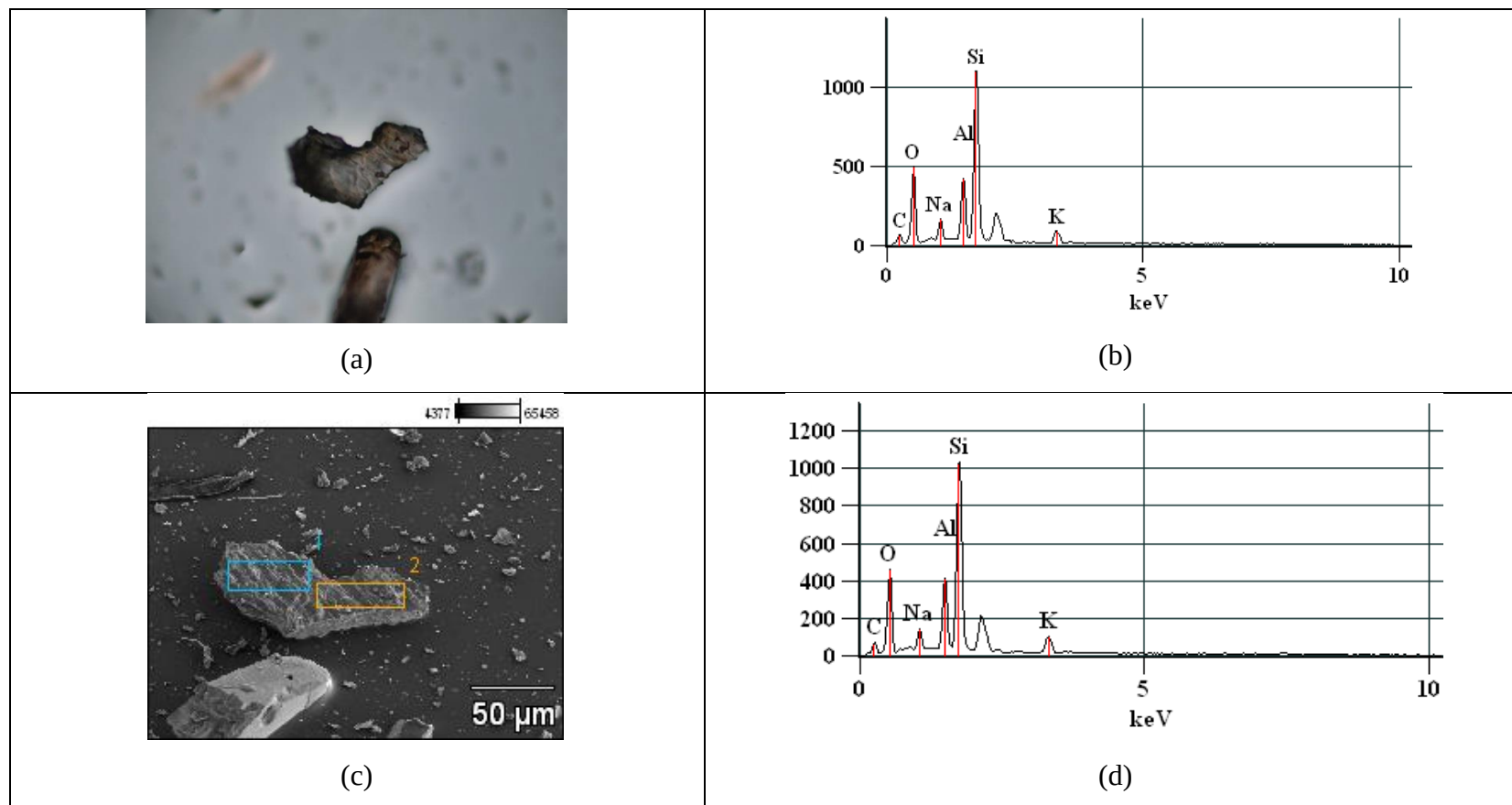


Figura 4.31. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.27 y 4.28 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.27. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K
Punto 1	14.03	38.74	5.36	9.47	28.41	3.99
Punto 2	13.42	39.93	4.80	9.35	27.98	4.54

Tabla 4.28. Porcentaje atómico de los elementos						
Átomos (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K
Punto 1	22.09	45.80	4.41	6.64	19.13	1.93
Punto 2	21.16	47.27	3.95	6.56	18.87	2.20

- Grano 2

La Figura 4.32 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta.

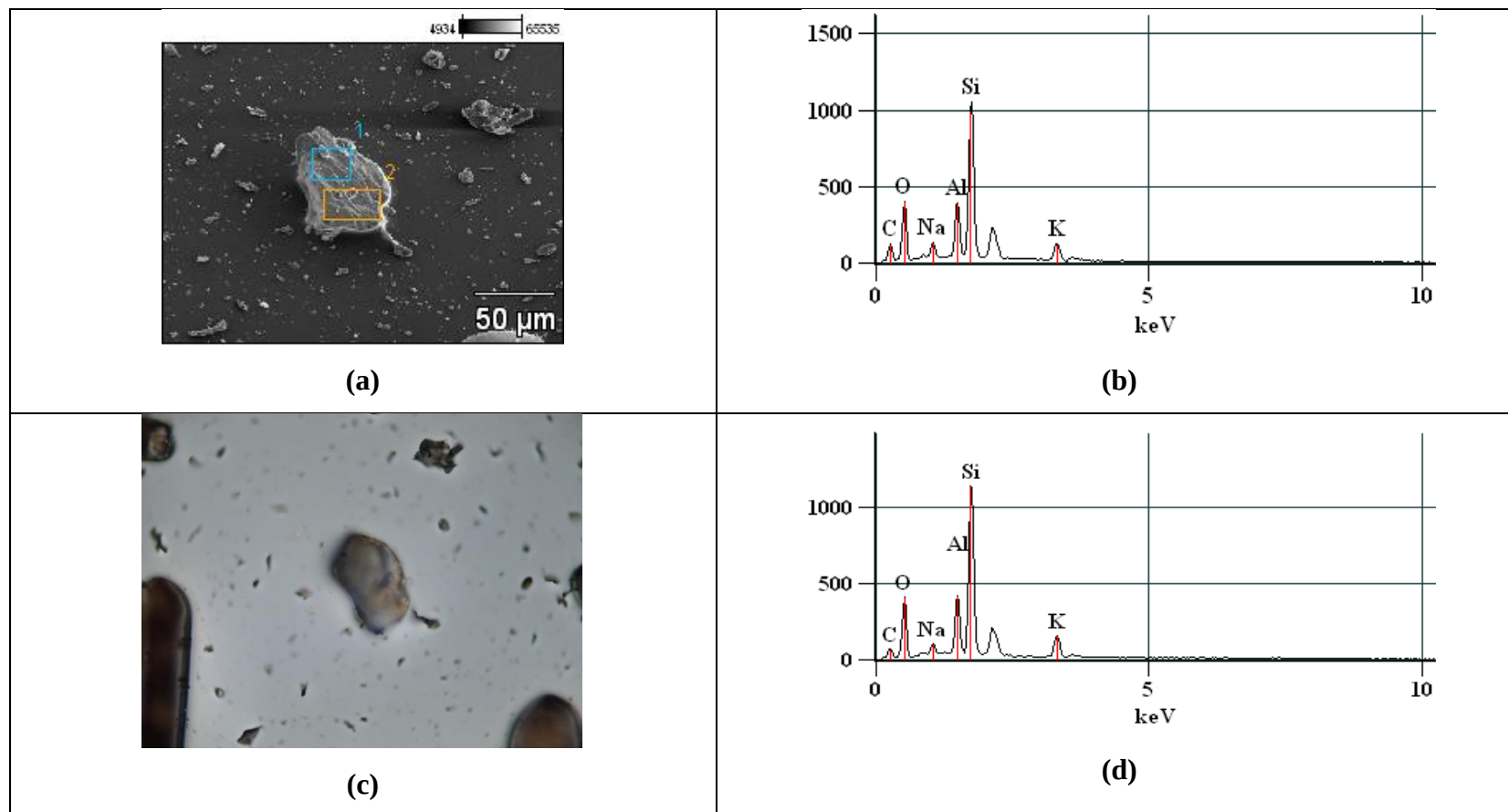


Figura 4.32. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Borbón roca no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.29 y 4.30 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.29. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K
Punto 1	24.02	35.33	3.59	7.80	24.28	4.99
Punto 2	14.43	36.99	3.36	9.03	29.04	7.15
Tabla 4.30. Porcentaje en atómico de los elementos						
Átomos (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K
Punto 1	35.43	39.12	2.76	5.12	15.31	2.26
Punto 2	23.06	44.36	2.80	6.42	19.84	3.51

4.2.2.5 Fundo Mata Linda Magnético

- Grano 1

La Figura 4.33 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe y Al en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

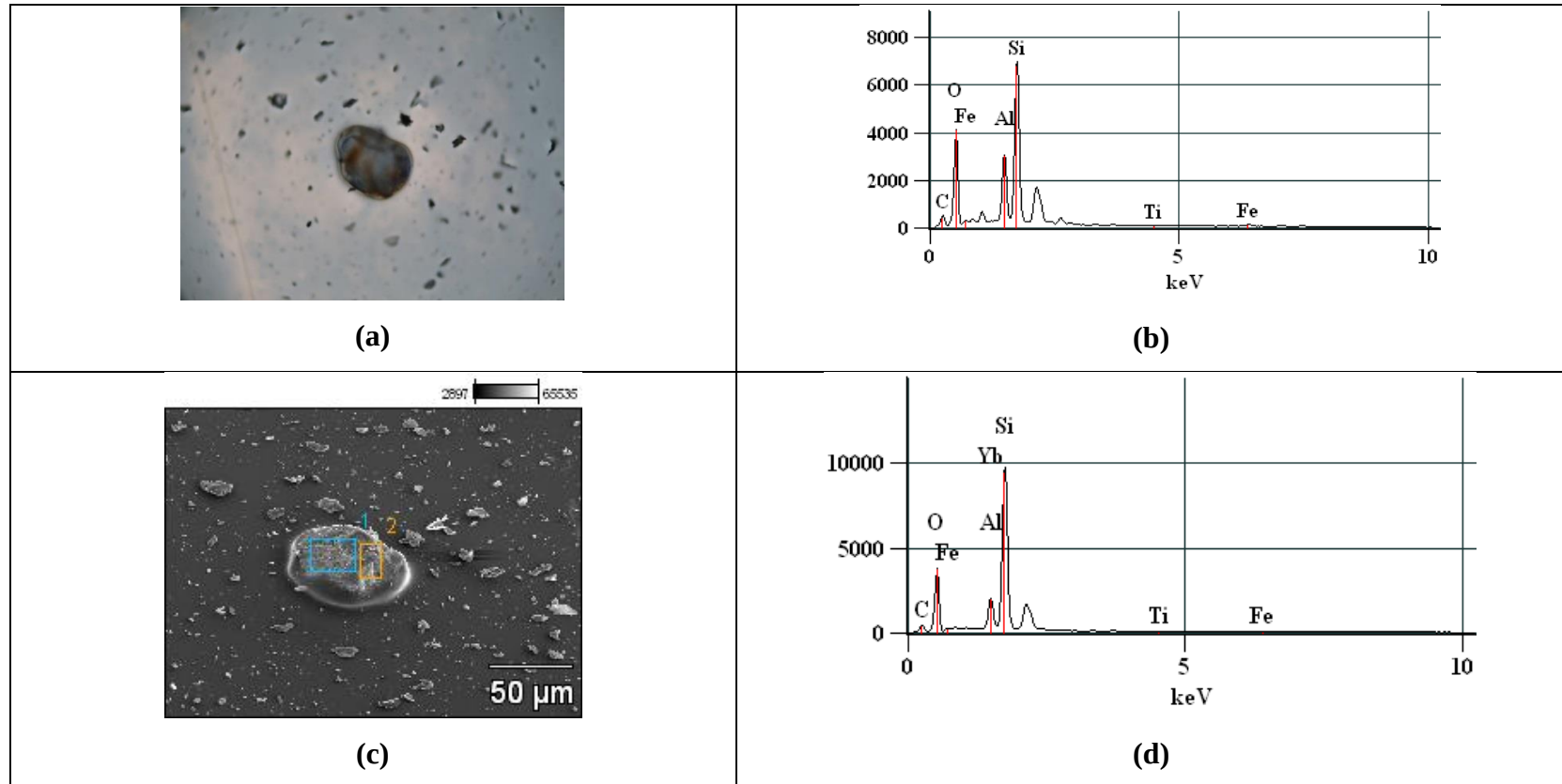


Figura 4.33. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Fundo Mata Linda magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.31 y 4.32 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.31. Porcentaje en peso de los elementos							
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Fe-K	Yb-L
Punto 1	2.35	38.40	10.27	41.65	0.25	7.08	
Punto 2	18.33	32.33	3.52	33.80	0.43	2.72	8.86
Tabla 4.32. Porcentaje en atómico de los elementos							
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Fe-K	Yb-L
Punto 1	4.27	52.27	8.29	32.30	0.11	2.76	
Punto 2	30.58	40.50	2.62	24.12	0.18	0.98	1.03

- Grano 2

La Figura 4.34 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta.

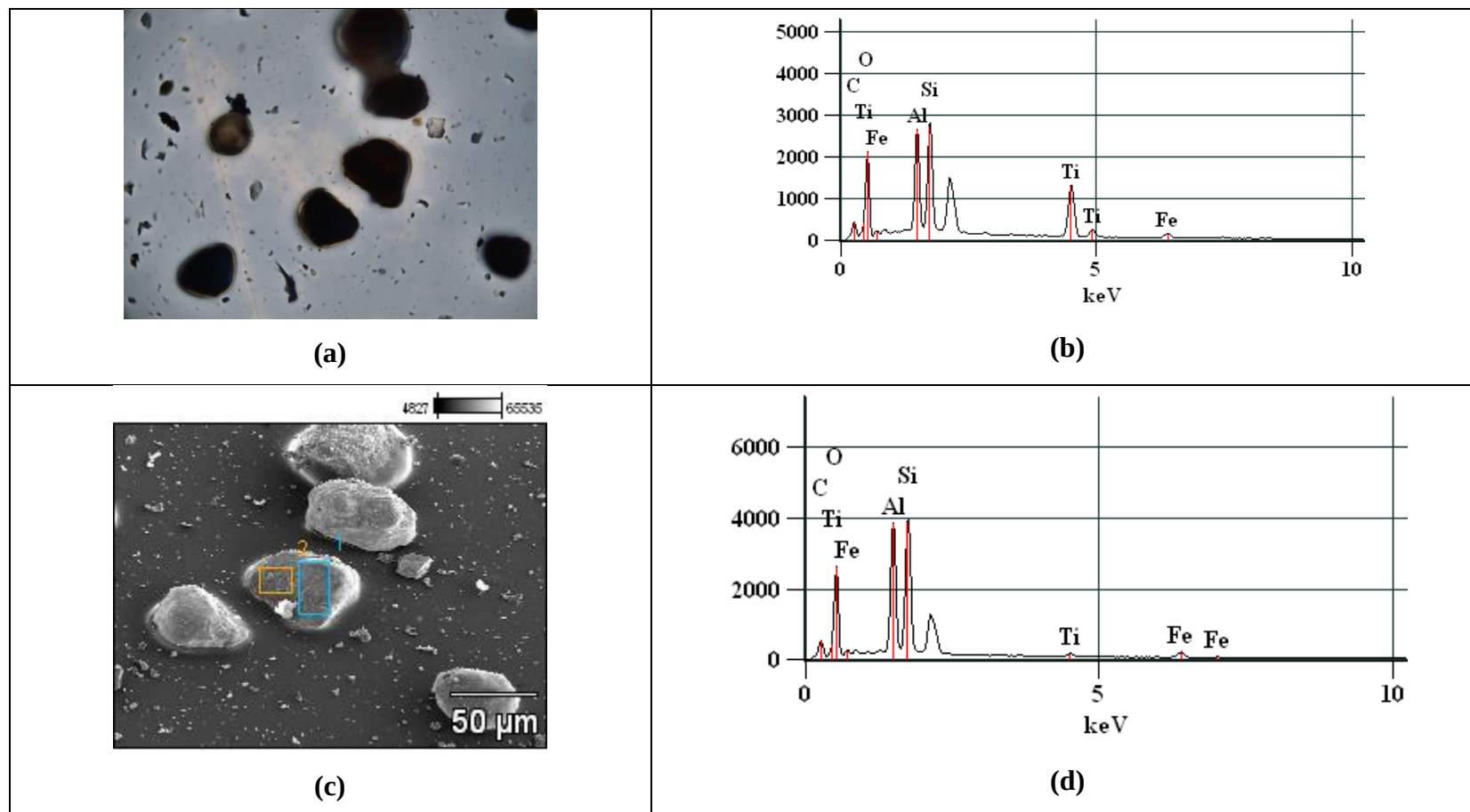


Figura 4.34. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Fundo Mata Linda magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.33 y 4.34 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.33. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Fe-K
Punto 1	14.55	30.82	10.78	13.31	24.54	6.00
Punto 2	30.30	32.42	13.40	16.41	1.82	5.65
Tabla 4.34. Porcentaje atómico de los elementos						
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Fe-K
Punto 1	26.16	41.60	8.63	10.23	11.06	2.32
Punto 2	43.73	35.12	8.61	10.13	0.66	1.75

4.2.2.6 Fundo Mata Linda no magnético

- Grano 1

La Figura 4.35 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta.

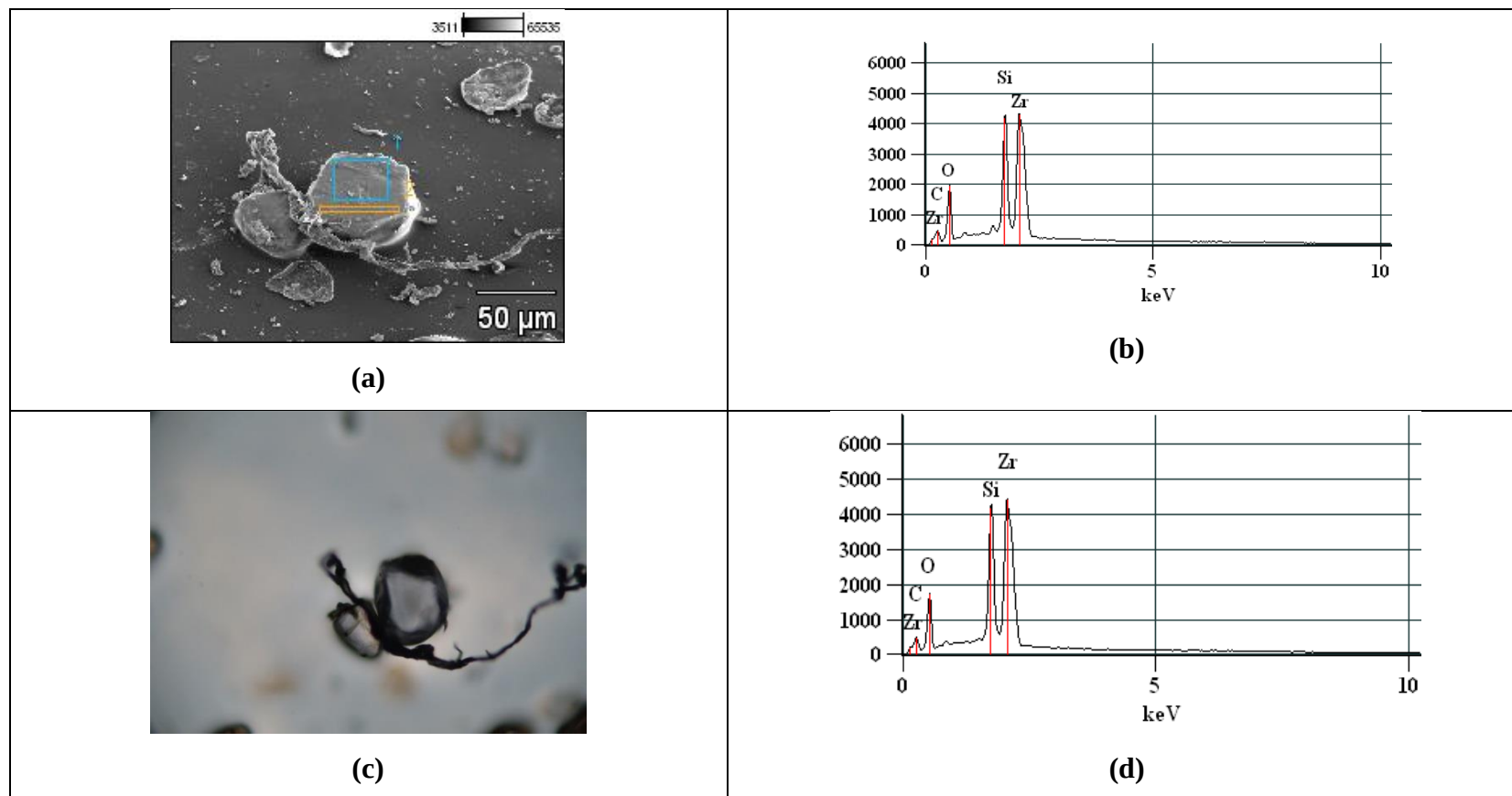


Figura 4.35. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Fundo Mata Linda no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.35 y 4.36 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.35. Porcentaje en peso de los elementos				
Peso (%)	C-K	O-K	Si-K	Zr-L
Punto 1	0.71	17.47	16.60	65.22
Punto 2	0.63	13.70	17.16	68.51
Tabla 4.36. Porcentaje atómico de los elementos				
Átomos (%)	C-K	O-K	Si-K	Zr-L
Punto 1	2.40	44.44	24.06	29.10
Punto 2	2.32	37.70	26.91	33.07

- Grano 2

La Figura 4.36 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta.

