

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPARACIÓN DE LA RELACIÓN TOPOFORMA-CLIMA-TECTÓNICA EN EL SECTOR SUROESTE DE LA CUENCA DEL RÍO ORINOCO MEDIANTE ANÁLISIS DE ÍNDICES DE EROSIÓN Y MINERALES PESADOS

Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de
Venezuela para optar al título de
Ingeniero Geólogo por los Bachilleres:
Albornoz N. Miguel A.
Lezama C. Arnaldo J.

Caracas, Mayo de 2014

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE GEOLOGÍA, MINAS Y GEOFÍSICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

PROYECTO DEL TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**COMPARACIÓN DE LA RELACIÓN TOPOFORMA-CLIMA-TECTÓNICA
EN EL SECTOR SUROESTE DE LA CUENCA DEL RÍO ORINOCO
MEDIANTE ANÁLISIS DE ÍNDICES DE EROSIÓN Y MINERALES
PESADOS**

Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de
Venezuela para optar al título de
Ingeniero Geólogo por los Bachilleres:
Albornoz N. Miguel A.
Lezama C. Arnaldo J.

Tutor académico: Prof. Mauricio Bermúdez

Caracas, Mayo de 2014

ACTA

Los abajo firmantes, designados por el Concejo de la Escuela de Ingeniería Geológica de la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del Jurado examinador del trabajo Especial de Grado titulado: **“Comparación de la relación topoforma-clima-tectónica en el sector suroeste de la cuenca del Río Orinoco mediante análisis de índices de erosión y minerales pesados”**, presentado por los Brs. Arnaldo Jahir Lezama Cedeño y Miguel Arturo Albornoz Nuñez como requisitos exigidos por el plan de estudio, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudio para optar al Título de Ingeniero Geólogo.

Prof. Mauricio Bermúdez
(Tutor)

Prof. Lenin González

Prof. William Meléndez

A mi madre María Victoria y a mi familia, en especial a **Franco Schiavo** quien seguro se sentiría orgulloso de este trabajo.....

Miguel Arturo Albornoz Núñez

A mi madre y mi padre, dedico este Trabajo Especial de Grado por ser mis guías, ejemplo de constancia y dedicación.

Arnaldo Jahir Lezama Cedeño

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, a quien dedico este trabajo por enseñarme a luchar para poder alcanzar mis metas y ejemplo de éxitos y triunfos logrados.

A mis tíos Julio, Marta, Loli y mi abuela María por todo su apoyo prestado durante todo el transcurso de mi carrera.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela donde tuve la oportunidad y la dicha de estudiar, compartir y vivir estos años en los que he adquirido no solo conocimientos científicos sino también conocimientos morales y éticos.

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 la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, especialmente a la escuela de Geología, por darme la virtud de formarme en sus aulas.

Al profesor y tutor Mauricio Bermúdez, por su gran apoyo y permanente preocupación y colaboración día a día para la resolución de los problemas surgidos en la ejecución del proyecto.

Al profesor Ricardo Alezones, por su accesoria y ayuda en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros de tesis Zulyn, Estefanny, Miguel, Nerelys, Luis Carlos, Marcos, Arnaldo con los cuales compartí gran parte del tiempo mientras realizaba este proyecto.

Finalmente pido disculpas a quienes olvide mencionar y que de alguna otra manera me ayudaron alcanzar tan apreciada meta.

Miguel Arturo Albornoz Nuñez

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen, por guiarme y protegerme cada instante de mi vida.

Al Doctor José Gregorio Hernández Cisneros, por ayudarme en los momentos difíciles de mi vida.

Al Doctor Evelio Rojas, por prestar su mejor apoyo y dedicación.

A mis padres, Iris Cedeño de Lezama y Arnaldo Lezama Alejandro a quien dedico este trabajo por enseñarme a luchar para poder alcanzar mis metas.

A mí novia Laura Porras, por apoyarme cada día incondicionalmente a lograr mis metas.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela donde tuve la oportunidad y la dicha de estudiar, compartir y vivir estos años en los que he adquirido no solo conocimientos científicos sino también conocimientos morales y éticos.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, especialmente a la escuela de Geología, por darme la virtud de formarme en sus aulas.

A mis compañeros de tesis Zulyn, Estefanny, Miguel, Nerelys, Luis Carlos, Marcos, Arnaldo con los cuales compartí gran parte del tiempo mientras realizaba este proyecto.

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.

Al profesor y tutor Mauricio Bermúdez, por su gran apoyo y permanente preocupación y colaboración día a día para la resolución de los problemas surgidos en la ejecución del proyecto.

Al profesor Ricardo Alezones, por ayudar en parte de mi formación académica, accesoria y en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente pido disculpas a quienes olvide mencionar y que de alguna otra manera me ayudaron alcanzar tan apreciada meta.