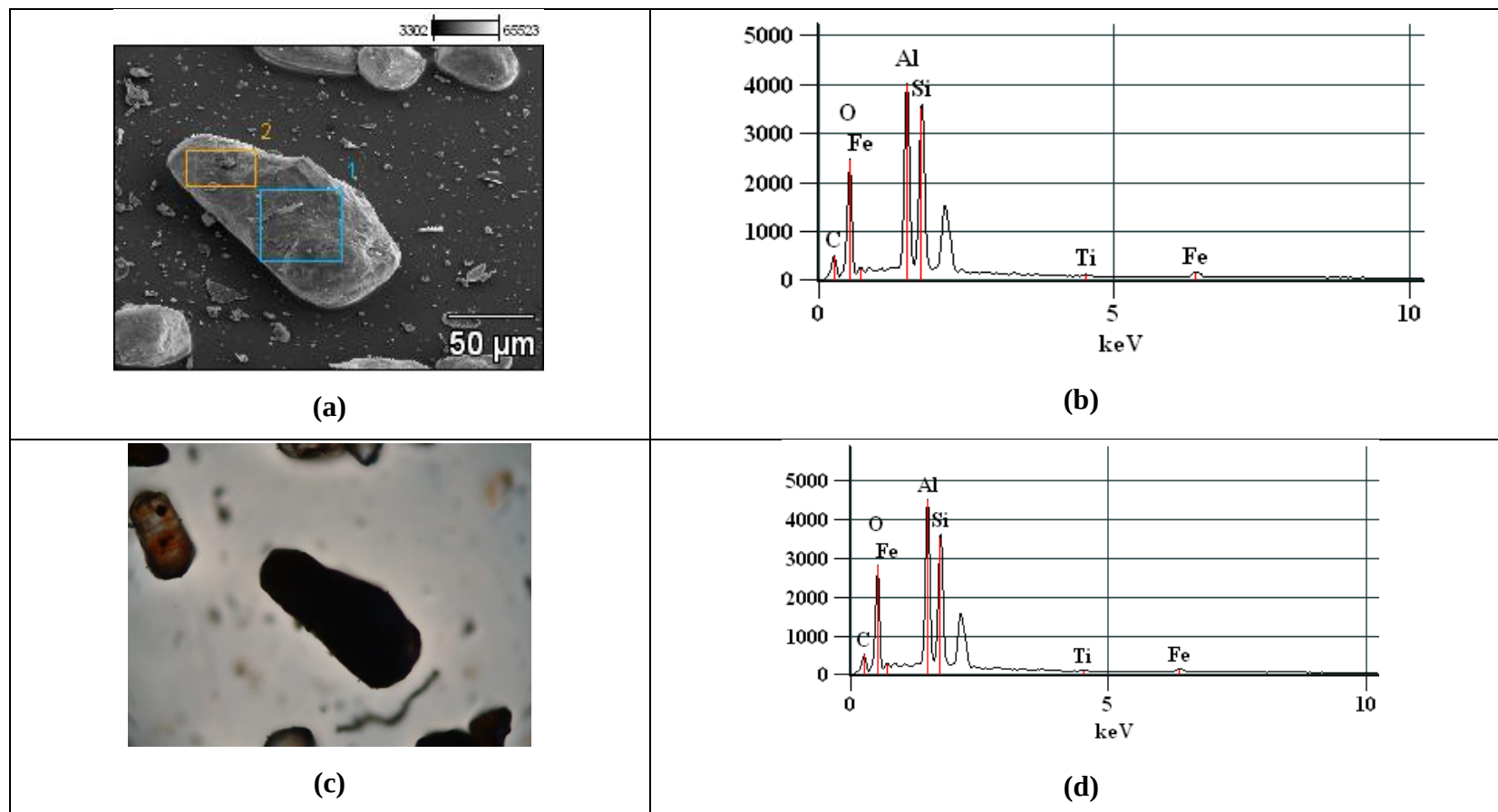


Figura 4.36. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Fundo Mata Linda no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicols paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.37 y 4.38 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.37. Porcentaje en peso de los elementos							
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Fe-K	Au-L
Punto 1	13.24	30.92	17.78	19.51	1.04	6.42	
Punto 2	28.74	34.09	16.35	15.79	0.78	4.25	

Tabla 4.38. Porcentaje atómico de los elementos							
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	Ti-K	Fe-K	Au-L
Punto1	24.06	42.18	14.38	15.16	0.47	2.51	
Punto 2	41.36	36.84	10.48	9.72	0.28	1.32	

4.2.2.7 Moitaco Magnético

- Grano 1

La Figura 4.37 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de O, Al y Si en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

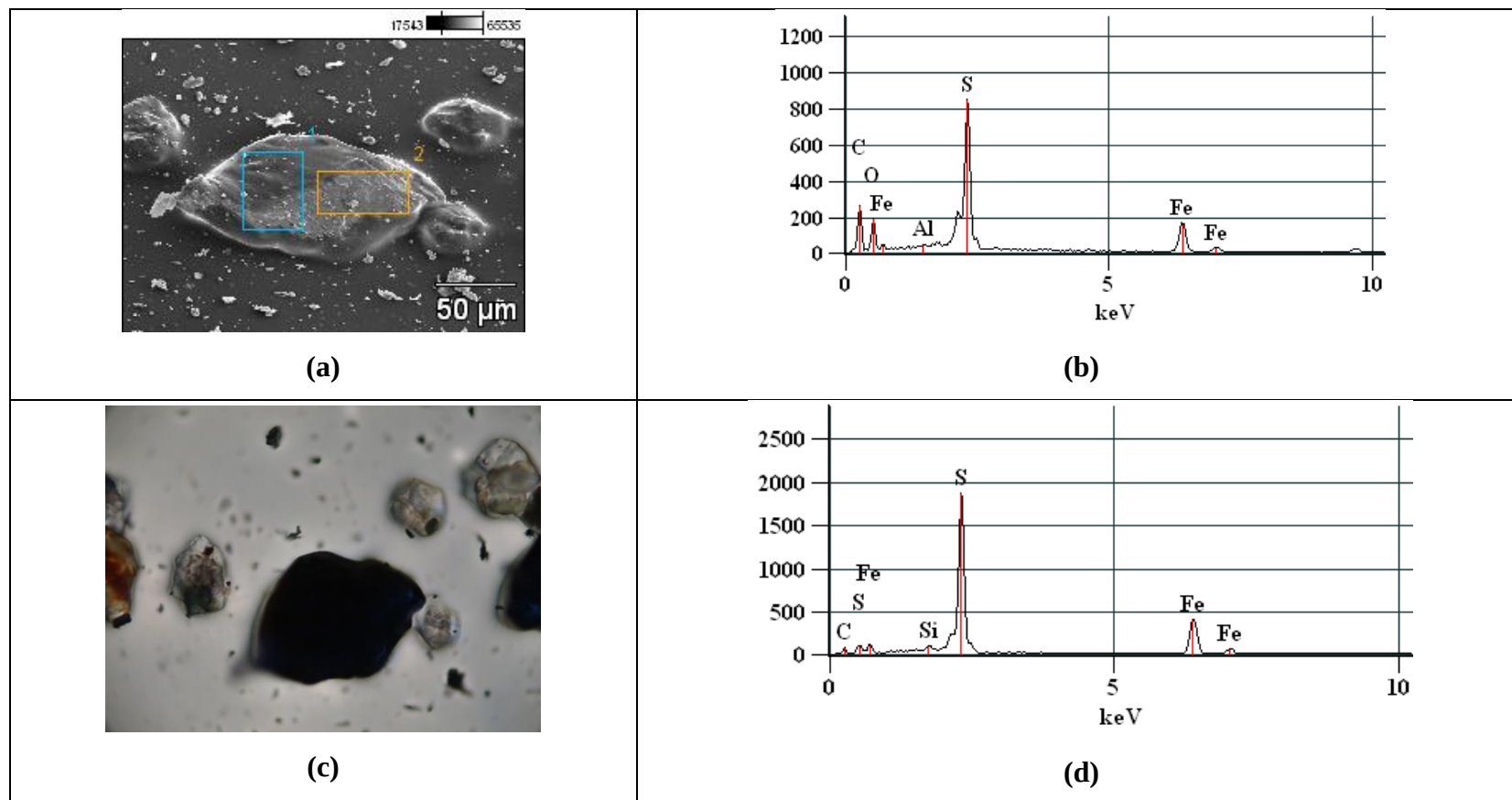


Figura 4.37. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.39 y 4.40 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.39. Porcentaje en peso de los elementos						
Peso (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	Fe-K
Punto 1	56.53	13.94	0.54		15.10	13.89
Punto 2	28.74			1.39	33.81	36.06
Tabla 4.40. Porcentaje atómico de los elementos						
Átomos (%)	C-K	O-K	Al-K	Si-K	S-K	Fe-K
Punto 1	74.50	13.79	0.32		7.46	3.94
Punto 2	57.76			1.19	25.46	15.59

- Grano 2

La Figura 4.38 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe y Mg en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

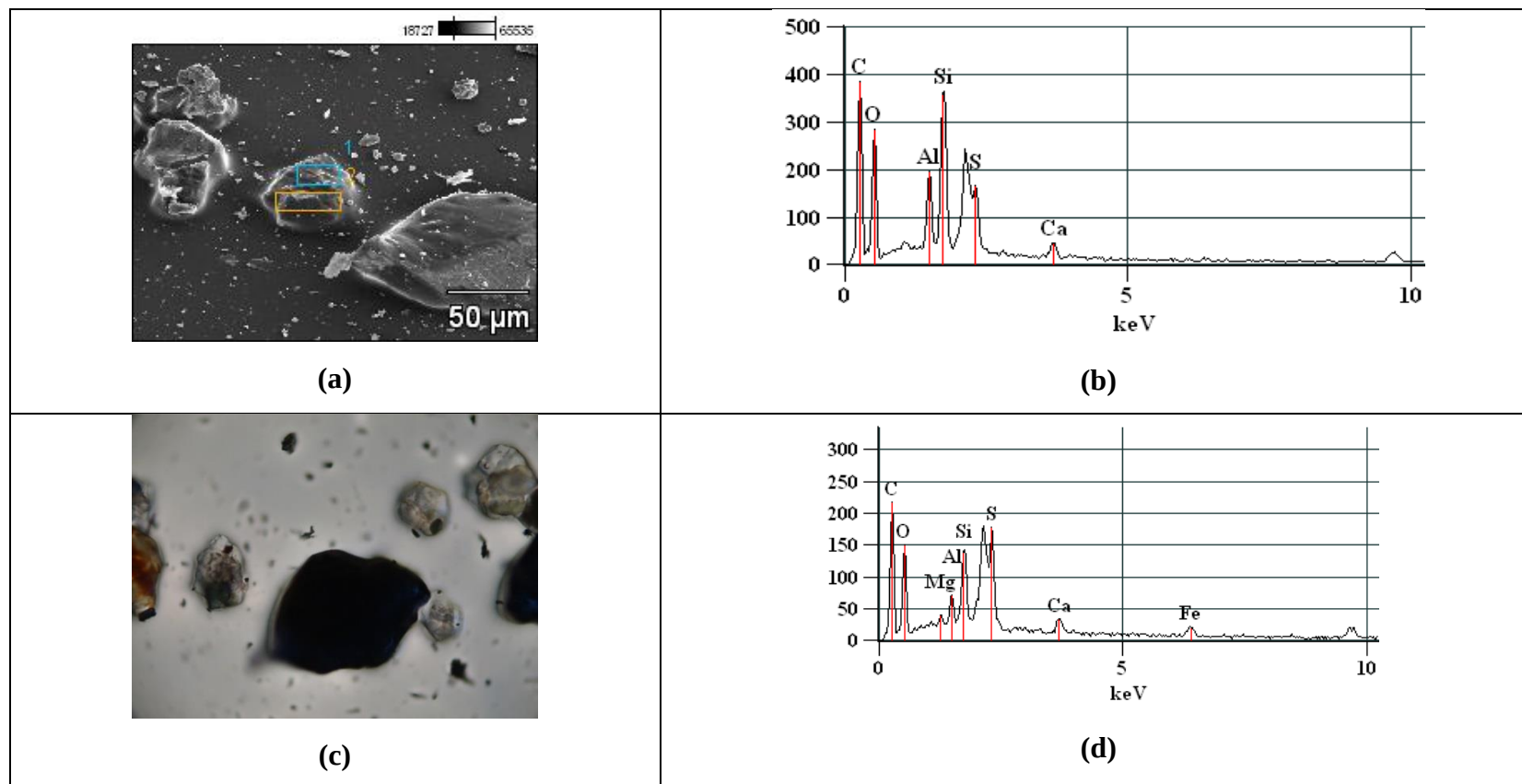


Figura 4.38. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.41 y 4.42 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.41. Porcentaje en peso de los elementos								
Peso (%)	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Fe-K
Punto 1	62.07	25.33		2.49	5.56	3.43	1.11	
Punto 2	61.27	23.64	0.66	1.46	3.60	5.84	1.45	2.07
Tabla 4.42. Porcentaje atómico de los elementos								
Átomos (%)	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Fe-K
Punto 1	72.01	22.06		1.29	2.76	1.49	0.39	
Punto 2	72.42	20.98	0.38	0.77	1.82	2.59	0.51	0.53

4.2.2.8 Moitaco No Magnético

- Grano 1

La Figura 4.39 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Na, Al, Cl y K en uno de los puntos, pero no en el otro, además el Ca está por debajo del 0,25%, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

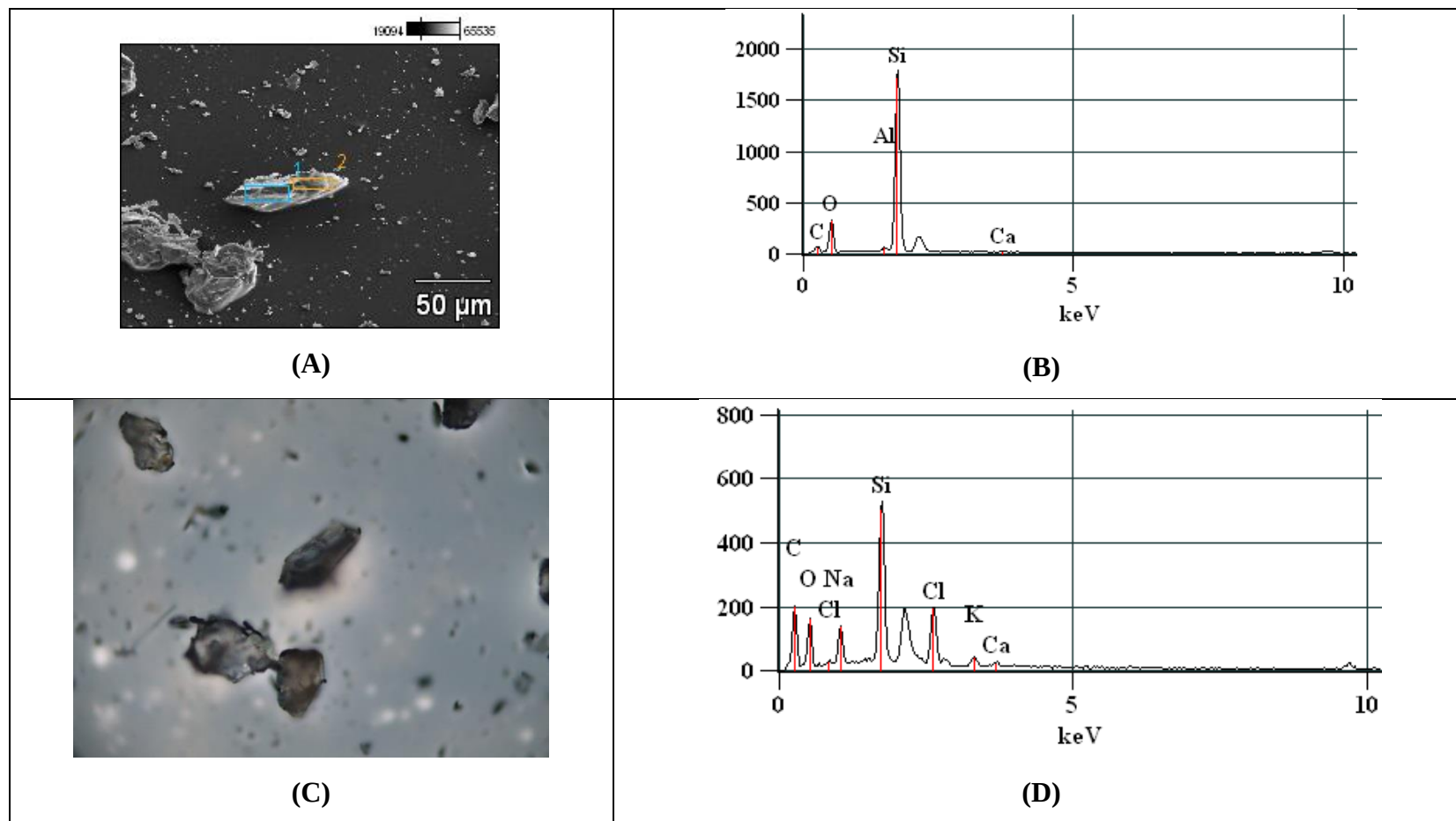


Figura 4.39. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco no magnético. A) zonas del cristal analizado. B) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. C) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicols paralelos. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.43 y 4.44 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.43. Porcentaje en peso de los elementos								
Peso (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ca-K
Punto 1	33.92	31.36		0.65	33.83			0.24
Punto 2	60.36	18.50	4.03		9.61	5.73	1.12	0.66
Tabla 4.44. Porcentaje en atómico de los elementos								
Átomos (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ca-K
Punto 1	46.92	32.57		0.40	20.01			0.10
Punto 2	72.77	16.75	2.54		4.95	2.34	0.41	0.24

- Grano 2

La Figura 4.40 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

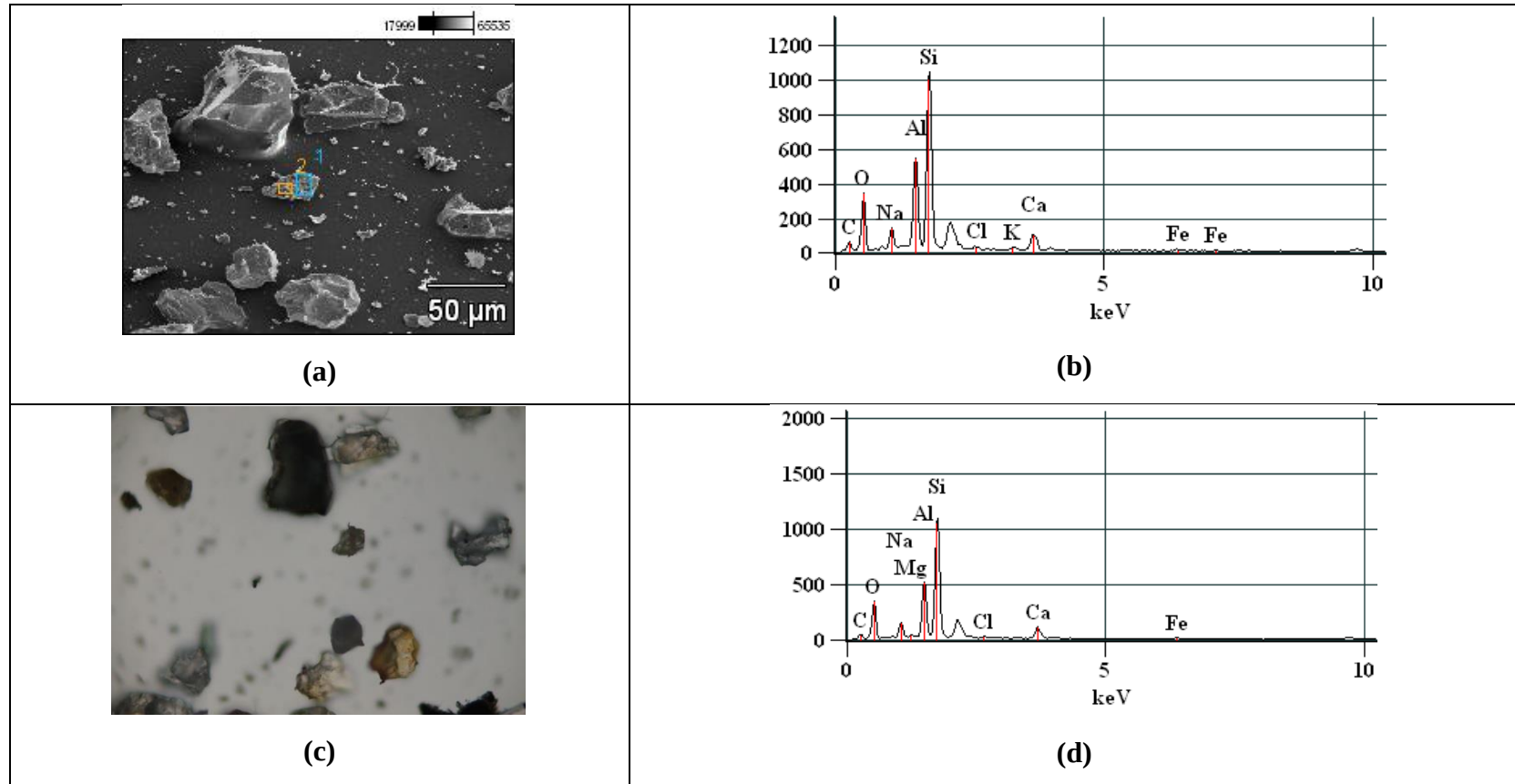


Figura 4.40. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Moitaco no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicols paralelos; c) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.45 y 4.46 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.45. Porcentaje en peso de los elementos											
Peso (%)	C-K	O-K	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Au-L
Punto 1	22.4 7	24.3 7	3.66		9.12	18.4 7	0.43	0.4 6	3.90	0.92	16.2 0
Punto 2	19.9 2	30.8 5	5.22	0.64	11.2 9	25.5 0	0.68		5.09	0.80	

Tabla 4.46. Porcentaje en atómico de los elementos											
Átomos (%)	C-K	O-K	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	Cl-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Au-L
Punto 1	39.2 3	31.9 4	3.34		7.09	13.7 9	0.26	0.2 5	2.04	0.34	1.72
Punto 2	31.1 3	36.2 0	4.26	0.49	7.85	17.0 4	0.36		2.39	0.27	

4.2.2.9 Peñón Aro Magnético

- Grano 1

La Figura 4.41 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Na, Al, Cl, Fe y Yb en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

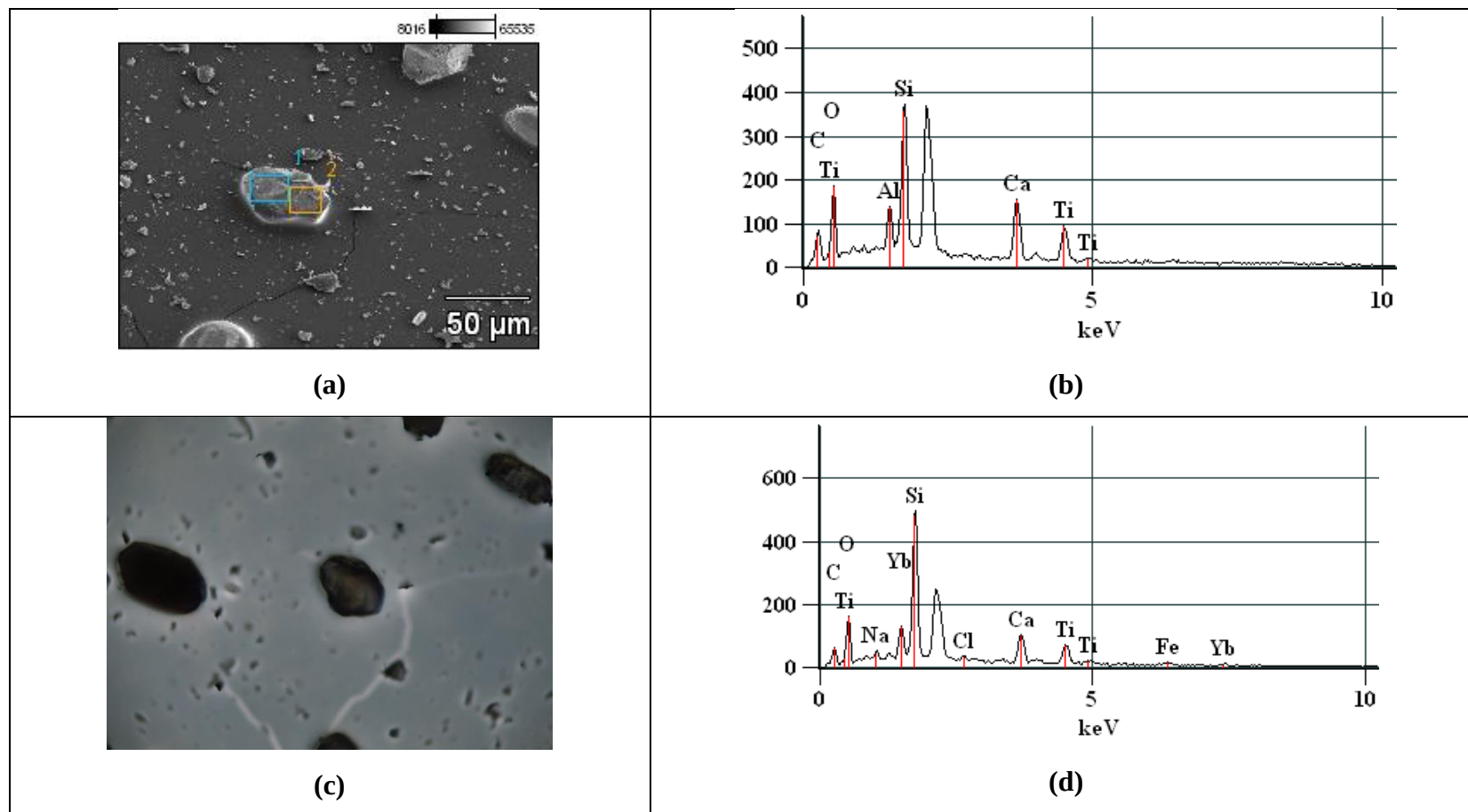


Figura 4.41. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro magnético.; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.47 y 4.48 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.47. Porcentaje en peso de los elementos.										
Peso (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	Cl-K	Ca-K	Ti-K	Fe-K	Yb-L
Punto 1	33.54	30.20		3.34	12.22		10.74	9.95		
Punto2	30.38	27.36	0.94		17.74	0.63	7.91	8.65	2.18	4.21

Tabla 4.48. Porcentaje en atómico de los elementos.										
Átomos (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	Cl-K	Ca-K	Ti-K	Fe-K	Yb-L
Punto 1	48.86	33.03		2.17	7.61		4.69	3.64		
Punto 2	47.09	31.84	0.76		11.76	0.33	3.67	3.36	0.73	0.45

- Grano 2

La Figura 4.42 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Fe en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomó en cuenta para identificar el nombre del mineral.

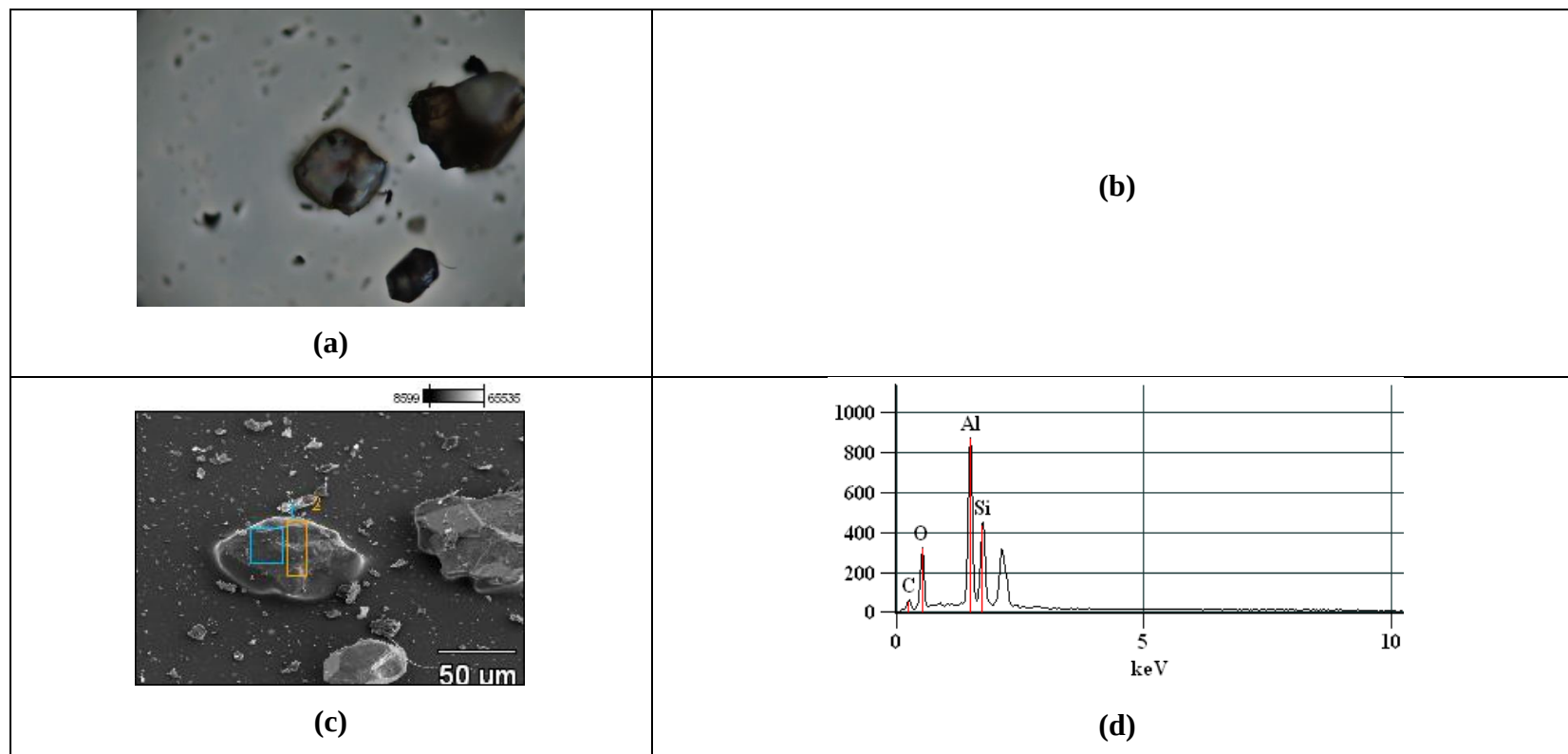


Figura 4.42. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Esta gráfica presentó un problema al momento de ser cargada; c) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal; d) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicols paralelos.

Las Tablas 4.49 y 4.50 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector. Los valores que estén por debajo de 0,25% de la segunda tabla se deben considerar ruido según las especificaciones del fabricante.

Tabla 4.49 Porcentaje en peso de los elementos						
<i>Peso (%)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>Au-L</i>
<i>Punto 1</i>	20.11	31.38	1.59	26.80	16.35	3.76
<i>Punto 2</i>	34.93	32.90		19.71	12.46	

Tabla 4.50 Porcentaje en atómico de los elementos						
<i>Átomo (%)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>Au-L</i>
<i>Punto 1</i>	31.51	36.91	1.57	18.69	10.96	0.36
<i>Punto 2</i>	47.37	33.50		11.90	7.23	

4.2.2.10 Peñón Aro No Magnético

- Grano 1

La Figura 4.43 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta.

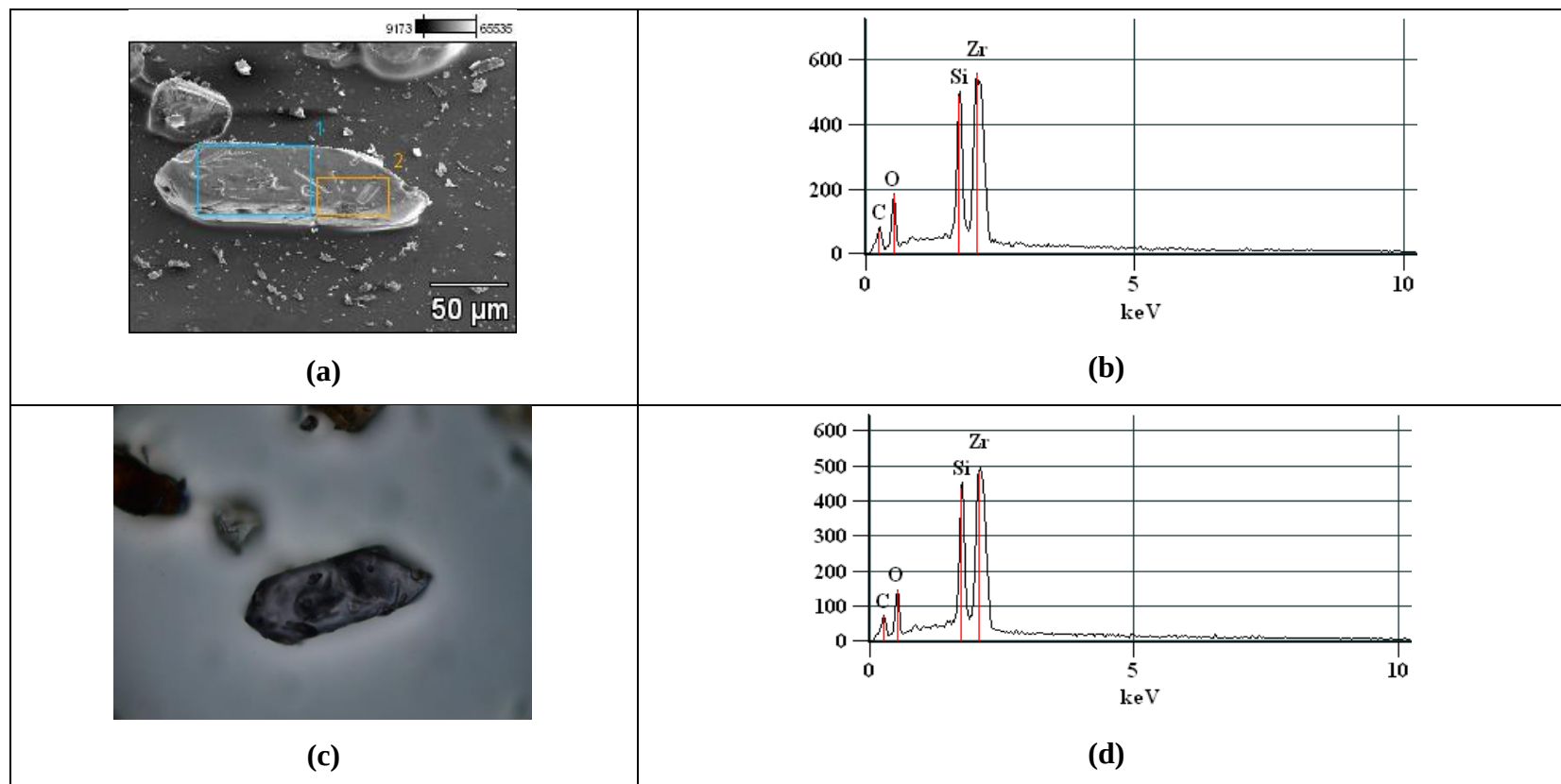


Figura 4.43. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicols paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.51 y 4.52 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.51. Porcentaje en peso de los elementos.				
Peso (%)	C-K	O-K	Si-K	Zr-L
Punto 1	32.39	21.12	9.31	37.18
Punto 2	34.67	19.42	9.06	36.84
Tabla 4.52. Porcentaje en atómico de los elementos.				
Átomos (%)	C-K	O-K	Si-K	Zr-L
Punto 1	56.70	27.76	6.97	8.57
Punto 2	59.80	25.15	6.68	8.37

- Grano 2

La Figura 4.44 representa el estudio a dos puntos de la misma muestra, que se realiza para verificar la respuesta, debido a esta corrección se observa la presencia de Na, K y Zr en uno de los puntos, pero no en el otro, por lo que no se tomaron en cuenta para identificar el nombre del mineral.