Arnaldo Jahir Lezama Cedeño

**COMPARACION DE LA RELACION TOPOFORMA-CLIMA-TECTONICA
EN EL SECTOR SUROESTE DE LA CUENCA DEL RIO ORINOCO
MEDIANTE ANALISIS DE INDICE DE EROSION Y MINERALES
PESADOS.**

Tutor Académico: Prof. Mauricio Bermúdez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2014, 204 páginas.

Palabras claves: Minerales Pesados, Geomorfología Cuantitativa, Morfología de Granos, Erosión, Río Orinoco.

RESUMEN

El presente Trabajo Especial de Grado, estudia la relación topoforma- clima- tectónica de una zona ubicada al Suroeste del estado Bolívar comprendida por los ríos Parguaza, Meta, Cataniapo, un segmento del Orinoco y la duna de Santos Luzardo. Para esta investigación se recolectaron cinco (5) muestras de sedimentos recientes no consolidados que llevaban consigo un número considerable de minerales pesados procedentes de diversas fuentes, se utilizó un microscopio de luz polarizada para la descripción morfo- textural y un microscopio electrónico de barrido para el análisis de composición química de minerales pesados, estos análisis fueron combinados con técnicas de Geomorfología cuantitativa, a través de un análisis digital del terreno, el cual permite caracterizar cada una de las cuencas en estudio, y calcular los índices de erosión, así es posible relacionar este fenómeno con las características morfo- texturales de los minerales pesados, de esta manera es posible generar mapas con los principales atributos para cada cuenca en estudio.

Tras un análisis de correlación para las cuencas estudiadas, los resultados indican que el clima es un factor importante sobre la evolución del relieve, la alta correlación entre los índices de erosión con el relieve ($r=0.99$), y entre relieve calculado a diferentes radios y precipitación ($r=0.99$) indican que el relieve está

siendo controlado por el clima. La fuerte anti-correlación ($r=-0.99$) entre la redondez de los granos y el patrón de precipitaciones demuestra que esos minerales son erosionados en sitios muy lejanos con otras condiciones climáticas y tectónicas muy diferentes a donde están siendo depositados hoy en día. La baja redondez de los circones registradas en las cuencas de los ríos Cataniapo y Parguaza soportan el hecho de que los terrenos fuentes para esos minerales están muy cerca, así se tiene dos poblaciones o tendencias, aquellos que vienen de muy lejos en donde las condiciones de clima y tectónica son diferentes, cómo por ejemplo, la Cordillera Oriental de Colombia, y el flanco surandino; y la segunda población con una fuente muy cercana, en este caso el macizo guayanés.

Este trabajo demuestra que las 3 cuencas están drenando áreas completamente diferentes en términos de edades, lo que se traduce en múltiples fuentes. En río Cataniapo se obtienen dos poblaciones: $59,9 \pm 8$ Ma (Paleoceno-Eoceno) y 854.6 ± 100 Ma (Precámbrico), que indica como terreno fuente alguna influencia de Los Andes y la mayoría del cratón de Guayana. La muestra del río Meta drena áreas mucho más jóvenes cuyas edades coinciden con las edades reportadas dentro de Los Andes de Venezuela por Kohn et al., (1984) y en la Cordillera Oriental de Colombia, para esta muestra pudo discriminarse tres poblaciones de edades: $87,8 \pm 10$ Ma (Cretácico tardío), $191,5 \pm 60$ Ma (Mesozoico) y $383,3 \pm 45$ Ma (Paleozoico). Por último, en la muestra del río Parguaza se encuentran dos poblaciones de edades: $466,7 \pm 170$ Ma (Paleozoico), y $903,5 \pm 208$ Ma (Precámbrico).

INDICE

CONTENIDO	PAG.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA.....	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 ALCANCE	6
1.5 ANTECEDENTES	7
1.5.1 Antecedentes Geológicos	7
1.5.2 Antecedentes Metodológicos	9
1.6 UBICACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO	11
2. MARCO GEOLÓGICO	12
2.1 INTRODUCCIÓN	12
2.2 GEOLOGÍA REGIONAL	12
2.2.3 Evolución tectono - estratigráfica del Escudo de Guayana	13
2.2.4 Descripción detallada de cada provincia	20
2.2.4.1 Provincia de Imataca	21
2.2.4.2 Provincia de Pastora	24
2.2.4.3 Provincia de Roraima	28
2.2.4.4 Provincia de Cuchivero	32
2.3 GEOLOGÍA LOCAL	36
2.3.1 Aspectos Fisiográficos del área de estudio	43
2.3.1.1 Cuenca del río Apure	43
2.3.1.2 Cuenca del río Amazonas	46
3. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA	48
3.1 INTRODUCCIÓN	48
3.2 MARCO TEÓRICO	48
3.2.1 Geomorfología tradicional	48