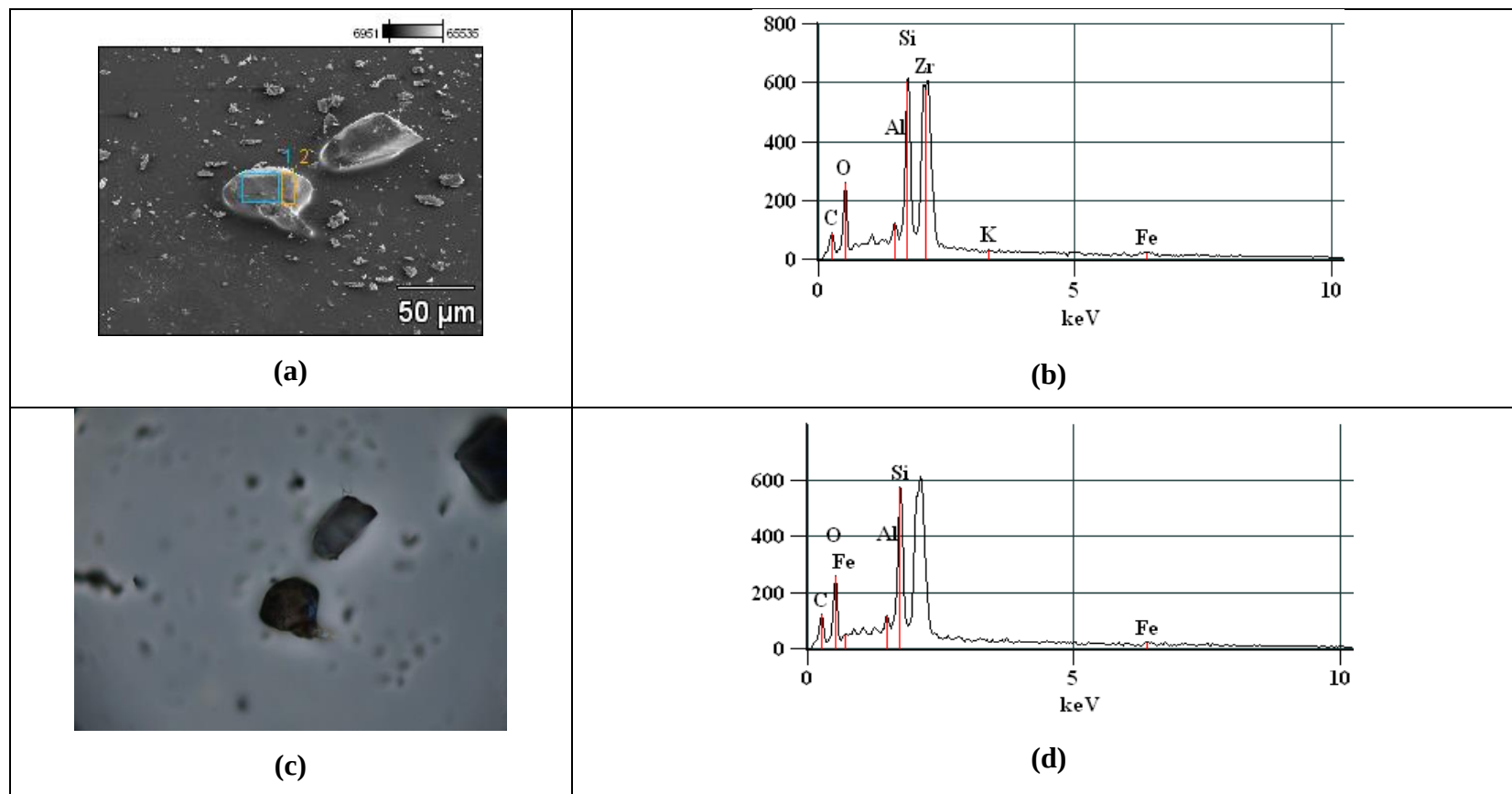


Figura 4.44. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Peñón Aro no magnético; a) zonas del cristal analizado; b) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal; c) Imagen del cristal analizado en el microscopio polarizante bajo nicoles paralelos; d) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 2 del cristal.

Las Tablas 4.53 y 4.54 representan los valores en porcentaje en peso (análisis cualitativo) y de átomos (análisis cuantitativo) producto del detector.

Tabla 4.53. Porcentaje en peso de los elementos.								
Peso (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	13.05	25.85	0.00	0.32	13.21	0.05	1.05	46.47
Punto 2	48.78	31.83		0.88	15.48		3.04	
Tabla 4.54. Porcentaje en atómico de los elementos.								
Átomos (%)	C-K	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K	Fe-K	Zr-L
Punto 1	29.26	43.50	0.00	0.32	12.66	0.04	0.50	13.72
Punto 2	60.72	29.74		0.49	8.24		0.81	

Los resultados obtenidos por medio del Microscopio Electrónico de Barrido se ven reflejados en la Tabla 4.55, mostrando los nombres de los minerales que se pudieron identificar.

Tabla 4.55. Resultados obtenidos a través del Microscopio Electrónico de Barrido para todas las muestras analizadas

Muestra	Mineral
Borbón detrítico magnético (Grano 1)	topacio
Borbón detrítico magnético (Grano 2)	circón
Borbón detrítico no magnético (Grano 1)	circón
Borbón detrítico no magnético (Grano 2)	circón
Borbón roca magnético (Grano 1)	circón
Borbón roca magnético (Grano 2)	circón
Borbón roca no magnético (Grano 1)	no reconocido
Borbón roca no magnético (Grano 2)	no reconocido
Fundo Mata Linda magnético (Grano 1)	topacio
Fundo Mata Linda magnético (Grano 2)	rutilo
Fundo Mata Linda no magnético (Grano 1)	circón
Fundo Mata Linda no magnético (Grano 2)	óxido
Moitaco magnético (Grano 1)	pirita
Moitaco magnético (Grano 2)	anortita
Moitaco no magnético (Grano 1)	cuarzo
Moitaco no magnético (Grano 2)	no reconocido
Peñón Aro magnético (Grano 1)	esfena
Peñón Aro magnético (Grano 2)	topacio
Peñón Aro no magnético (Grano 1)	circón
Peñón Aro no magnético (Grano 2)	topacio

4.3 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

4.3.1 Atributos Primarios

La Tabla 4.56 muestra el área de las cuencas, siendo la de mayor área la del Peñón Aro con 3630,57 km² y un perímetro de 562,00744 km, la cuenca que le sigue es Borbón roca con 268,25 km² y un perímetro de 109,78 km, después estaría Fundo Mata Linda con 141,28 km² y un perímetro de 101,82 km, por último están las cuencas más pequeñas con un área similar que son Borbón detrítico y Moitaco (97,44 y 81,034376 km², respectivamente), pero con perímetros muy distintos (70,21 y 52,784457 km). Los valores de elevación promedio ($174,25 \pm 66,05$ m) y pendiente ($6,86 \pm 7,49^\circ$) coinciden con la mayor cuenca, no así para los otros sectores, debido a que Fundo Mata Linda se encuentra en áreas planas (Mesas Orientales), por lo que sus valores promedio de pendiente son los más bajos ($0,72 \pm 0,67^\circ$), aunque los valores de elevación más bajos corresponden a la cuenca de Moitaco, ubicada al lado del río Orinoco, con un promedio de $64,54 \pm 26,07$ m.

Tabla 4.56. Valores estadísticos para elevación y pendiente registrados en las cuencas.

Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Elevación (m)				Pendiente (°)			
			min	máx.	media	desv. Est	min	máx.	media	desv. Est
Peñón Aro	3630,57	562,00	77	783	174,25	66,05	0	76,77	6,86	7,49
Moitaco	81,034376	52,784457	33	163	64,54	26,07	0	21,21	2,6	2,58
Fundo Mata Linda	141,28	101,82	92	158	136,61	7,43	0	6,32	0,72	0,67
Borbón detrítico	97,44	70,21	51	174	115,63	18,22	0	23,91	2,74	2,34
Borbón roca	268,25	109,78	20	217	92,25	33,49	0	28,41	3,82	3,34

La Figura 4.45 muestra el mapa de elevación y la Figura 4.46 el mapa de pendientes de la zona de estudio, ambos señalando las cuencas.

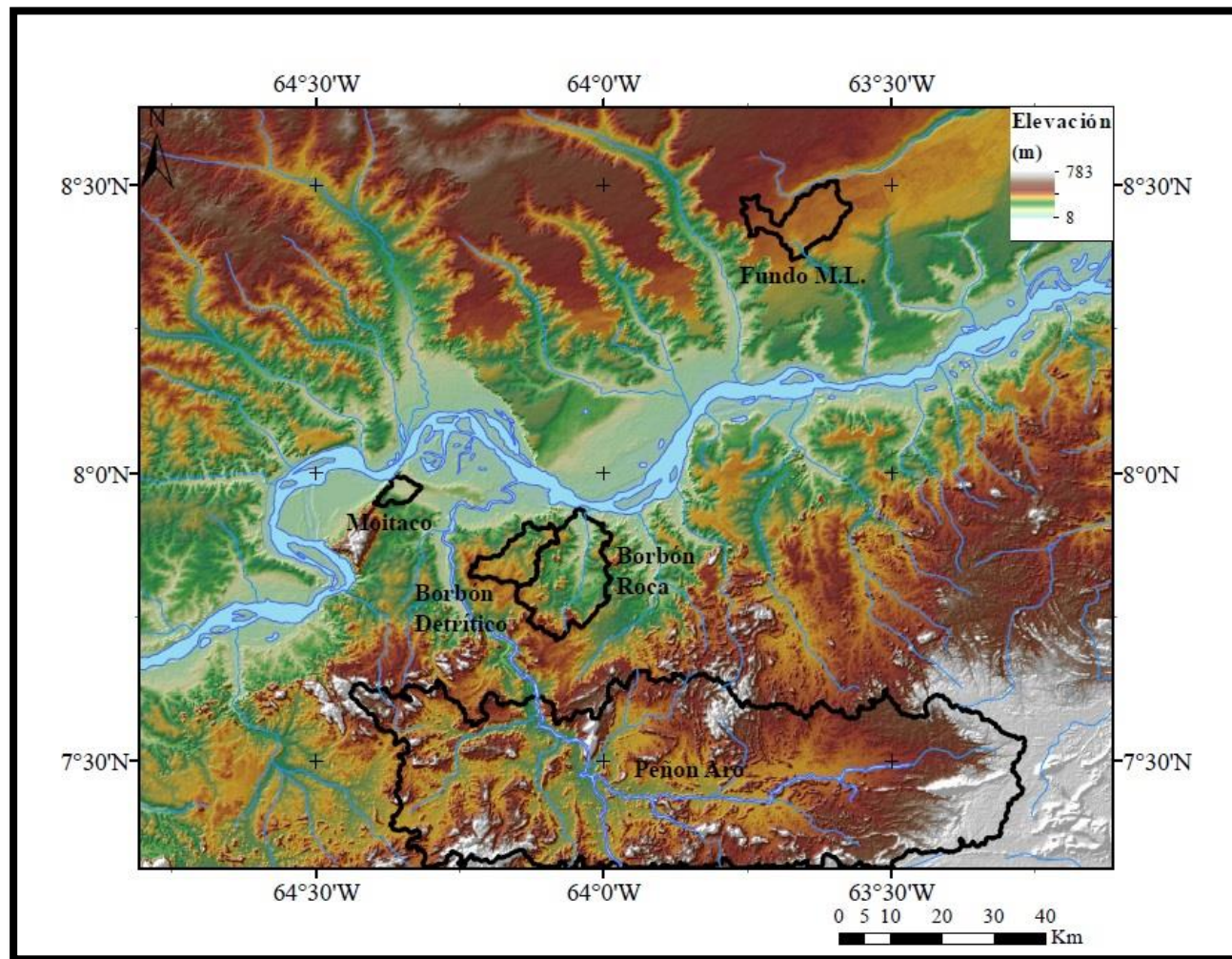


Figura 4.45. Modelo de elevación digital a una resolución de 90 metros, los polígonos en negro representan las cuencas analizadas.

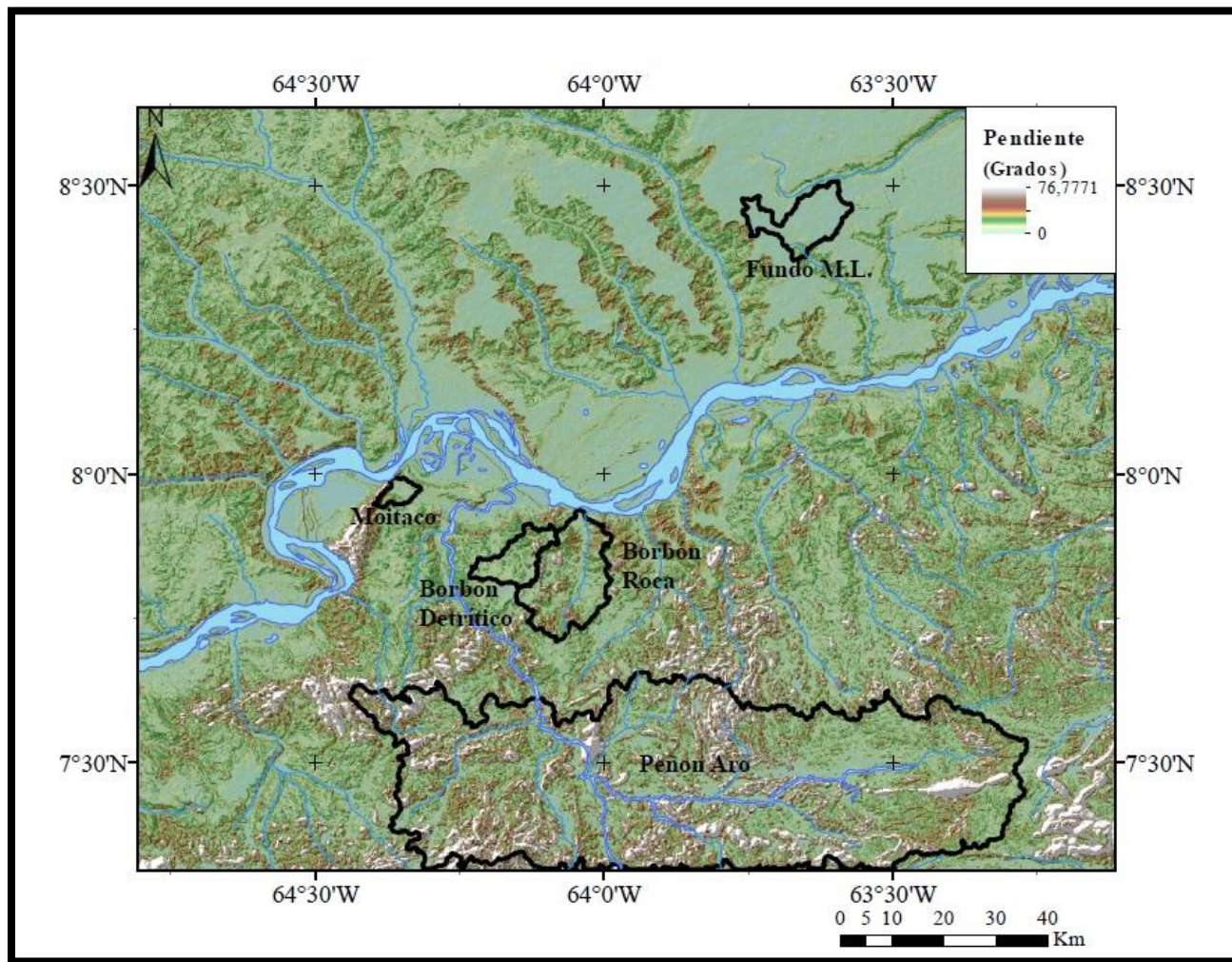


Figura 4.46. Mapa de pendiente.

4.3.2 Atributos Secundarios

La Tabla 4.57 muestra los valores del relieve calculados a 1, 3, 5 y 7 km de radio por cada cuenca, teniendo los mayores valores en Peñón del Aro con promedio de $58,07 \pm 48,29$; $140,12 \pm 88,22$; $197,99 \pm 105,14$ y $243,68 \pm 113,4$ metros, respectivamente. Los menores valores corresponden a Fundo Mata Linda con $4,68 \pm 3,57$; $8,55 \pm 5,09$; $12,5 \pm 5,24$; $17,03 \pm 5,81$ m.

Tabla 4.57. Valores estadísticos de relieve calculados a diferentes radios.

Cuenca	Relieve 1 km de radio				Relieve 3 km de radio				Relieve 5 km de radio				Relieve 7 km de radio			
	mín.	máx.	media	Desv. est	mín.	máx.	media	Desv. est	mín.	máx.	media	Desv. est	mín.	máx.	media	Desv. est
Peñón Aro	0	393	58,07	48,29	0	608	140,12	88,22	0	618	197,99	105,14	0	624	243,68	113,4
Moitaco	0	97	22,87	18,42	3	138	68,39	32,14	32	178	109,84	24,31	84	239	150,38	36,05
Fundo Mata Linda	0	33	4,68	3,57	0	47	8,55	5,09	1	48	12,5	5,24	2	50	17,03	5,81
Borbón Detrítico	0	94	20,72	14,15	0	109	38,4	22,89	0	121	50,68	26,31	3	134	62,38	30,26
Borbón Roca	0	131	30,97	21,06	0	151	73,22	31,49	0	166	103,84	27,67	0	205	123,99	29,92

La Figura 4.47 presenta el relieve a 5 Km de radio, nótese que los valores más altos del relieve se encuentran todos al sur del río, en la cuenca del río Peñón Aro.

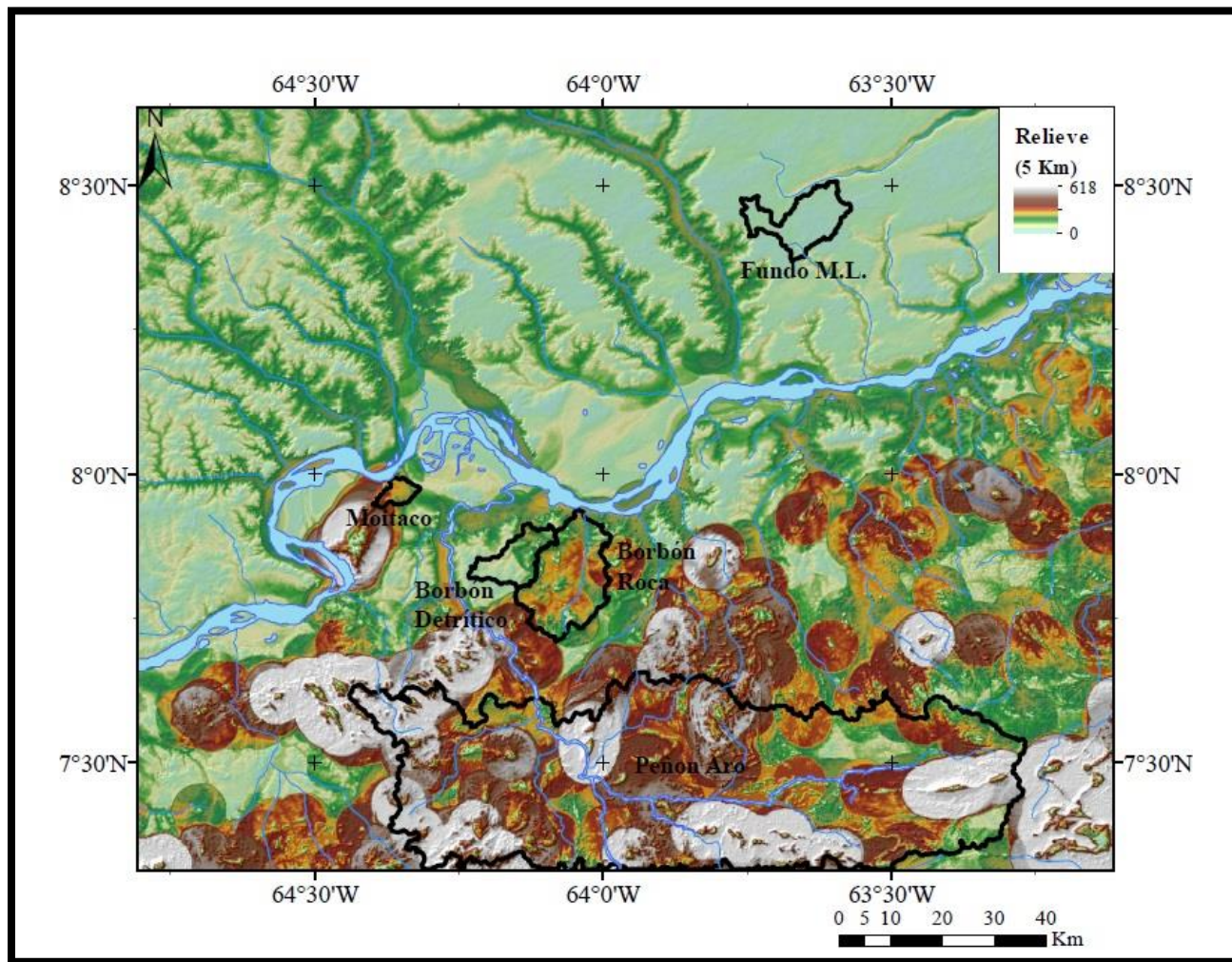


Figura 4.47. Mapa de relieve calculado con un radio de 5 Km.