3.2.2	Geomorfología cuantitativa	48
3.2.3	Análisis visual de formas granos mediante un software especializado	48
3.2.4	Image J	48
3.2.5	Método de la batea	49
3.3	IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE LOS MINERALES PESADOS	49
3.3.1	Descripción de algunos minerales pesados	50
3.3.2	Abundancia Relativa de los Minerales Pesados	55
3.3.2.1	Los factores que alteran la abundancia de los minerales pesados	55
3.3.3	Minerales pesados en los estudios prospectivos	58
3.3.4	Características Texturales Generales	59
3.3.4.1	La Forma De Los Granos (Esfericidad)	59
3.3.4.2	Rasgos Superficiales	59
3.5	EROSION	61
3.5.1	Erosión Eólica	61
3.5.1.1	Mecanismos de erosión por el viento	61
3.5.2	Erosión Fluvial	63
3.5.2.1	Mecanismos de transporte fluvial.	63
3.6	ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO	66
3.7	CÁLCULO DE ÍNDICES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS (ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO)	69
3.7.1	Pendiente	69
3.7.2	Índice de transporte de sedimento (STI)	70
3.7.3	Índice de humedad (WI)	70
3.7.4	Índices de erosión	71
3.7.5	Poder de flujo total o (TSP)	72
3.7.6	Poder de flujo unitario (USP)	72
3.7.7	Poder de flujo de cizalla (SSP)	21
3.7.8	Cálculo del relieve	73
3.8	METODOLOGÍA	74
3.8.1	INTRODUCCIÓN	74
3.8.2	ASPECTOS METODOLÓGICOS	74
3.8.2.1	Fase Pre-campo	74
3.8.2.2	Fase de Campo	74

3.8.2.3	Fase de laboratorio y oficina	75
3.9	DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS A UTILIZAR	76
3.9.1	Fase Campo	76
3.9.1.1	Toma de muestras	76
3.9.1.2	Fase de Laboratorio	76
3.9.1.3	Tamizado de las muestras	77
3.9.1.4	Separación de los minerales pesados por sistema hidrogravimétrico	77
3.9.1.5	Secado de la muestra	79
3.9.1.6	Separación Magnética Manual	79
3.9.1.7	Separación magnética por el Magnet Lift	80
3.9.1.8	Separación de minerales pesados mediante Bromoformo	81
3.9.1.9	Recuperación del Bromoformo	83
3.9.1.10	Separación magnética de minerales pesados usando el separador isodinámico Frantz	84
3.9.1.11	Preparación de las secciones montadas	86
3.9.2	FASE DE OFICINA	86
3.9.2.1	Análisis visual de minerales pesados	86
3.9.2.2	Análisis automatizado de imágenes	88
3.9.2.3	Análisis de imágenes petrográficas	89
3.9.2.4	Equipos para el Análisis de Imágenes Petrográficas	89
3.9.2.9	Microscopio Óptico	90
3.9.2.10	Microscopio Electrónico de Barrido	90
3.9.3	Preparación de la Muestra	91
3.9.4	Adquisición de imágenes	92
4.	RESULTADOS	93
4.1	INTRODUCCIÓN	93
4.2	ANÁLISIS MORFO-TEXTURAL DE GRANOS	93
4.2.1	MUESTRA DEL RIO CATANIPO	93
4.2.2	MUESTRA DEL RIO META	99
4.2.3	MUESTRA DEL RIO PARGUAZA	100
4.2.4	MUESTRA DEL RIO ORINOCO	103

4.2.5 MUESTRA SANTOS LUZARDO	106
4.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)	108
4.3.1 RÍO PARGUAZA	109
4.3.1.1 MUESTRA (1) MINERALES MAGNÉTICOS PARGUAZA	109
4.3.2 RÍO ORINOCO	111
4.3.2.1 MUESTRA (1) ORINOCO MINERALES NO MAGNÉTICOS	111
4.3.3 RÍO META	113
4.3.3.1 MUESTRA(1) MINERALES MAGNETICOS META.....	113
4.3.3.2 MUESTRA (2) MINERALES NO MAGNÉTICOS META	115
4.3.4 DUNA SANTOS LUZARDO	117
4.3.4.1 MUESTRA (1) MINERALES MAGNETICOS SANTOS LUZARDO	117
4.3.4.2 MUESTRA (2) MINERALES MAGNETICOS SANTOS LUZARDO	119
4.3.4.3 MUESTRA (3) MINERALES NO MAGNETICOS SANTOS LUZARDO	121
4.3.4.4 MUESTRA (4) MINERALES NO MAGNETICOS SANTOS LUZARDO	123
4.3.5 RÍO CATANIAPO.....	125
4.3.5.1 MUESTRA CATANIAPO NO MAGNÉTICOS.....	125
4.4 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO.....	127
4.4.1 ATRIBUTOS PRIMARIOS.....	127
4.4.1.1 ELEVACIÓN Y PENDIENTE.....	127
4.4.1.2 RELIEVE Y PRECIPITACIÓN.....	134
4.4.2 ATRIBUTOS SECUNDARIOS DEL TERRENO.....	141
4.4.2.1 ÍNDICE DE HUMEDAD (WI).....	141