Los atributos secundarios del terreno, tales como los índice de humedad, capacidad de transporte e índice de erosión, se ven afectados por la tasa de precipitación, para esta última se utilizó la misión TRMM 2B31 de la NASA, compilados por el Dr. Bodo Bookhagen de la Universidad de Santa Bárbara, California, esta misión consistió en la elaboración de modelos por medio de datos recogidos por sensores ubicados en satélites, estos fueron corregidos con estaciones que miden los caudales de agua en diferentes lugares de Suramérica, excepto Venezuela. La tabla 4.58 muestra los valores obtenidos de precipitación en cada una de las cuencas, en esta se puede observar que el valor más alto está en Peñón Aro con un máximo de 2089,45 mm/año, pero los promedios son muy parecidos: Peñón Aro ($1357,29 \pm 276,54$ mm/año), Moitaco ($1172,16 \pm 135,41$), Borbón roca ($1035,1 \pm 120,45$ mm/año), Borbón detrítico ($927,74 \pm 78,65$ mm/año) y Fundo Mata Linda ($916,19 \pm 78,65$ mm/año).

Tabla 4.58. Valores de precipitación anual promedio registrados en cada cuenca según el modelo TRMM 2B31 para el período 1998-2009.

Cuenca	Precipitación (mm/año)			
	mín.	máx.	media	Desv. est
Peñón Aro	683,54	2089,45	1357,29	276,54
Moitaco	931,15	1523,28	1172,16	135,41
Fundo Mata Linda	594,99	1257,63	916,19	138,71
Borbón detrítico	810,92	1225,84	927,74	78,65
Borbón roca	771,43	1314,72	1035,1	120,45

La Figura 4.48 representa el mapa de precipitaciones del área de estudio, en este se puede ver como los valores más altos están en el Sur del mapa, coincidiendo con la cuenca de Peñón Aro.

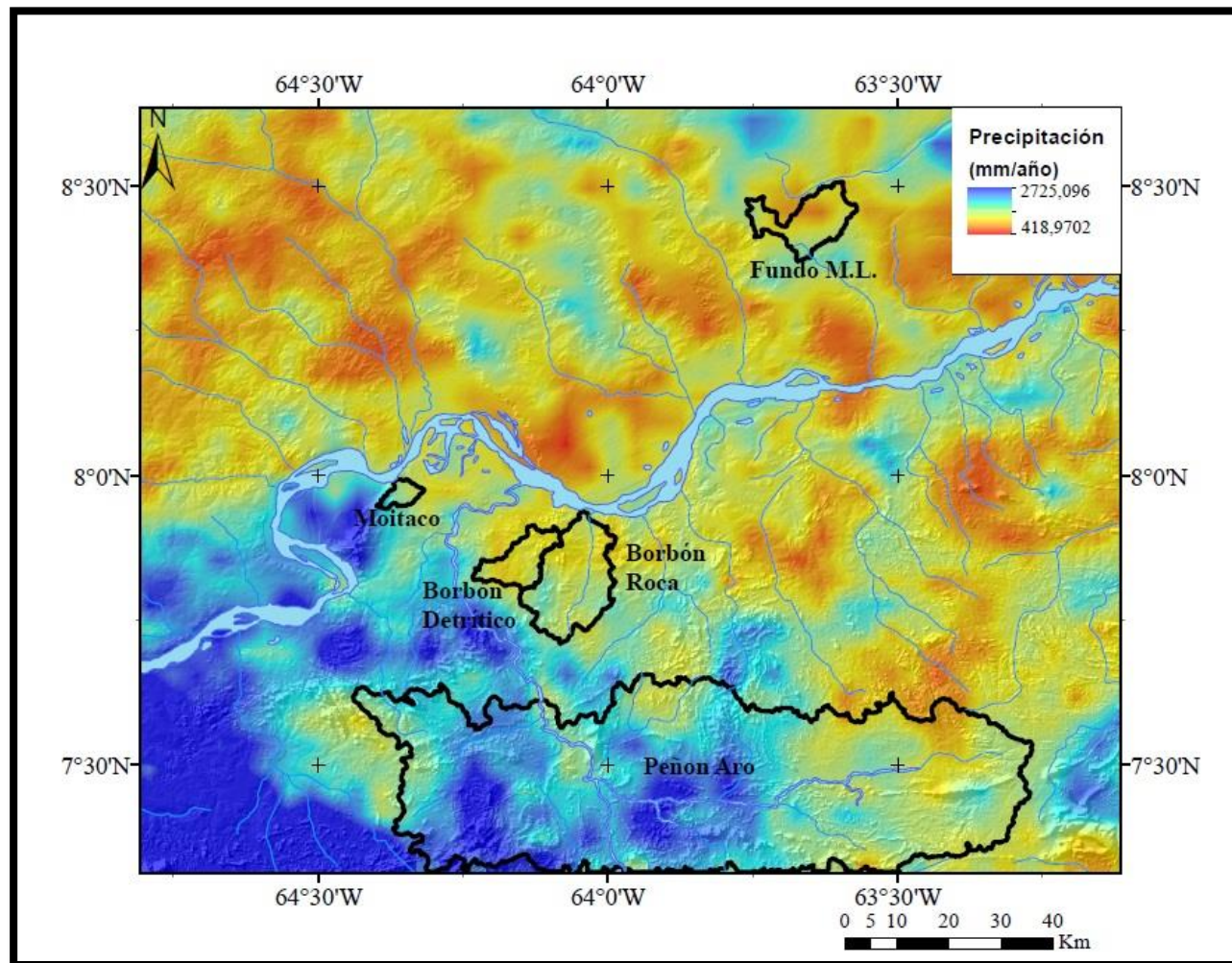


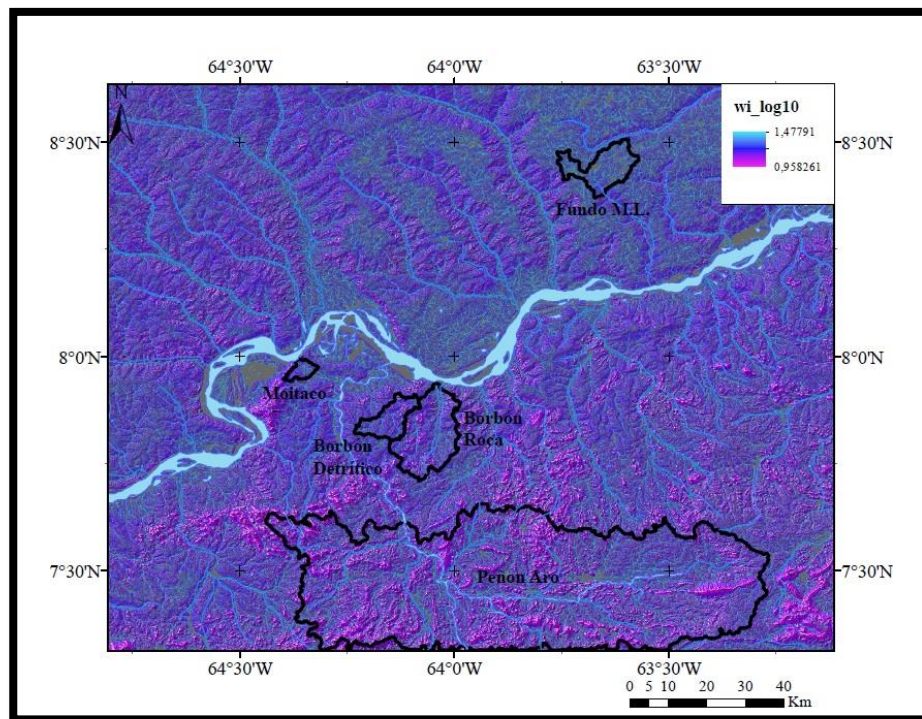
Figura 4.48. Mapa de precipitaciones anuales derivado del modelo TRMM 2B31 para el período 1998-2009.

Los valores de los índices de humedad vienen dados por la formula $WI = \ln(A/\tan S)$, donde A es el área de drenaje y S es la pendiente, este valor es adimensional. El índice de humedad sin precipitación es considerado uniforme, llamándolo WI, si se aplica la precipitación, en el caso de la investigación los datos del TRMM, se llama WIP. La tabla 4.59 incluye los índices de humedad uniformes y con precipitación, lo que permite comparar el promedio entre las cuencas, presentando valores muy parecidos, entre 13,99 a 14,87 para los uniformes y 18,78 a 19,55 con precipitación, exceptuando Fundo Mata Linda que presenta los valores más altos en ambas, 16,22 en los uniformas y 20,63 con la precipitación.

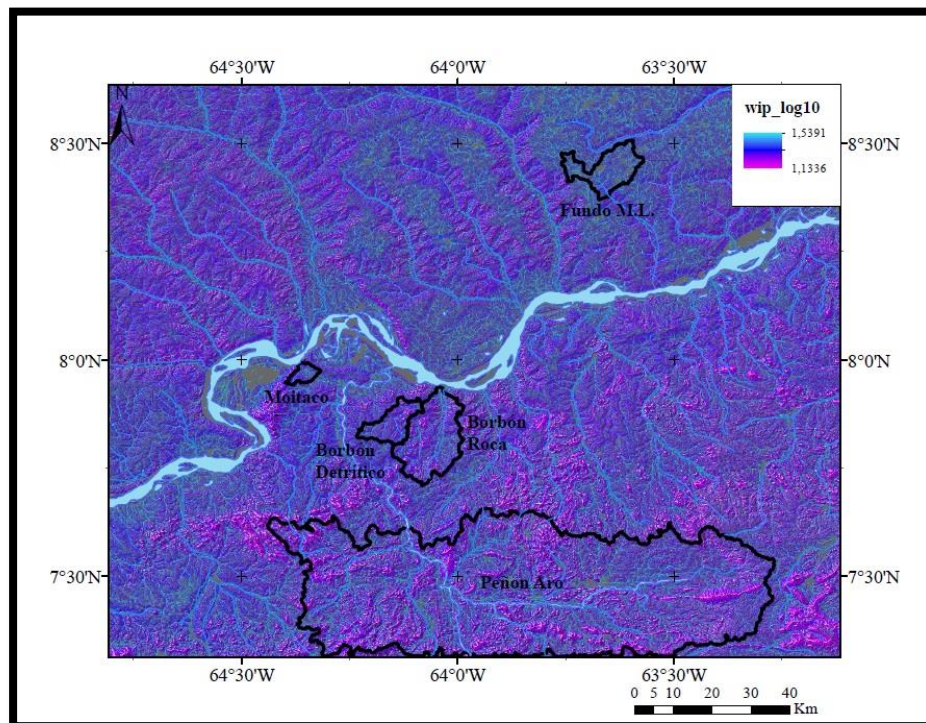
Tabla 4.59. Índices de humedad calculados para cada una de las cuencas con precipitación uniforme (WI) y con precipitación variable (WIP) según los TRMM.

Cuenca	WI				WIP (NASA)			
	mín.	máx.	media	Desv. est	mín.	máx.	media	Desv. est
Peñón Aro	9,08	28,26	13,99	2,84	13,6	33,08	18,78	2,83
Moitaco	10,58	23,34	14,87	2,31	15,39	28,01	19,55	2,28
Fundo Mata Linda	11,87	24,89	16,22	2,27	16,58	29,37	20,63	2,26
Borbón detrítico	10,46	24,63	14,61	2,33	14,87	29,07	19,04	2,34
Borbón roca	10,31	25,68	14,39	2,54	14,72	30,22	18,93	2,55

La Figura 4.49 muestra los mapas de índice de humedad, tanto uniforme como con precipitación variable.



(a)



(b)

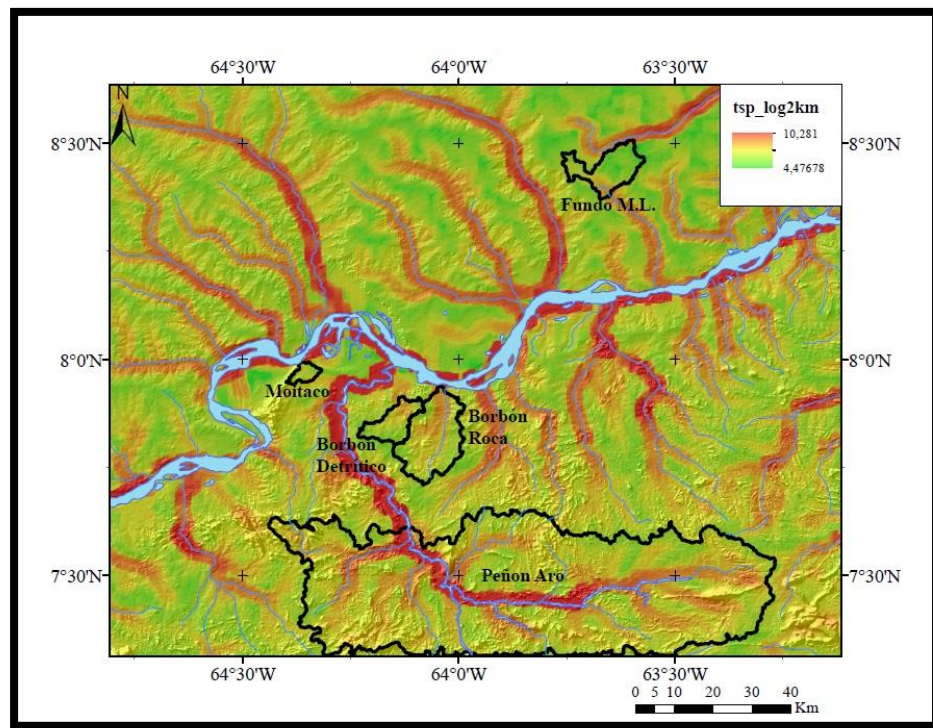
Figura 4.49. Mapas de índice de humedad. a) Precipitación Uniforme; b) Precipitación basada en los datos de la misión TRMM.

La Tabla 4.60 muestra los índices de erosión, estos son TSP, USP y SSP, estos van a estar divididos entre los calculados con precipitación uniforme y los que se varía la precipitación basado en los datos del modelo TRMM y son resaltados en color gris en la misma tabla. La comparación entre los índices de erosión viene dado no sólo por los modelos de precipitación, sino también reflejan las diferencias entre las cuencas, siendo la del Peñón Aro la que posee los valores más altos entre todos los índices.

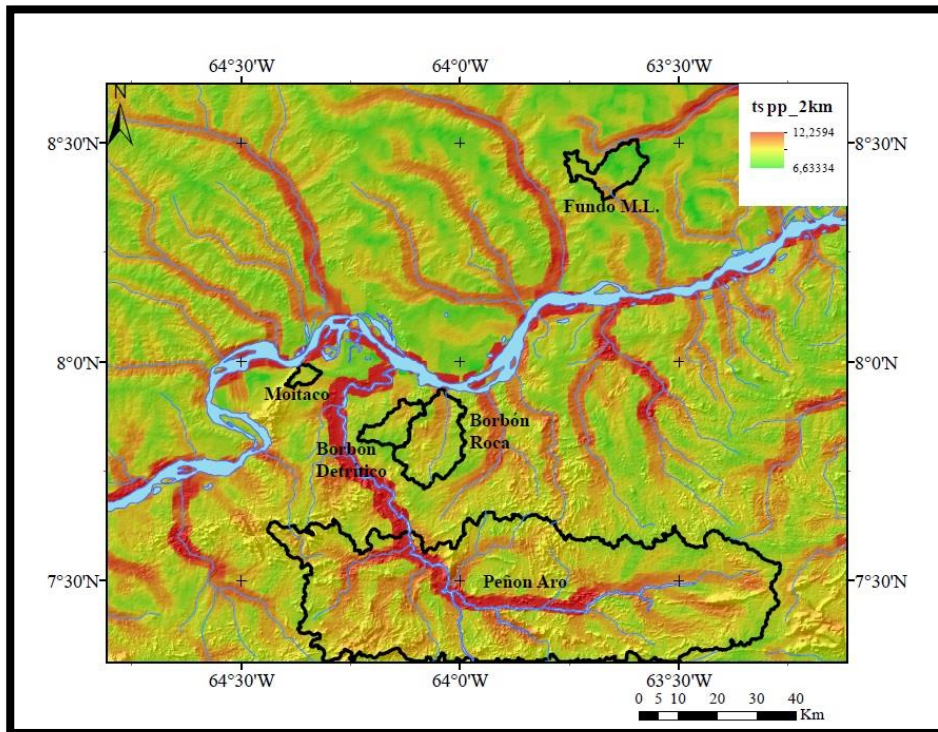
Las Figuras 4.50, 4.51 y 4.52 representan los mapas de TSP, USP y SSP sin precipitación en la parte superior de la hoja y con la precipitación variable según los modelos TRMM en la parte inferior; se puede observar que los valores más altos de erosión se encuentran al sur del río, mostrando así a las cuencas ubicadas en esa zona como las de mayor valor, por último, se observa que la cuenca Fundo Mata Linda posee los menores valores de erosión.

Tabla 4.60 Índice de erosión por cuenca, los valores en casillas blanca representan precipitación uniforme, las casillas grises es la precipitación variable obtenida por el modelo TRMM.

Cuenca	TSP				USP				SSP			
	mín.	máx.	media	Desv. est	mín.	máx.	media	Desv. est	mín.	máx.	media	Desv. est
Peñón Aro	0	159618896	48367,97	1177744	0	3488,01	10,54	33,28	0	230	3,44	5,25
	0	18648518656	5648525,27	1358686	0	35458,52	116,94	360,99	0	1079,31	17,11	26,06
Moitaco	0	729934,25	3782,12	20572,13	0	140,14	4,50	7,70	0	26,98	2,07	2,54
	0	46654584	460026,23	2071040	0	2889,33	67,23	167,33	0	202,86	10,41	19,46
Fundo Mata Linda	0	2540419	6178,55	72836,39	0	231,92	1,76	8,23	0	37,75	0,88	2
	0	224027088	547921,49	6459867	0	2177,89	16,44	77,62	0	168,02	3,88	8,93
Borbón detrítico	0	2275856,75	8614,16	75052,93	0	264,45	4,76	10,63	0	41,2	2,14	2,78
	0	193832576	732462,18	6369638	0	2440,57	43,70	97,82	0	181,27	9,37	12,21
Borbón roca	0	6160606,5	14019,67	134823,7	0	413,89	6,47	14,35	0	55,54	2,59	3,46
	0	587802944	1355822,11	1299856	0	4214,14	62,63	140,90	0	260,9	11,76	15,76

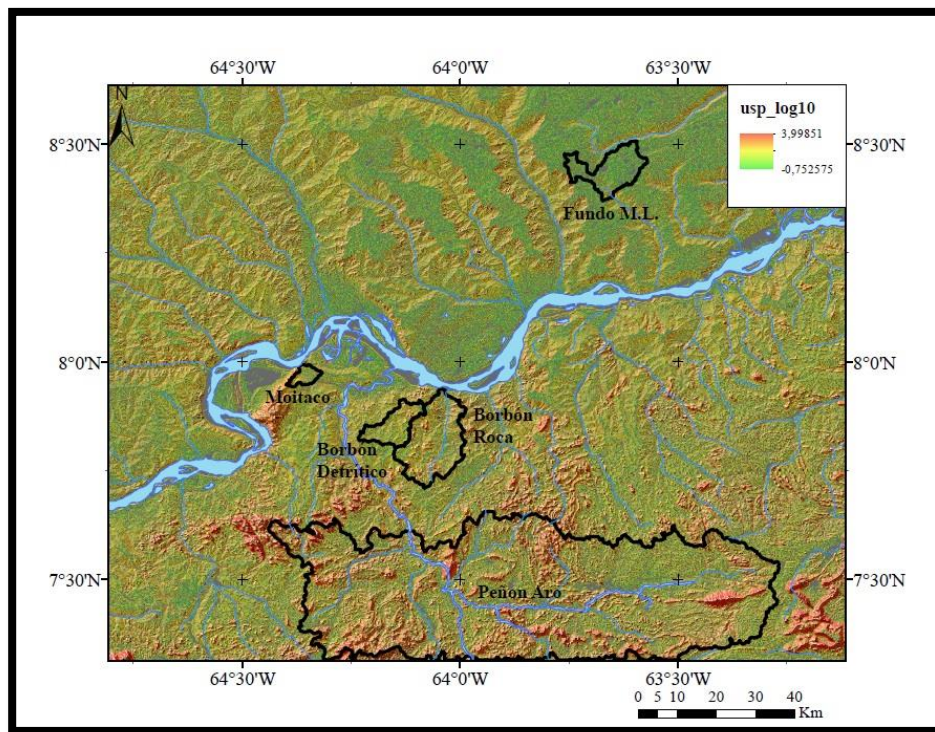


(a)

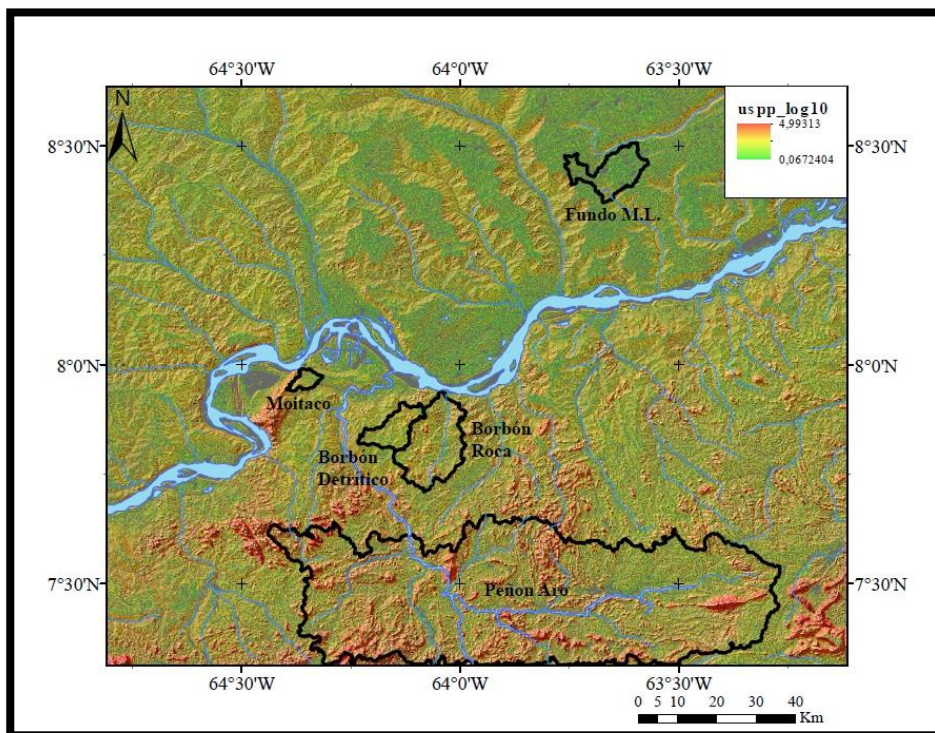


(b)

Figura 4.50. Mapas de TSP: a) Precipitación uniforme, b) Precipitación variable según los datos TRMM.

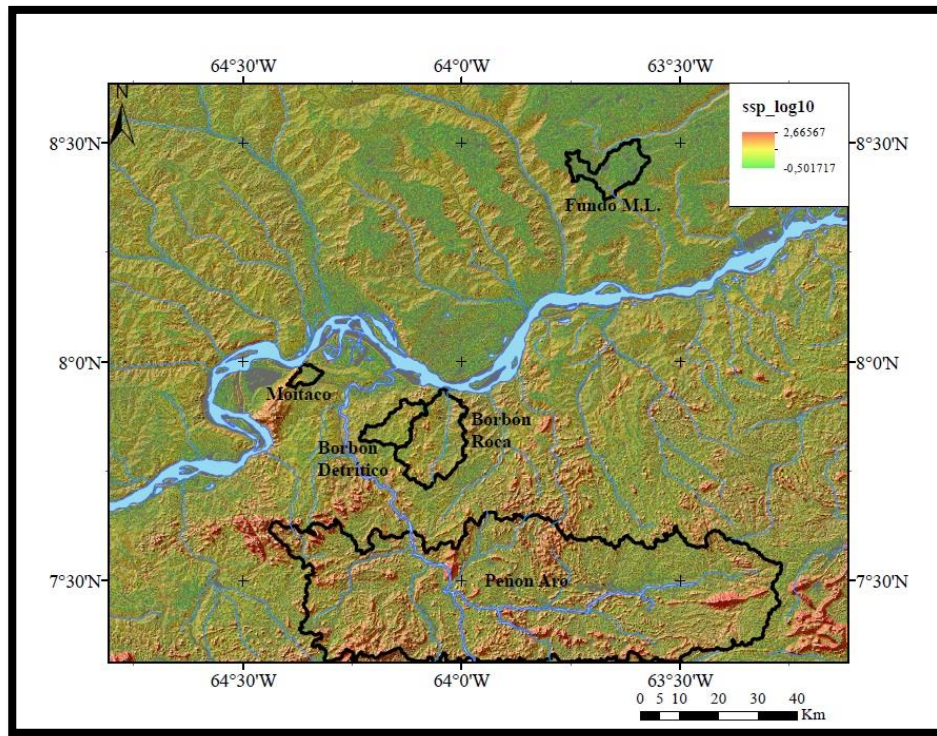


(a)

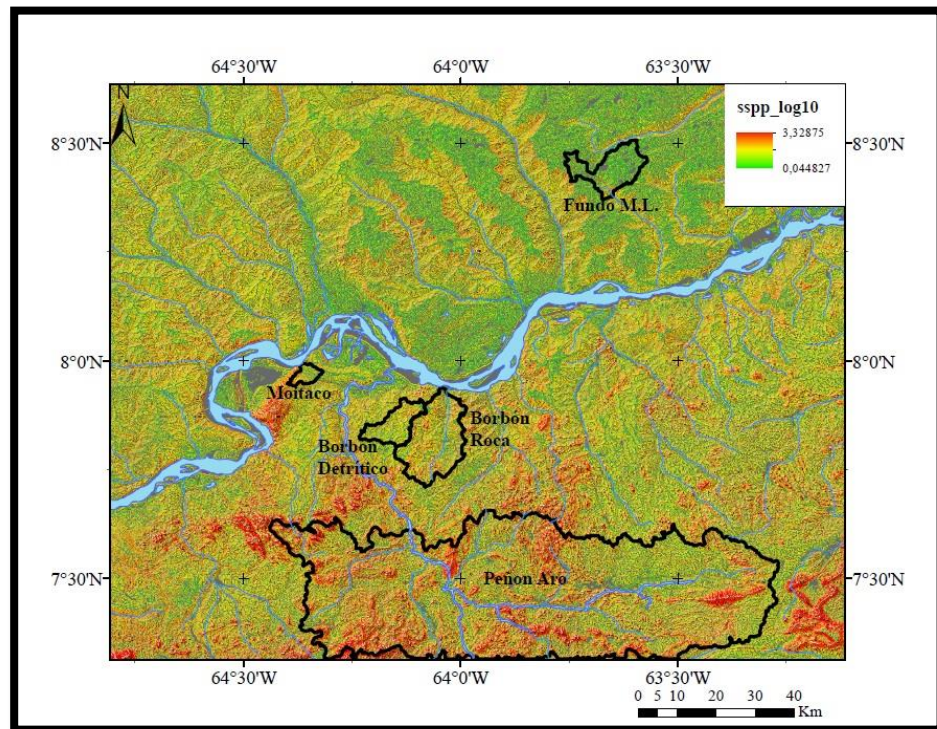


(b)

Figura 4.51. Mapas de USP con a) Precipitación uniforme y b) Precipitación variable según los datos TRMM.



(a)



(b)

Figura 4.52. Mapas de SSP con: a) Precipitación uniforme y b) Precipitación variable según los datos TRMM

La Figura 4.53 representa los promedios de los índices de erosión normalizados, para que éstos puedan ser comparados de forma cualitativa. La normalización de los valores permite usar a la cuenca Peñón Aro como base para compararla con las demás. Fundo Mata Linda presentó los valores más bajos en casi todos los índices a excepción de TSP donde el menor valor se registra en la cuenca de Moitaco.

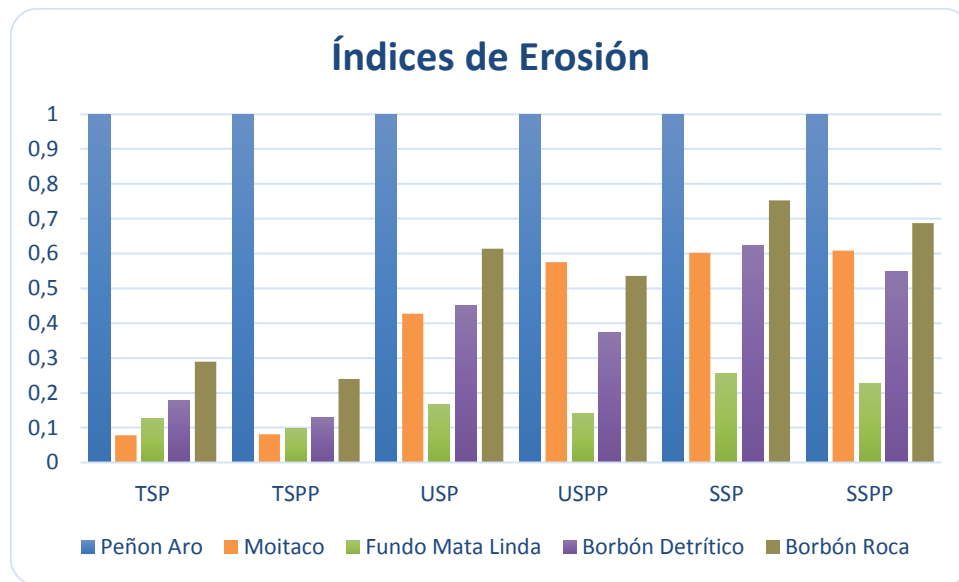


Figura 4.53. Gráfica de los promedios normalizados de los índices de erosión.

CAPITULO V

ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta el análisis y discusión detallada de los diferentes resultados obtenidos a lo largo de las cinco zonas de interés, y que fueron mostrados en el capítulo anterior, haciendo énfasis en la relación entre las topo-formas y el clima del área de estudio, y la diferenciación de la Formación Mesa situada al norte y al sur del río Orinoco.

5.2 MINERALES PESADOS

Los minerales pesados se estudiaron de dos formas, una por la parte morfo-textural, en el cual se utilizó un programa de edición de imágenes para adquirir datos cuantitativos y la otra para los estudios químicos por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB).

5.2.1 Análisis Morfo- Textural

El análisis morfológico se realizó por medio del programa de edición de imágenes *ImageJ*, el cual utilizó la tabla de esfericidad y redondez de Krumbein y Sloss (1954), como modelo para la cuantificación de los parámetros, esto arrojó valores que se llevaron a las tablas 4.11, 4.12 ,4.13 y 4.14 del capítulo anterior, y que representan el promedio de esfericidad y redondez de minerales por cada una de las cuenca.

Las tablas 4.11 y 4.13 del capítulo anterior, representan el promedio de esfericidad de los granos entre las cuencas y la roca in situ, permitiendo evidenciar que la mayoría de éstos se encuentran entre los rangos de esfericidad media a alta, siendo el menor valor 0,61 y 0,66 para la fracción magnética y no magnética respectivamente; esto quiere decir que los minerales presentes son casi equidimensionales, es decir poseen una morfología inicial de la roca fuente que les permite tener granos parcialmente esféricos (la esfericidad no está ligada al transporte sino a la forma del

mineral).

Las tablas 4.12 y 4.14 del capítulo IV permite comparar el promedio de redondez de las fracciones magnéticas y no magnéticas de los sedimentos con la roca in situ, en estas tablas se observan los valores promedios para los sedimentos se encuentran desde 0,48 y 0,54 hasta 0,95 y 0,79 respectivamente, en comparación a los valores promedio de la roca in situ que va desde 0,43 y 0,46 hasta 0,70 y 0,68, esto da indicios que los sedimentos no sufrieron mucho transporte desde la roca fuente, debido que los rangos de redondez son muy parecidos a los obtenidos por la roca in situ, además estos se clasificarían de subangulosos a subredondeados, lo cual indica además que la fuente para este sector proviene de los remanentes topográficos ubicados en la cuenca del río Aro.

El análisis textural se realizó por medio de la visualización de los granos a través de un microscopio petrográfico, en el cual se observó la presencia de abrasión en todos los granos, además de fracturas en muchos de éstos, este análisis fue reforzado con a través del análisis por Microscopía Electrónica de Barrido. La abrasión o desgaste externo de los granos se puede relacionar con la redondez, debido a que algunos circones dieron valores altos, a pesar de ser estos resistentes a la alteración mecánica.

5.2.2 Análisis Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

El Microscopio Electrónico de Barrido utiliza un detector que identifica los elementos en los minerales en base a dos características, una cualitativa llamada en este estudio % de peso y otra cuantitativa o % atómico, por ello se obtenían dos tablas en cada uno de los análisis. Los porcentajes se usaron como referencia, teniendo en cuenta el error o límite de detección a considerar por parte del fabricante del equipo de 0,25% y de las posibles contaminaciones al momento de la preparación de las muestras. Se nombraron las muestras en base a los grupos establecidos por la clasificación de propiedades a través de la observación.

Los diferentes resultados obtenidos por MEB permiten demostrar la dificultad de clasificar los minerales por la observación directa a través microscopio petrográfico,

esto se evidencia en las diferencias visuales que se tenían de diferentes minerales, como el circón, el cual presentaba ejemplares en su mayoría incoloros o de colores claros translucidos, pero debido a otros procesos como alteración por meteorización o daños por radiación alfa (Zhang et al., 2000; Nasdala et al., 2005), la cual es un oscurecimiento causada por los átomos radioactivos (^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th) dentro de esos minerales. Las figuras 5.1 a-c muestran la estructura cristalina y el aspecto de un circón dañado por radiación alfa.

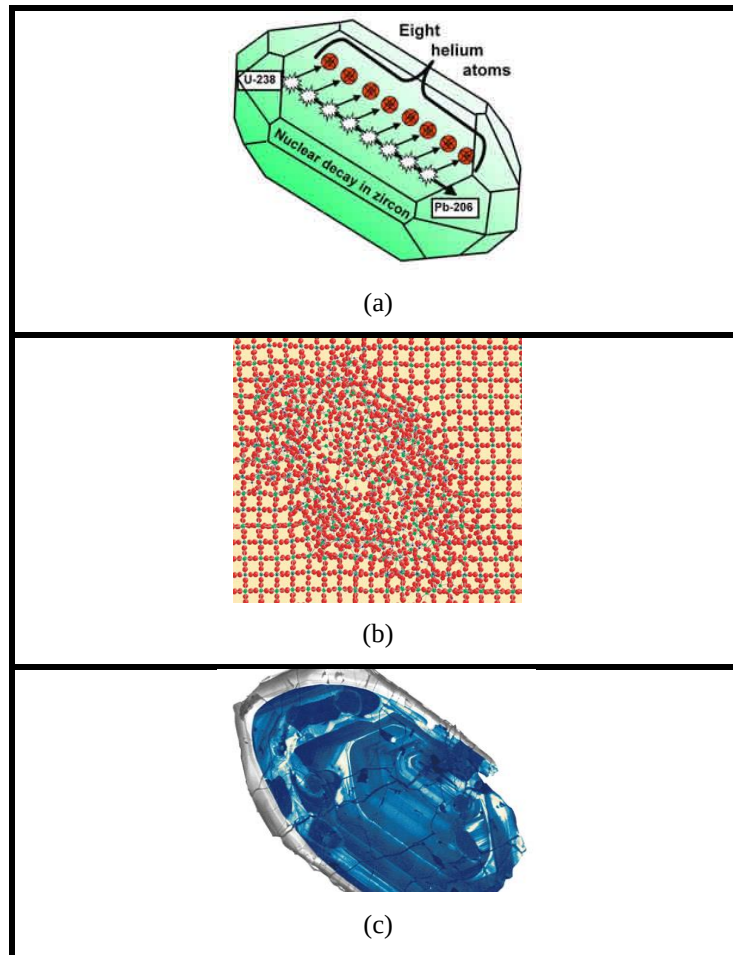


Figura 5.1. Daño causado en la estructura cristalina de un grano de circón por emisión de partículas alfa. (a) Contenido de átomos de ^{238}U en un grano, (b) distorsión sobre el enrejado cristalino causado por la emisión de las partículas alfa durante el decaimiento radioactivo del ^{238}U , y c) Imagen de una espectrometría de un grano de circón Proterozoico que muestra la forma como es dañado.

5.3 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

La tabla 4.56 resume los valores observados de los atributos primarios del

terreno, es decir área, perímetro, elevación y pendiente; por medio de éstos se puede ver que Peñón Aro es la de mayor área ($3630,57 \text{ km}^2$) en comparación con las otras cuencas, además posee los valores promedio de elevación y pendiente más altos, $174,25 \pm 66,05 \text{ m}$ y $6,86 \pm 7,49^\circ$ respectivamente, esto puede deberse a la ubicación de la misma, debido a que es la cuenca más alejada del río Orinoco, además se encuentra en los afloramientos de intrusiones del Complejo de Imataca, a diferencia de las otras que se encuentran en los piedemontes, esta cuenca refleja el paso del río Aro por el Escudo de Guayana. La cuenca de Moitaco presenta el menor tamaño, con un área de $81,03 \text{ km}^2$, adicionalmente, posee el promedio más bajo de elevación, pero no es la que menor valor tiene entre los promedio de pendiente, ya que en este caso es la cuenca del Fundo Mata Linda con $0,72 \pm 0,67^\circ$, esto se debe a la ubicación de las cuencas, donde Moitaco está al sur del Orinoco sobre el Escudo y Fundo Mata Linda en la región de los Llanos Orientales, por lo que la diferencia de altura es menor en esta última.

Los valores de relieve aparecen reflejados en la tabla 4.57, allí se encuentran calculados para diferentes radios, en todos éstos se observa que Peñón Aro posee los valores más altos en promedio, pero para el relieve de 7 km de radio la diferencia con Moitaco es muy poca, significando que a gran escala el volumen de material que falta para completar los valores máximos de elevación en ambas cuencas es la misma.