4.4.2.2CAPACIDAD DE FLUJO DE SEDIMENTOS.....	148
4.4.2.3 PODER DE FLUJO TOTAL (TSP), PODER DE FLUJO UNITARIO (USP),PODER DE FLUJO DE CIZALLA (SSP).....	154
5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	175
5.5.1 INTRODUCCIÓN.....	175
5.5.2 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO.....	175
5.5.3 ANÁLISIS MORFO- TEXTURAL.....	178
5.5.4 ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES DE MINERALES PESADOS	179
5.5.5 INTEGRACIÓN DE LOS DIFERENTES RESULTADOS.....	181
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	188
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	191

INDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PAG.
<i>Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio y muestras recolectadas a lo largo de ella (modificado de Hackley et al., 2005).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.1. Mapa de distribución de terrenos alóctonos. Dichos terrenos fueron suturados secuencialmente a la cuenca autóctona del Paleozoico Inferior, durante el Ordovícico-Silúrico, durante el Carbonífero, y desde finales del Mesozoico hasta el presente (Tomado de Yoris y Ostos, 1997)</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.2. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el Norte de Suramérica, en los cuales hay rocas precámbricas. Dichos terrenos fueron suturados secuencialmente al Norte de Suramérica durante el Ordovícico-Silúrico (Orogénesis Herciniana) y desde finales del Mesozoico hasta el presente.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.3. Evolución geodinámica de Imataca (1ª etapa) por compresión entre placas oceánicas con cambio de subducción a la izquierda y (2da etapa) sucesiva sobre posición o aglutinación de los arcos o microcontinentes formando parte del supercontinente Guayanensis o Valvaara o Kenoriano. Tomado de (Mendoza, 2005).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.4. Estructura domica de los granitos sódicos del Complejo Supuamo y los sinformes de CRV de Pastora y Botanamo, b) cierre del océano y colisión de los CRV de Pastora y Botanamo contra el continente Imataca. La zona de colisión está representada por la Falla o Sutura del Guri al NE y de Takutu al SW. (Tomado de Mendoza, 2005).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.5. Mapa geológico actual del alto relieve del Escudo de Guayana (Tomado y modificado de Hackley)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.6. Mapas geológicos de las cuencas de los ríos Parguaza (a) y Cataniapo (b)</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.7. Mapa de Provincias Geológicas del Escudo de Guayana. (Tomado de: Mendoza, 2005).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.8. Mapa geológico esquemático del Complejo de Imataca al oeste de río Caroní. Tomado de (Dougan, 1972).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.9. Complejo de Imataca fajas tectónicas. (Ascanio, 1975).....</i>	<i>23</i>

<i>Figura 2.10. Evolución magmática de Granitos Rapakivis del Parguaza.(Tomado de Mendoza 2005).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.11. Mapa de pisos térmicos de Venezuela</i>	
<i>(Imagen Tomado de: http://www.venemia.com)</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.12. Tipos climáticos de Venezuela según Thornwaite, el área de estudio está delineada en rojo (Tomado y modificado de www.venemia.com).....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.1. Forma de las partículas.</i>	
<i>(Tomado y modificado de Viana y Arcia, 2013)</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.2. Mecanismos de erosión generados por el viento (Savat, 1982)</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.3. Calculo de la pendiente</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.4. Toma de muestra con batea in situ .</i>	
<i>(Tomado de Arcia y Viana, 2014).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.5. Colocación de la muestra en la tamizadora (a). Se le agrega agua a la muestra con una manguera (b). Se guarda e identifica el material que queda en el tamiz 200 (c).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3.6. Mesa Wifley utilizada en la separación de minerales pesados (a, b). Los minerales pesados recorren diagonalmente la mesa y no saltan las separaciones (c). Los minerales se alojan en diferentes envases según se densidad (d).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3.7. Lámpara de secado</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.8. Separación manual de la magnetita y pirrotita con un imán</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.9. Separador magnético Lift Magnet</i>	<i>81</i>
<i>Figura 3.10. Bromoformo (a). Bata y guantes deben usarse para trabajar con este peligroso liquido (b). En el embudo los minerales pesados quedan en la parte de abajo y los livianos quedan flotando arriba (c). Un embudo y un filtro separan el Bromoformo que cae en un vaso precipitado los minerales pesados quedan en el filtro (d).....</i>	<i>83</i>