Las precipitaciones registradas por la misión de la Nasa TRMM, demuestran que los valores promedio son muy parecidos, los cuales van desde $916,19 \pm 138,71 \text{ mm/año}$ para Fundo Mata Linda hasta $1357,29 \pm 276,54 \text{ mm/año}$ para Peñón Aro, pero el máximo más alto esta en Peñón Aro con $2089,45 \text{ mm/año}$, esto es relevante debido a que la diferencia de tamaño entre las cuencas es muy grande, por lo que se refleja una intensa actividad climática puntual en algunas zonas dentro de la cuenca en comparación a las demás, coincidiendo con una posible barrera orográfica ocasionada por el Escudo de Guayana.

Los índices de erosión se ven reflejados en la tabla 4.60, permiten observar que Peñón Aro es la cuenca con mayores valores de los tres índices, Poder de Flujo Total (TSP), Poder de Flujo Unitario (USP) y Poder de Flujo de Cizalla (SSP), lo que indica

la presencia de una alta erosión en esa zona.

La cuenca que presenta los menores valores en casi todos los índices corresponde a la llamada Fundo Mata Linda, a excepción del TSP que es Moitaco, esto quiere decir que el poder del flujo del agua para la cuenca Fundo Mata Linda es mayor que la de Moitaco, pero la cantidad de agua y el ancho del canal no pareciera ser suficiente para generar la erosión. Sin embargo, muy a pesar de que la tasa de precipitación en esta área es muy pequeña, la zona podría estar siendo sometida a un levantamiento superficial, basado en los desniveles que existen entre el punto mínimo y máximo del río que pasa por esa zona.

El índice de erosión más variable en las cuencas de estudio es el SSP o el poder del flujo de cizalla, esto quiere decir que el corte o la incisión generada por la cantidad de agua o caudal es mayor en el nivel base de los drenajes, probablemente esto se deba a que las pendientes en todas las cuencas son de valores bajos y la cantidad de drenajes secundarios que desembocan en los principales de cada cuenca son pocos, razón por lo cual los pocos ríos existentes se ven obligados a cortar o incidir más hacia el fondo del surco. Peñón Aro al tener una extensión mucho mayor al resto tiene suficiente espacio para generar drenajes extensos y así poder acumular más sedimentos aguas abajo.

La tabla 4.59 indica el índice de humedad, el cual es un valor adimensional que señala la capacidad de acumulación de agua en el suelo, por ello es inverso a la pendiente debido a que entre mayor sea la pendiente menor será la capacidad del suelo de retener agua. La cuenca Fundo Mata Linda es la que presenta los valores promedio más altos de humedad, 16,22 con precipitación uniforme y 20,63 para los calculados con el TRMM, estos probablemente corresponda al bajo ángulo de la pendiente en comparación con las otras cuencas, lo que permitiría una mayor retención, en cambio, la cuenca Peñón Aro con la mayor pendiente presenta el índice de humedad más bajo. Las cuencas de baja pendiente ubicadas al norte y al sur del río Orinoco presentan valores muy parecidos con la precipitación variable principalmente porque los niveles de precipitación son bajos.

5.4 INTEGRACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con la finalidad de integrar los diferentes resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación se muestra en la Figura 5.2 un mapa de erosión TSP con precipitaciones y la distribución de minerales pesados, redondez y esfericidad para la fracción no magnética.

En esta figura se observa que la cuenca Peñón Aro está más afectada por la erosión que el resto de las cuencas. Visualmente pareciera en los diagramas de barras que las cuencas Borbón detrítico, Moitaco y Fundo Mata Linda ubicadas en las llanuras del río Orinoco, tuvieran los mismos valores de esfericidad y redondez, mientras que Peñón Aro y Borbón roca presentan los menores valores de estas variables.

Con la finalidad de relacionar si los atributos topográficos del terreno, y los valores de esfericidad y redondez están mostrando la influencia de los índices de erosión, se construye una matriz global de valores promedios mostrada en la tabla 5.1. De ésta, llama la atención que los valores de redondez son muy similares entre sí, pero existe una diferencia significativa entre los valores registrados en la cuenca Fundo Mata Linda y Borbón detrítico, que de acuerdo a su posición deberían ser representantes de la Formación Mesa. A partir de esta tabla se realiza un análisis de coeficientes de correlación tipo Pearson (Conover, 1980), mostrado en la tabla 5.2, así se obtiene las siguientes relaciones de dependencia: precipitación versus relieve calculado a diferentes radios (1, 3, 5 y 7 km), la correlación r varía entre 0,87 a 0,97, observándose que mientras mayor es el relieve los efectos de precipitación explicaría mejor su morfología. Se aprecia en esta tabla una correlación de 0,59 entre la redondez de los granos y el patrón de precipitaciones. La correlación entre los diferentes relieves e índices de erosión a pesar de que disminuyen cuando se incrementa el radio del relieve calculado, la variación es muy pequeña, va desde 0,79 a 1. Adicionalmente, el coeficiente de correlación entre el relieve y el índice de redondez de los granos clásticos mejora entre 0.28 a 0.51 a medida que el relieve se incrementa. En esta tabla los valores en cursiva representan correlación natural, es decir que se debe a la dependencia lineal entre los parámetros comparados.

La figura 5.3 muestra los diferentes valores de correlación existente entre tasa de precipitación promedio registrada en el período 1998-2009 y relieve calculado a diferentes radios. Nótese en esta tabla que la el coeficiente de correlación ($r = \sqrt{R^2}$) mejora a medida que se incrementa el radio.

La figura 5.4 ilustra la correlación existente entre los diferentes índices de erosión normalizados y el relieve calculado a 1 km de radio para cada una de las cuencas, nótese en esta figura que la mejor correlación se obtiene al tomar en cuenta la precipitación.

Por último, en la figura 5.5 se muestra la correlación existente entre la tasa de precipitaciones y la redondez promedio de los granos de circón para la fracción no magnética de cada una de las cuencas.

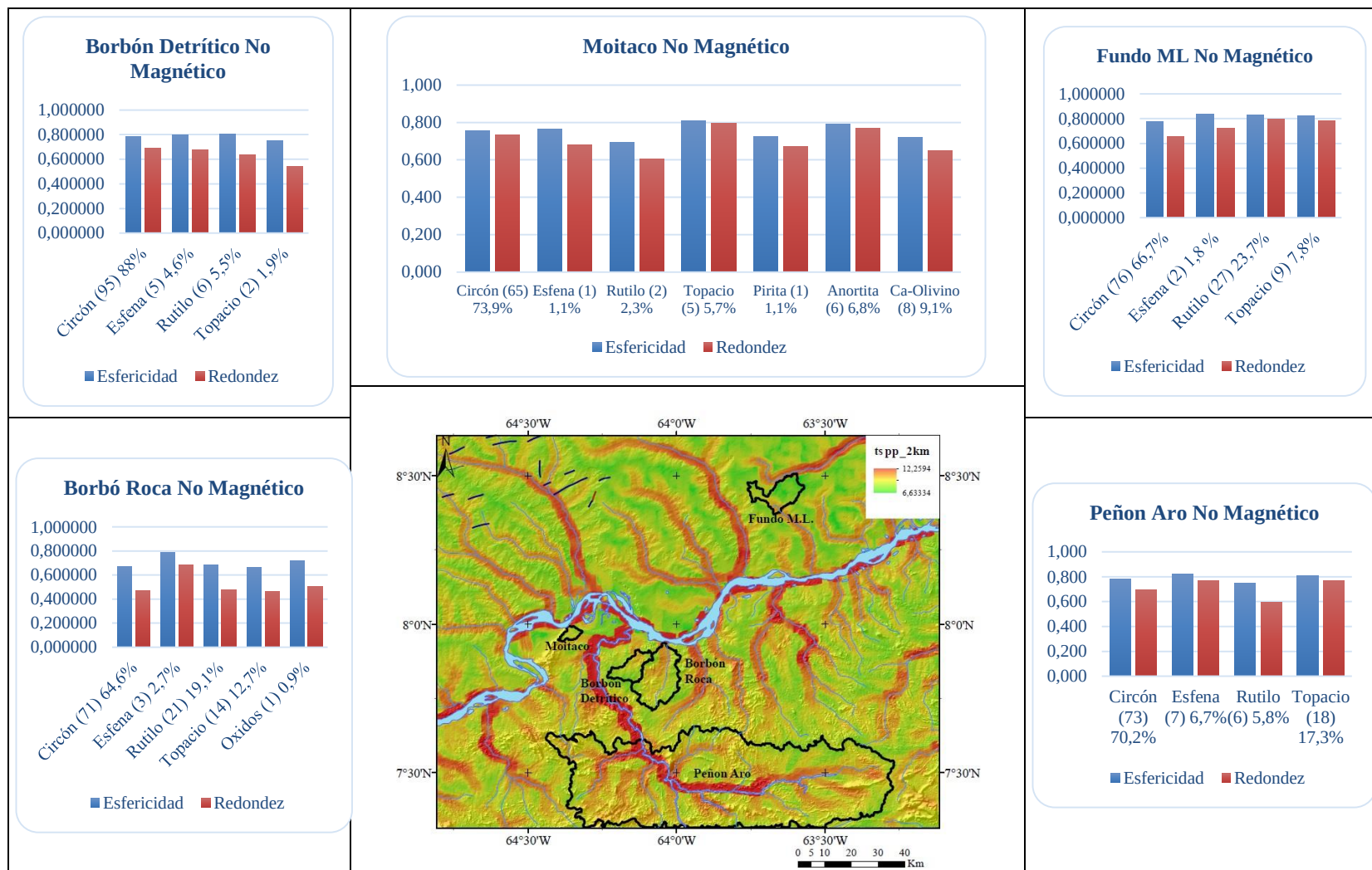


Figura 5.2. Comparación de valores de esfericidad y redondez para las cuencas estudiadas e índice de erosión TSP con precipitaciones.

Tabla 5.1. Compendio de parámetros obtenidos para cada una de las cuencas en estudio.

Cuenca	Prec.	Rel. 1	Rel. 3	Rel. 5	Rel. 7	TSP	USP	SSP	TSPprec	USPprec	SSPprec	Red*.	Esf*.
Peñón Aro	1357.29	58.07	140.12	197.99	243.68	48367.97	10.54	3.44	5648525.27	116.94	17.11	0.70	0.78
Moitaco	1172,16	22,87	68,39	109,84	150,38	3782,12	4,50	2,07	460026,23	67,23	10,41	0,74	0,76
Fundo Mata Linda	916.19	4.68	8.55	12.50	17.03	6178.55	1.76	0.88	547921.49	16.44	3.88	0.65	0.78
Borbón Detrítico	927.74	20.72	38.40	50.68	62.38	8614.16	4.76	2.14	732462.18	43.70	9.37	0.47	0.67
Borbón Roca	1035.10	30.97	73.22	103.84	123.99	14019.67	6.47	2.59	1355822.11	62.63	11.76	0.69	0.78

*Redondez y esfericidad promedio fue calculada para los circones existentes en la fracción no magnética.

Tabla 5.2. Valores de coeficientes de correlación Pearson para cada uno de los parámetros mostrados en la Tabla 5.1

	Precip.	Rel. 1	Rel. 3	Rel. 5	Rel. 7	TSP	USP	SSP	TSPprec	USPprec	SSPprec	Red.	Esf.
Precipitaciones	1												
Rel. 1	0,87	1											
Rel. 3	0,94	0,98	1										
Rel. 5	0,96	0,96	1,00	1									
Rel. 7	0,97	0,94	0,99	1,00	1								
TSP	0,78	0,91	0,87	0,83	0,79	1							
USP	0,83	1,00	0,97	0,94	0,91	0,91	1						
SSP	0,78	0,97	0,94	0,92	0,90	0,80	0,98	1					
TSPprec	0,81	0,91	0,88	0,84	0,81	1,00	0,90	0,79	1				
USPprec	0,95	0,98	1,00	1,00	0,99	0,85	0,96	0,94	0,86	1			
SSPprec	0,86	0,98	0,98	0,96	0,95	0,82	0,98	0,99	0,82	0,98	1		
Red.	0,59	0,28	0,42	0,48	0,51	0,22	0,23	0,17	0,25	0,40	0,26	1	
Esf.	0,44	0,27	0,35	0,37	0,36	0,35	0,24	0,12	0,37	0,29	0,18	0,89	1

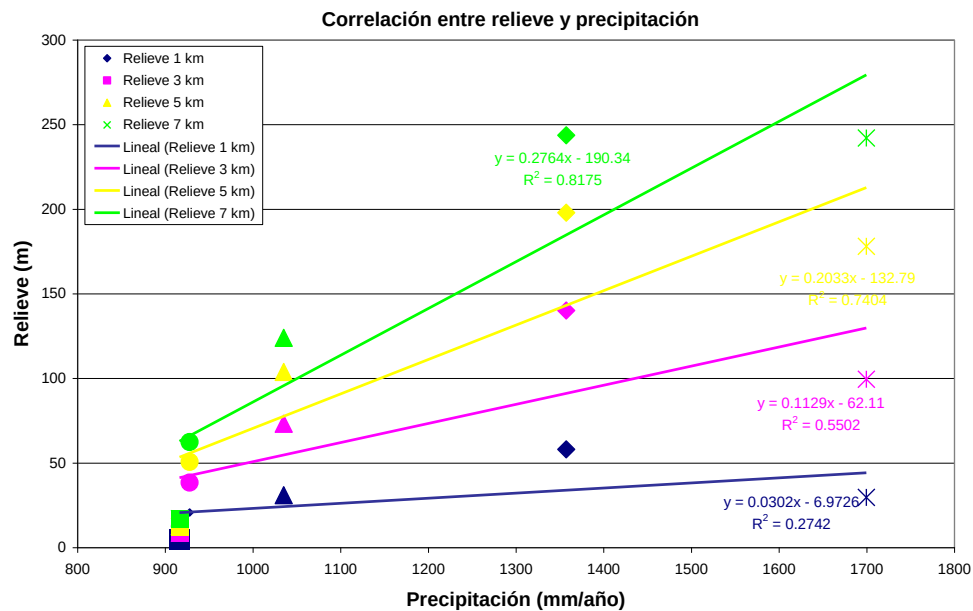


Figura 5.3. Comparación entre precipitación y relieve para los diferentes radios. En esta figura los cuadrados se refieren a la cuenca del Fundo Mata Linda, los círculos a la cuenca de Borbón detrítico, los triángulos a Borbón roca, los rombos a Peñón Aro y los asteriscos a Moitaco.

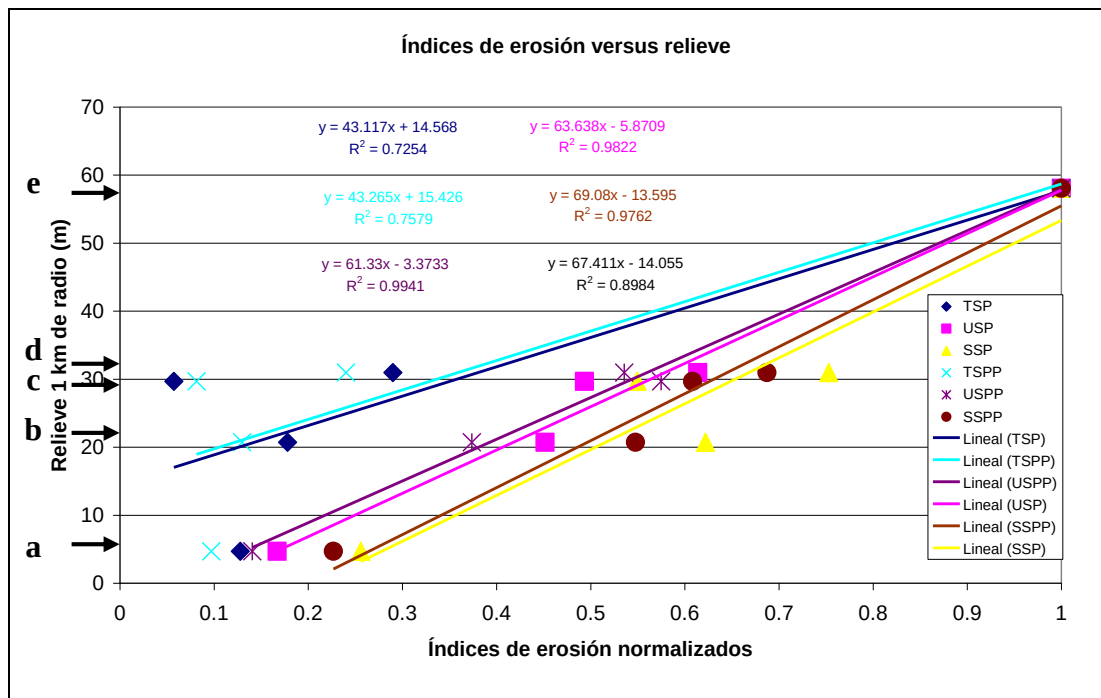


Figura 5.4. Correlación existente entre los diferentes índices de erosión normalizados y el relieve calculado a 1 km de radio; **a)** Fundo Mata Linda; **b)** Borbón Detrítico; **c)** Moitaco; **d)** Borbón Roca; **e)** Peñón Aro.

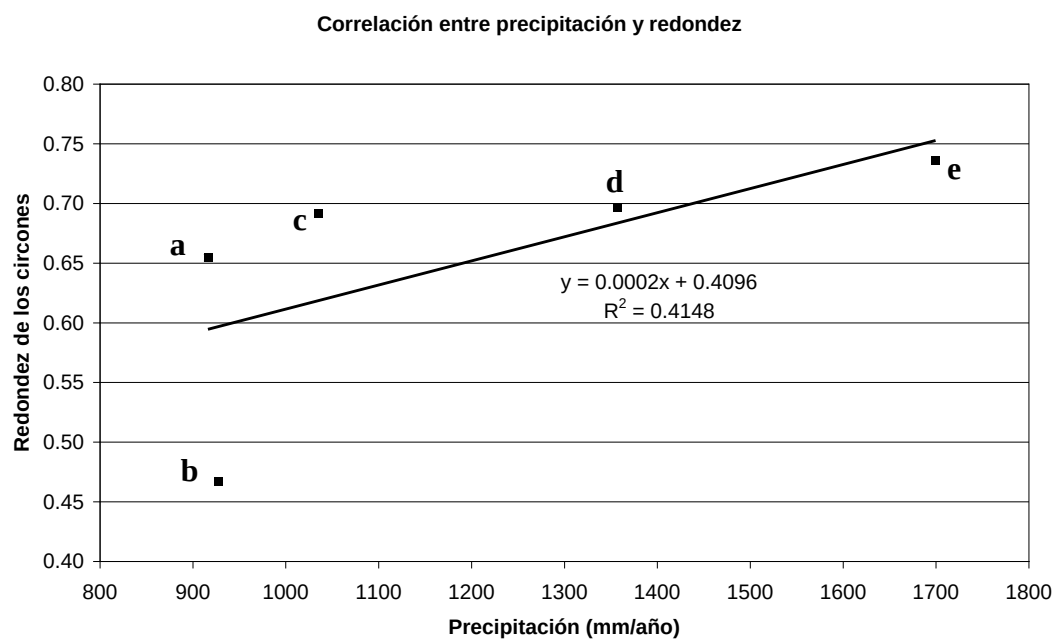


Figura 5.5. Correlación existente entre tasa de precipitación e índice de redondez de los circones;
a) Fundo Mata Linda; b) Borbón Detrítico; c) Borbón Roca; d) Peñón Aro; e) Moitaco.