<i>Figura 3.11. Separación de Bromoformo del alcohol</i>	
<i>en un embudo de separación.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 3.12. Recuperación de los minerales pesados que quedan en el filtro(a). Separador isodinámico Frantz (b). Vasos donde se depositan los minerales magnéticos y no magnéticos (c).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.13. Explicación para la preparación de una sección montada (Tomado de: http://edafologia.ugr.es)</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.14. Grano evaluado visualmente y comparados con el modelo Krumbein y Sloss (1963), para determinar Redondez y Esfericidad pertenecen a la muestra del Rio Cataniapo Magnético</i>	<i>87</i>
<i>Figura 3.15. Carta de índice de esfericidad y redondez (Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963)</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.16. Microscopio Olympus CX31 utilizado para la toma de imágenes y el análisis morfo-estructural de los granos</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.17. Microscopio Electrónico de Barrido Itachi S-2400 utilizado para el análisis químico de las muestras</i>	<i>91</i>
<i>Figura 3.18. (a) Imagen Obtenida por Microscopio Óptico 150 X (b) Imagen Obtenida por el Microscopio Electrónico de Barrido</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.1. Circones de la fracción magnética del rio Cataniapo.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.2. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) no magnéticos (b) de la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4.3. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) no magnéticos (b) de la cuenca del Rio Cataniapo</i>	<i>97</i>
<i>Figura 4.4. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) no magnéticos (b) de la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4.5. Tortas que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 4.6. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) no magnéticos (b) de la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>102</i>

<i>Figura 4.7. Tortas que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.8. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) no magnéticos (b) de la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4.9. Tortas que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.11. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) no magnéticos (b) de la duna de Santos Luzardo.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4.12. Histogramas que muestran el promedio de los índices de esfericidad y redondez calculados y observados por cuenca para minerales magnéticos(a) y no magnéticos (b).....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4.13. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Parguaza magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.14. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Orinoco no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4.15. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Meta magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4.16. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Meta no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4.17. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....</i>	<i>118</i>

Figura 4.18. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....120

Figura 4.19. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....122

Figura 4.20. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....124

Figura 4.21. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Cataniapo no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nicoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nicoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.....126

Figura 4.22. Mapa de la cuenca del Rio Cataniapo: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación.....129

Figura 4.23. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación.....130

Figura 4.24. Mapa de la cuenca del Rio Parguaza: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación.....131

Figura 4.25. Mapa de la cuenca del Rio Orinoco: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación.....132

Figura 4.26. Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación.....133

Figura 4.27. Mapa de la cuenca del Rio Cataniapo: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación.....136

Figura 4.28. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación.....137

Figura 4.29. Mapa de la cuenca del Rio Parguaza: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación.....138

<i>Figura 4.30. Mapa de la cuenca del Rio Orinoco: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 4.31. Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 4.32. Histograma que representa la media del índice de Humedad (WI) e índice de humedad con precipitación (WIP) para cada cuenca estudiada.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 4.33. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 4.34. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 4.35. Mapa de la cuenca del Rio Parguaza: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 4.36. Mapa de la cuenca del Rio Orinoco: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 4.37. Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 4.38. Mapa de la cuenca del Rio Cataniapo: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 4.39. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 4.40. Mapa de la cuenca del Rio Parguaza: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 4.41. Mapa de la cuenca del Rio Orinoco: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 4.42. Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 4.43. Histogramas que representan la media del poder de flujo total (TSP) e poder de flujo total con precipitación (TSPP) para cada cuenca estudiada.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 4.44. Mapa de la cuenca del Rio Cataniapo: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 4.45. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación.....</i>	<i>159</i>

<i>Figura 4.46. Mapa de la cuenca del Rio Parguaza: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 4.47. Mapa de la cuenca del Rio Orinoco: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 4.48. Mapa de la cuenca de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 4.49. Histogramas que representan la media del poder de flujo unitario (USP) e poder de flujo unitario con precipitación (USPP) para cada cuenca estudiada.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 4.50. Mapa de la cuenca del Rio Cataniapo: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 4.51. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 4.52. Mapa de la cuenca del Rio Parguaza: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 4.53. Mapa de la cuenca del Rio Orinoco: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 4.54. Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 4.55. Histogramas que representan la media del poder de flujo total (SSP) e poder de flujo total con precipitación (SSPP) para cada cuenca estudiada.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 4.56. Mapa de la cuenca del Rio Cataniapo: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 4.57. Mapa de la cuenca del Rio Meta: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 4.58. Mapa de la cuenca del Rio Parguaza: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación.....</i>	<i>172</i>
<i>Figura 4.59. Mapa de la cuenca del Rio Orinoco: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación.....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 4.60. Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación.....</i>	<i>174</i>
<i>Figura 5.1. Relación entre precipitación y relieve calculado a diferentes radios.....</i>	<i>183</i>

<i>Figura 5.2. Relación entre índices de erosión uniformes normalizados y relieve a 1 km de radio.....</i>	<i>183</i>
<i>Figura 5.3. Relación entre precipitación y redondez para el área de estudio</i>	<i>184</i>
<i>Figura 5.4. Resultados de la datación por trazas de fisión de la muestra del río Cataniapo.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 5.5. Resultados de la datación por trazas de fisión de la muestra del río Meta.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 5.6. Resultados de la datación por trazas de fisión de la muestra del río Parguaza.....</i>	<i>187</i>

INDICE DE TABLAS

CONTENIDO	PAG.
<i>Tabla 2.1: Formaciones que son atravesadas por los ríos en estudio</i>	36
<i>Tabla 2.2. Descripción del granito de Parguaza (Tomado del LEV, 2010)</i>	37
<i>Tabla 2.3. Descripción de la Formación Cinaruco (Tomado del LEV, 2010)</i>	38
<i>Tabla 2.4. Descripción de la Formación Esmeralda (Tomado del LEV, 2010)</i>	39
<i>Tabla 2.5. Descripción de la Formación Caicara (Tomado del LEV, 2010)</i>	40
<i>Tabla 2.6. Descripción del Grupo Cuchivero (Tomado del LEV, 2010)</i>	41
<i>Tabla 2.7. Descripción del Grupo Roraima (Tomado del LEV, 2010)</i>	42
<i>Tabla 2.8. Características fisiográficas de la cuenca de Apure</i>	46
<i>Tabla 2.9. Características fisiográficas del estado Amazonas</i>	47
<i>Tabla 3.1. Algunos minerales pesados y sus características (Tomado de Hulburt, 1991 en Herrera, 2004)</i>	50
<i>Tabla 3.2. Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem). (Tomado de Moore, Grayson y Ladson 1991)</i>	66
<i>Tabla 3.3. Características Topográficas Secundarias que pueden ser calculados mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Tomado de Moore y otros, 1991)</i>	68
<i>Tabla 3.4. Parámetros ecuaciones y dimensión de las diversas variables objeto de estudio (Tomado y modificado de Flores 2013)</i>	69
<i>Tabla 3.5. Minerales pesados separados por el equipo isodinámico Frantz de acuerdo a amperaje y ángulos de inclinación (Tomado de Hess, 1959)</i>	85

<i>Tabla 4.1. Muestra la media de esferidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 4.2. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Rio Cataniapo</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 4.3. Muestra la media de esferidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.4. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 4.5. Muestra la media de esferidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 4.6. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Rio Parguaza</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 4.7. Muestra la media de esferidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 4.8. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 4.9. Muestra la media de esferidad y redondez por grupo mineral para la duna de Santos Luzardo</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 4.10. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la duna de Rio Santos Luzardo</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 4.11. Muestra el promedio de la esferidad y redondez por cuenca para las muestras de minerales magnéticos y no magnéticos</i>	<i>107</i>

<i>Tabla 4.12 a, b. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética de Parguaza</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 4.13. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Orinoco</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 4.14. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética Meta</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 4.15. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética Meta</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 4.16. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética de Santos Luzardo</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 4.17. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética de Santos Luzardo</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 4.18. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Santos Luzardo.</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 4.19. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Santos Luzardo.</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 4.20. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Cataniapo</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 4.21. Muestra los minerales que se obtuvieron a partir de los histogramas y tablas de porcentajes de peso y átomos de los elementos químicos obtenidos a través de la Microscopia Electrónica.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 4.22. Muestra los datos del área, elevación y pendiente de cada cuenca estudiada.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 4.23. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>129</i>

<i>Tabla 4.24. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 4.25. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 4.26. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 4.27. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la duna de Santos Luzardo.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 4.28. Valores estadísticos del relieve calculado a radios de 1, 3,5 y 7 kilómetros.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 4.29. Valores de precipitación anual promedio registrados en cada cuenca según el modelo TRMM 2B31 para el período 1998-2009.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 4.30. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 4.31. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>137</i>
<i>Tabla 4.32. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 4.33. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 4.34. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la Duna de Santos Luzardo.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 4.35. Índices de humedad calculados para cada una de las cuencas con precipitación uniforme (WI) y con precipitación variable (WIP) según los TRMM.....</i>	<i>141</i>

<i>Tabla 4.36. Se representan los valores de la media del índice de humedad (WI) e índice de humedad con precipitación (WIP) calculados por cada cuenca.....</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 4.37. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 4.38. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 4.39. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 4.40. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>146</i>
<i>Tabla 4.41. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo.....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 4.42. Capacidad de transporte de sedimentos calculada para cada una de las cuencas con precipitación uniforme (STI) y con precipitación variable (STIP) según los TRMM.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 4.43. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 4.43. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 4.44. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 4.45. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 4.46. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo.....</i>	<i>153</i>

<i>Tabla 4.47. Valores de índice de erosión para cada una de las cuencas con precipitación uniforme y con precipitación variable según los TRMM. TSP se refiere a Poder de flujo total; USP es el Poder de flujo unitario y SSP es el Poder de flujo de cizalla.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 4.48. Representa la media del poder de flujo de total por cuenca (TSP) y con precipitación (TSPP).....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 4.49. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 4.50. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 4.51. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 4.52. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Orinoco.....</i>	<i>161</i>
<i>Tabla 4.53. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo.....</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 4.54. Representa la media del poder de flujo unitario por cuenca (USP) y con precipitación (USPP).....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 4.55. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Cataniapo.....</i>	<i>164</i>
<i>Tabla 4.56. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Meta.....</i>	<i>165</i>
<i>Tabla 4.57. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Parguaza.....</i>	<i>166</i>