6. SUMARIO Y RECOMENDACIONES

Este trabajo permitió analizar las relaciones entre topografía y clima como agentes controladores del relieve actual de la parte central de la cuenca del río Orinoco donde yace la Formación Mesa, también permite aportar conclusiones en cuanto al contenido de minerales pesados magnéticos y no magnéticos presentes en las sub-cuencas que conforman la región, y el estudio de la relación existente entre la esfericidad y redondez con los mecanismos de transporte y la litología presente, además de la cuantificación de la erosión en cada una de ellas.

En el estudio comparativo con el software ImageJ y el modelo de Krumbein realizado a la fracción de minerales pesados no magnéticos, se pudo constatar la fidelidad de los resultados en la esfericidad. Los resultados muestran las mayores diferencias entre las cuencas Borbón detrítico y Fundo Mata Linda, las cuales se encuentran situadas sobre la Formación Mesa, en el cual el contenido mineralógico y los valores de redondez y esfericidad indican grandes diferencias, lo que pareciera indicar que se trata de fuentes diferentes, debido a que según la tabla 3.1 de procedencia de minerales pesados, se puede observar que la mayoría de las cuencas coinciden con un origen de rocas ígneas félsicas, pero los altos valores de redondez en los circones y los minerales encontrados en Fundo Mata Linda indican una fuente sedimentaria, por lo que originalmente se está describiendo como Mesa, no es lo mismo debido a que la fuente de la parte norte podría ubicarse en la Serranía del interior, mientras que la de Borbón debería ser los remanentes del Cratón de Guayana que se encuentran en el flanco sur, por ello es necesario para futuras investigaciones reexaminar esas diferencias en términos de edades de depositación. Al parecer lo que se llama Formación Mesa al sur del río Orinoco es muy diferente a lo encontrado al norte del mismo río.

El análisis visual para reconocer minerales pesados en las fracciones magnéticas y no magnéticas de minerales pesados para cada muestra, fue validado a través de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), encontrándose en la cuenca

Fundo Mata Linda: circón, topacio, rutilo, esfena. En la cuenca de Borbón detrítico: rutilo, circón, topacio, esfena. En la cuenca del río Moitaco: rutilo, esfena, topacio, circón, pirita, calcio-olivino. En la cuenca Peñón de Aro: circón, topacio, esfena, rutilo. En la roca in situ de Borbón Roca: circón, topacio, esfena, rutilo.

El contenido de minerales pesados es mayor en la cuenca de Moitaco, que en las cuencas de los ríos Fundo Mata Linda, Peñón Aro, Borbón Detrítico y la roca in situ de Borbón Roca, esto se debe a que la cuenca se encuentra sobre los cinturones verdes.

Después de realizar el Modelo de Elevación Digital (DEM), se obtuvo que los atributos de primer orden de las cuencas de estudio son:

Cuencas	Área (km²)	Perímetro (km)	Pendiente (°)	Elevación (m)
Peñón Aro	3630,57	562	6,86±7,49	174,25±66,05
Moitaco	81,034376	52,784457	2,6±2,58	64,54±26,07
Fundo Mata Linda	141,28	101,82	0,72±0,67	136,61±7,43
Borbón detrítico	97,44	70,21	2,74±2,34	115,63±18,22
Borbón roca	268,25	109,78	3,82±3,34	92,25±33,49

La tasa de erosión para cada cuenca es:

Cuencas	TSP	USP	SSP
Peñón Aro	4,84E+04±1,18E+06	10,54±33,28	3,44±5,25
Moitaco	3,78E+03±2,05E+04	4,50±7,70	2,07±2,54
Fundo Mata Linda	6,18E+03±7,28E+04	1,76±8,23	0,88±2
Borbón detrítico	8,61E+03±7,51E+04	4,76±10,63	2,14±2,78
Borbón roca	1,40E+04±1,35E+05	6,47±14,35	2,59±3,46

Los análisis de correlación sólo para las cinco subcuencas indican que el clima es un factor importante sobre la evolución del relieve, la alta correlación entre los índices de erosión con la redondez de los granos demuestra que a pesar de que el transporte en las cuencas no es tan grande, es suficientemente importante para moldear los granos de circones, sobretodo en la cuenca del Aro.

La geomorfología cuantitativa puede volverse una herramienta más efectiva si a la misma se le logra establecer una relación con la geomorfología tradicional, para que al momento de trabajar con los diferentes valores, estos puedan ser traducidos a un lenguaje que el investigador común maneja; para ello es necesario recopilar los datos de todo el proyecto y así poder realizar la respectiva comparación.

Resulta realmente importante complementar estos análisis con la datación de los minerales pesados de las muestras de sedimentos modernos recolectados en las cuencas estudiadas. Este trabajo ya se encuentra bastante adelantado y constituyó un aporte del presente Trabajo Especial de Grado.

BIBLIOGRAFÍA

Arcia, S. y Viana, C. (2014). Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.

Ascanio, G. (1975). El Complejo de Imataca en los alrededores de Cerro Bolívar, Estado Bolívar, Venezuela. Conf. Geol. Inter-Guayanas X, Belem – Pará, Brasil, 179-181 p.

Bastidas B., E. y Méndez T., Yumaire (2007). “Estudios de porosidad de núcleos usando análisis de imágenes visuales en la Formación Misoa en los Campos: Ceuta, Barúa y Motatán del Lago de Maracaibo”. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.

Benedetto, J. (1982). Las unidades tectono-estratigráficas Paleozoicas del Norte de Suramérica, Apalaches del Sur y Noroeste de África; Comparación y Discusión. V Congreso Latinoamericano de Geología, Buenos Aires, Argentina.

Benedetto, J. y Ramírez, E. (1985). La Secuencia Sedimentaria Precámbrico-Paleozoico Inferior Pericratónica del Extremo Norte de Suramérica y sus Relaciones con las Cuencas del Norte de África. VI Congreso Geológico Venezolano. Vol. I, 140-155 p.

Bermúdez, M. (2006). Procedimientos del Laboratorio de Termocronología de la UCV para la datación de eventos tectotérmicos recientes mediante el método de huellas de fisión en apatitos detríticos. Trabajo de Ascenso a Profesor Agregado, EGMG-UCV, 156 p.

Bermúdez, M. (2009). Cenozoic Exhumation Patterns across the Venezuelan Andes:

- Insights from Fission-track Thermochronology. Ph.D. thesis. Joseph Fourier University, France, 305 p.
- Bermúdez, M., van der Beek, P., Bernet, M., (2011). Asynchronous Miocene-Pliocene exhumation of the central Venezuelan Andes. *Geology* 39 (2), 139-142 p.
- Bermúdez, M., van der Beek, P., Bernet, M. (2012). Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes, doi:10.1130/L212.1.
- Bezada, M. y C. Schubert, (1987). Cronología cuaternaria en Venezuela: algunos problemas metodológicos y pedológicos. *Acta Cient. Venez.*, 38: 1-12 p.
- Boggs, Sam (2009). *Petrology of sedimentary rocks*. 2da Edición, Cambridge University Press, Cambridge, England. Hardback, 600 p.
- Carbón, J.; Schubert, C. y Vaz, J. E. (1992). Caracterización y edades termoluminiscentes de los sedimentos de la Formación Mesa, en dos localidades del sur de Anzoátegui (Venezuela). *Acta Científica Venezolana* 43, 387-391 p.
- Carbón, J. y Schubert, C. (1994). Late Cenozoic history of the eastern Llanos of Venezuela: Geomorphology and Stratigraphy of the Mesa formation. *Quaternary International*, 21, 91-100 p.
- Carver, E. (1971). *Procedures in sedimentary petrology* Wiley-Interscience. Nueva York, 653 p.
- Coello V., (2012). “Significado tectónico y procedencia de la formación Guárico a través de análisis petrográfico y minerales pesados, Venezuela norcentral” Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.
- Comerma, J. y Chirinos, A. (1976). Características de algunos suelos con y sin horizonte argílico en las mesas orientales de Venezuela. Trabajo presentado en el IV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Maturín, Venezuela, 181-206 p.
- Conover, W.J. (1980). *Practical Nonparametric Statistics*. 2º edición. Wiley, Nueva York, 493 p.

Coplanarh, (1974). Estudio geomorfológico de los Llanos occidentales. Ministerio, de Agricultura y Cría, Caracas, N° 41.

Cruz, C. (2001). Informe geológico. Hoja de Borbón 7339. Escala 1: 100.000. INGEOMIN.

Díaz de Gamero, M.L. (1996). The changing course of the Orinoco River during the Neogene: A review: Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, v. 123, 385–402 p.

Duque, Gonzalo (2013). Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 458 p.

Feo-Codecido, Gustavo (1956). Geología; técnica para el estudio de los minerales pesados y su aplicación en la estratigrafía de Venezuela. Boletín de la Asociación Americana de Geología Petrolera. Vol. 40, N° 5, 24 p.

Ferreira, T. y Rasband, W. (2012). ImageJ User Guide: IJ, 1-46 p.

Flores J. y Méndez A., (2005). “Correlación estratigráfica y geocronológica de las quebradas Hoyos y Vichú por el método de huellas de fisión, formaciones Isnotú y Betijoque, estado Trujillo” Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.

Flores, M. (2013). Estudio de la relación entre clima, erosión y tectónica a lo largo del Río Guárico. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.

Fuentes, E. (2006). Procesos de erosión severa de la formación Mesa y su incidencia en obras civiles. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.

Gamero, A. y Reveti, M. (2011). Estudio geoquímico y mineralógico de minerales

pesados en la zona Nor-Occidental del estado Bolívar. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.

Gardiner, V. (1981). Drainage basin morphometry. En: A. Goudie (ed.), *Geomorphological Techniques*. George Allen & Unwin, Londres, Inglaterra, 47-55 p.

González de Juana, Clemente et al. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Tomo II. FONINVES, Venezuela.

González de Juana, C. (1946). Estudios sobre aguas subterráneas en los Llanos de Venezuela. *Revista de Fomento*, Caracas, 8 (64), 9-59 p.

Granadino, M. (2012). Evaluación hidrogeológica-Geofísica de las Formaciones Mesa y Las Piedras aflorantes en Santa Clara, estado Anzoátegui. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geofísico, inédito.

Gregory, K. y Walling, D. (1973). *Drainage basin form and process: A geomorphological approach*. Edward Arnold, Londres, Inglaterra, 456 p.

Guevara, E. y Cartaya, H. (1991). *Hidrología: una introducción a la ciencia hidrológica aplicada*. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela, 358 p.

Hackley, P.C., Urbani, F., Karlsen, A. y Garrity, C. (2005). Mapa Geológico de Venezuela. Open file 2005-1038. USGS, 2 p.

Hedberg, H. D. y Pyre, A. (1944). Stratigraphy of northeastern Anzoátegui, Venezuela, *Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull.*, 28(1), 1-28 p.

Hedberg, H. D. (1950). Geology of the eastern Venezuela basin (Anzoátegui-Monagas-Sucre-eastern Guárico portion), *Geol. Soc. Am. Bull.*, 61(11), 1173-1216 p.

Henao, J. (1998). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad Santo Tomás, Santafé de Bogotá, Colombia, 396 p.

Herrera, R. y Chacón, N. (2013). Large-scale spheroidal redoximorphic features around plinthite nuclei in Orinoco River sediments reflect mean seasonal fluctuation in river

- stage and ENSO-related anomalies. Springer, Biogeochemistry, 112, 197–208 p.
- Hoorn, C., Guerrero, J., Sarmiento, G.A., y Lorente, M.A., (1995). Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology*, v. 23, 237–240 p.
- Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin* v. 56, 275-370 p.
- Kalliokoski, J. (1965). Geología de la parte norte-central del Escudo de Guayana, Venezuela. *Bol. Geol., Caracas*, 29-104 p.
- Klein, K. y Hurlbut, C. (1997). *Manual de Mineralogía*. 4° Edición. Barcelona, Editorial Reverté, S.A.
- Krumbein, W. y Pettijohn, F. (1938). *Manual of sedimentary petrography*. Appleton-Century, Nueva York, 120 p.
- Krumbein, W. y Sloss, L. (1955). *Stratigraphy and Sedimentation*. 2° edición, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., y Miller, J. B. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W. H. Freeman, San Francisco, 872 p.
- Mange, M. y Maurer H. (1992). *Heavy minerals in clours*. Chapman and Halla, Nueva York, 128 p.
- Mayer, L. (1990) *Introduction to Quantitative Geomorphology: an exercise manual*. Englewood Cliffs NJ, Prentice Hall, 380 p.
- Mc Candless, G (1965). Reconocimiento geológico de la región noroccidental del Estado Bolívar. *MMH.vol II* 13, 25 p.
- Méndez, W., y Cartaya, S., (1998). Estudio de las características pedo-geomorfológicas de una secuencia de suelos a lo largo de un transepto topográfico, en el área de La Mesa La Tentación, estado Anzoátegui, Llanos Orientales de Venezuela. *ESPACIO Y DESARROLLO*, No 10, pág. 8-26.

Méndez, W., Córdova, J., Cartaya, S., y Pacheco, H., (2007). Geomorfología y respuesta hidrológica de la microcuenca de drenaje de la quebrada Curucutí, Estado Vargas, Venezuela. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., Vol. 22, N° 1, 5–20 p.

Mendoza, V. (2005). Geología de Venezuela, Tomo II. Guayana, Los Andes y Sistema Montañoso del Caribe. UDO. Escuela de Ciencias de la Tierra. Ciudad Bolívar.

Menéndez, A. (1968). Revisión de la estratigrafía de la Provincia de Pastora según el estudio de la región de Guasipati, Guayana venezolana. Bol. Geol., Caracas, Venezuela, 309-338 p.

Monsalve, G. (2000). Hidrología en la Ingeniería. Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, Colombia, 382 p.

Moore, I., Grayson, R. y Ladson (1991). Modelado de terreno digital, una revisión de las aplicaciones hidrológicas, geomorfológicas y ecológicas. Procesos hidrológicos. John Wiley and Sons Ltd, 3-30 p.

Morton, A. (1984). Stability of Detrital Heavy Minerals in Tertiary Sandstone from the North of Sea Basin. The Mineralogical Society, 286-308 p.

Morton, A. y Hallsworth, C. (1984). Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, Vol. 90, 241-256 p.

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

Morton A. y Hallsworth, C. (2007). Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. Developments in Sedimentary, Vol. 58, 215-245 p.

Ortegano, O. (2012). Geología de la Formación Mesa, en la zona de Borbón, al suroeste de Ciudad Bolívar, margen derecho del río Orinoco, Edo. Bolívar. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Magister Scientiarum en Ciencias Geológicas, inédito.

Palacios M., Y. (2013). Caracterización del sistema poroso en rocas carbonáticas

mediante el análisis digital de imágenes de secciones delgadas en el Golfo de Venezuela. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, inédito.

Parnaud, F.; Gou, Y.; Pascual, J-C.; Truskowski, Gallango, O.; Passalacqua, H.; y Roure, F. (1995) Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuelan Basin, in Petroleum Basins of South America, Editors, A.J.Tankard. R.Suarez, and H.J.Welsink, AAPG Memoir 62, 741-756 p.

Pastrana, S. (2003). Análisis topológico de cuencas. <http://club.telepolis.com/geografo/geomorfologia/analcuen.htm>.

PDVSA-LÉXICO ESTRATIGRÁFICO (2010). Formación Mesa. <http://www.pdv.com/lexico/m40w.htm>. Consulta 5 de noviembre de 2013.

Pérez, D. (1977). Fundamentos de geomorfología dinámica con énfasis en los procesos fluviales. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Dirección General de Información e Investigación del Ambiente, Dirección de Hidrología, Caracas, Venezuela, 70 p.

Pettijhon, F. J. (1941). Persistent of heavy minerals and geology age. J. Geol. 49, 610-625 p.

Pettijhon, F. J. (1975). Sedimentary rocks. New York. Harper and Brothers, 628 p.

Pratsch, J. (1994). The location of major oil- and gasfields: Examples from the Andean foreland. Journal of Petroleum Geology, vol. 17(3), 327-338 p.

Ramírez, E. (1982). Estructuras Sedimentarias en el Paleozoico Inferior de la Cuenca Oriental de Venezuela, Interpretación Ambiental. Trabajo Especial de Reválida, Universidad Central de Venezuela, 85 p.

Ratmiroff, G. (1965). Origen y metamorfismo del paragneis principal del Complejo precámbrico de Imataca: Cuadrilátero de Upata, Estado Bolívar, Venezuela. Bol. Geol. y Min., Caracas, 217-329 p.

Salvador, A., (1961). Nomenclature of the Las Piedras and related formations in eastern Venezuela: Bol. Inf. Asoc. Ven. Geolo. Min. y Petról, 4, 297-327 p.

Santiago, J. (2003). Aspectos Geomorfológicos entre ciudad Bolívar y El Río Aro (Venezuela). Universidad de Oriente, Bolívar, Venezuela.

Santos, A. (1974). Estudio del medio poroso de las formaciones Mesa y las Piedras para el desarrollo de aguas subterráneas en el área mayor de oficina cuadrángulo de oficina Estado Anzoátegui /; Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geofísico, inédito.

Schlumberger (1997). Wec 1997 evaluación de pozos. Caracas Schlumberger, Venezuela, 4-6 p.

Senciales, J. (1998). El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico. Norba, X; 155-183 p.

Skoog, D., Holler, F. y Nieman, T. (2001). Principios de análisis instrumental. McGraw-Hill.

Smith, D. y Stopp, P. (1978). The river basin: An introduction to the study of hydrology. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, 273 p.

Stanley, S. (1999). Earth System History. Nueva York: W. H. Freeman and Company, San Francisco, 615 p.

Strahler, A. (1968). Quantitative Geomorphology. En: R. Fairbridge (ed.), The Encyclopedia of Geomorphology (Encyclopedia of Earth Sciences Series, T. 3) Dowden, Hutchinson & Ross, Pennsylvania, 898-912 p.

Strahler, A. (1984). Geografía Física (7a. ed.). Editorial Omega, S. A., Barcelona, España, 550 p.

Summa, L., Goodman, E., Richardson, M., Norton, I. y Green, A. (2003) Hydrocarbon systems of Northeastern Venezuela: plate through molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela Basin. Marine and Petroleum Geology

20, 323–349 p.

Thornthwaite, C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1, 55-94 p.

Torres, J. (1984). Análisis geoquímico de los resistatos pesados de la olla hidrográfica del río Paragua, Estado Bolívar, Venezuela. Tesis de Maestría, UCV, Facultad de Ciencias, I.C.T.

Torres, J. (1989). Exploración geoquímica regional de la Guayana Oriental, Estado Bolívar, Venezuela. Tesis Doctoral, UCV, Facultad de Ciencias, I.C.T.

Vila, M. (1950). Las regiones naturales de Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Filosofía y Letras. Caracas, Venezuela, 145-148 p.

Weeks, L. (1946). Paleogeographies of South America. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 31(7), 1194-1241 p.

Wilson, J. y Gallant, J. (2000). *Digital Terrain Analysis*. (eds), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley and Sons, Nueva York, 1–26 p.

Yoris, F.G., Ostos, M.; Boujana, M.; Pérez, J.; Booth, G.; Packer, S.; Galea, F. y Lander, R. (1997). Detailed Lithostratigraphy and Age Determinations of La Luna Formation in two sections of S.W. Táchira State (Venezuela). *AAPG Bull.*, 80 (8), 1346 p.

Zinck, A. y Urriola, P. L. (1970). Origen y evolución de la Formación Mesa: un enfoque edafológico. Informe inédito, Ministerio de Obras Públicas, División de Edafología, Barcelona, 70 p.

Referencias Electrónica

<http://www.geo.uu.nl/~forth/people/Guillaume/guillaume.htm>

<http://www.venemia.com/>

<http://www.museopaleontologico.org/>