<i>Tabla 4.58. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Orinoco</i>	167
<i>Tabla 4.59. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo</i>	168
<i>Tabla 4.60. Representa la media del poder de flujo de cizalla por cuenca (SSP) y con precipitación (SSPP)</i>	169
<i>Tabla 4.61. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Cataniapo</i>	170
<i>Tabla 4.62. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Meta</i>	171
<i>Tabla 4.63. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Parguaza</i>	172
<i>Tabla 4.64. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Rio Orinoco</i>	173
<i>Tabla 4.65. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo</i>	174
<i>Tabla 5.1. Compendio de parámetros obtenidos para cada una de las cuencas en estudio</i>	182
<i>Tabla 5.2. Valores de coeficientes de correlación Pearson para cada uno de los parámetros mostrados en la Tabla 5.1</i>	182

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

Las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias pueden contener minerales principales y accesorios entre estos minerales pesados (Ilmenita, circón, apatito, rutilo, etc) resistentes a los procesos de meteorización (física, química, mecánica). Estos minerales son liberados por la acción de los agentes geológicos externos quienes descomponen las rocas permitiendo la remoción de estos minerales de su roca fuente y estos son depositados en la parte más bajas de las cuencas, como resultado del transporte por la acción del agua o del viento estos resistatos son concentrados en base al tamaño, forma, gravedad específica en depósitos de arenas y gravas. Por lo general, éstos presentan una gravedad específica mayor de $2,89 \text{ g/cm}^3$ (Mitchell, 1975).

Los minerales pesados derivan generalmente de los minerales accesorios genéticamente estables de la roca madre no obstante pueden ser el remanente de minerales primarios tales como los componentes máficos más abundantes pero inestables de algunas rocas ígneas, el circón es un ejemplo de un mineral accesorio estable y la hornblenda es un mineral accesorio inestable muy abundante en el material parental de origen ígneo.

Debido a que los minerales pesados raramente constituyen más del 1 % de la roca original, su concentración en los sedimentos es sumamente baja y es necesario concentrarlos y separarlos del material liviano (cuarzo, feldespatos, calcita) para su estudio por medio del uso de líquidos de alta gravedad específica como el Bromoformo.

A pesar de la poca abundancia de los minerales pesados su estudio tiene amplias aplicaciones (Mange y Maurer, 1992). En el sedimento, ellos están

compuestos a diversas especies minerales cuya asociación final puede utilizarse con el propósito de:

- a) Determinar la roca fuente o unidades litológicas
- b) Determinar provincias petrológicas sedimentarias
- c) Localizar depósitos minerales potencialmente económicos
- d) Realizar estudios de correlación entre unidades litológicas

Para llevar a cabo el presente Trabajo Especial de Grado se formuló como objetivo general en el cual se busca discriminar los agentes (climáticos o tectónicos) controladores del relieve actual mediante el estudio de minerales pesados provenientes de sedimentos modernos transportados por los ríos Parguaza, Cataniapo, Meta y una duna presente en el área de trabajo conocida como Santos Luzardo. Todas estas muestras se encuentran en una región situada al suroeste de la cuenca del río Orinoco, específicamente entre los estados Apure y Amazonas, para cumplir dichos objetivos fue necesario realizar una serie de objetivos específicos que serán mencionados en el desarrollo de este trabajo.

La integración de los análisis antes mencionados junto con el cálculo de índices de erosión y otras medidas geomorfológicas cuantitativas que integren patrones de precipitación, las geoformas, posibles estructuras y edades termocronológicas permitirá establecer la relación entre clima-relieve y tectónica de la zona de estudio.

Los resultados obtenidos en este trabajo forman parte del proyecto de grupo CDCH-UCV numero 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” y del proyecto GIAME (Geodinámica Integral de Los Andes de Mérida) , el primer proyecto es coordinado por los investigadores del Laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela (UCV), el segundo proyecto se enmarca en una cooperación científica entre FUNVISIS y el laboratorio antes mencionado.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El modelado del relieve actual es el producto de la interacción de diferentes procesos que pueden trabajar en forma acoplada o no, como son los procesos endógenos (tectónica), exógenos (clima) y las intervenciones antrópicas. Esto ocasiona un aumento en las tasas de erosión, las cuales a su vez pudieran incrementar la tasa de exhumación de orógenos. En zonas relacionadas con cratones se ha evidenciado recientemente (Foley, 2008; Forbes y otros., 2012; Wang y otros., 2013) que el clima ejerce un control sobre la topoforma, pero también depende del tipo de litología, ese cambio en la topoforma forzado por el clima podría ser tan fuerte que causaría un desequilibrio conduciendo así un levantamiento por rebote isostático, en este caso, esto sería un tipo de exhumación, en donde la tectónica es menos importante que el clima como agente controlador del paisaje actual (England y otros, 1990; Ring y otros., 1999). Bajo esta perspectiva, no existe ningún trabajo que trate de relacionar la posible exhumación reciente del Escudo de Guayana con las variaciones climáticas, la mayoría de los trabajos existentes se han concentrado en el estudio de la exhumación por tectonismo (Baldwin y otros, 1986; Almeida y otros., 2008; Rosa-Costa y otros., 2009). Posiblemente, aunque actualmente en este sector la tectónica podría no jugar un papel importante, la existencia de otros estudios alrededor del mundo (Zhang y otros, 2005; Frimmel y otros, 2005) indican que en cratones la tectónica sigue siendo activa y más aún está interactuando con el clima. Adicionalmente, en la zona de trabajo también la presencia de dunas, como la de Santos Luzardo ubicada entre los ríos Capanaparo y Cinaruco y la confluencia de los mismos con el río Orinoco sugieren que la erosión eólica también podría tener un papel importante.

En consecuencia las preguntas de investigación que se tratarían de responder en este Trabajo Especial de Grado serían:

- ¿Qué información sobre los orógenos circundantes podría arrojar la caracterización mineralógica de los sedimentos recientes de los ríos y de las dunas antes mencionadas?
- ¿La tectónica jugaría un papel importante en la zona de estudio?
- ¿Están trabajando los procesos del clima, relieve y tectónica en la erosión en forma acoplada o no?
- ¿De qué forma la caracterización de partículas de sedimentos y de minerales pesados junto con los índices de erosión podrían ser integrados para esta área?

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación forma parte de dos proyectos de investigación a gran escala anteriormente mencionados. Los ríos considerados para este Trabajo Especial de Grado, también estarían drenando sectores de Los Andes de Venezuela y de la Cordillera Oriental de Colombia, para estas cordilleras existe una extensa base de datos de edades termocronológicas in-situ y detríticas en el Laboratorio de Termocronología. Así, la posterior datación de los minerales pesados (apatitos y circones) mediante termocronología por trazas de fisión y su respectiva comparación con la base de datos mencionada anteriormente podría dar indicios de la procedencia sedimentaria de las partículas, y de la erosión a gran escala tanto en Los Andes de Venezuela como en la Cordillera Oriental de Colombia. Los resultados que aquí se deriven, serán integrados dentro de los proyectos de investigación anteriormente mencionados, en primer lugar, ya que todos los ríos drenan hacia la cuenca del río Orinoco, y en segundo lugar, porque se podría obtener información acerca del rol de tectónica en este sector y la discriminación de diferentes eventos tecto-térmicos ocurridos en Los Andes del Norte de Suramérica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Discriminar los posibles agentes (climáticos o tectónicos) controladores del relieve actual mediante el estudio de minerales pesados, en una región situada al suroeste de la cuenca del río Orinoco.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calcular los índices de erosión a partir de modelos de elevación digital tomando en cuenta litología, relieve, pendiente, precipitación y por ultimo delimitar la geometría para cada cuenca.
- Integrar estudios geomorfológicos convencionales mediante la interpretación de imágenes aéreas, satelitales, RADAR y mapas geológicos con estudios de geomorfología cuantitativa.
- Realizar estudios de proveniencia, mediante análisis de forma, redondez y esfericidad sobre minerales pesados.
- Cuantificar la influencia de la erosión eólica en la zona de estudio.
- Fechar muestras de circones detríticos de sedimentos modernos de los ríos Parguaza, Cataniapo y Meta con la finalidad de discriminar las edades recientes de denudación registrados en los mismos.

1.4 ALCANCE

Este proyecto de investigación permitirá discriminar los efectos del clima o la tectónica como agentes controladores del paisaje actual de una extensa área limitada entre la duna de **Santos Luzardo** ubicada en el estado Apure entre los ríos Capanaparo por el norte, Cinaruco al sur y un segmento del **Río Orinoco** cuyos afluentes son los ríos **Meta** el cual nace en la cordillera oriental de Colombia y atraviesa al estado Apure por el sur hasta interceptar al río Orinoco por el oeste, **Parguaza y Cataniapo** ambos se ubican en el estado Amazonas al suroeste del Escudo Guayanés e interceptan al río Orinoco por el este. Se pretende realizar la caracterización mineralógica y morfo-textural a cuatro muestras: 3 de sedimentos modernos de los ríos antes mencionados y 1 de las Dunas de Santos Luzardo. A partir de esta caracterización y de los cálculos geomorfológicos cuantitativos que tomen en cuenta los diferentes atributos primarios del terreno (pendiente, elevación, relieve) se generará un mapa de distribución de minerales pesados y un mapa de erosión actual por sub-cuencas, que al ser combinados con la información geológica (tipo de litología y estructuras de deformación) deberá proveer indicios de zonas propensas a mayor erosión. También, se desea realmente discriminar en esta zona si la tectónica juega un papel preponderante o no sobre la evolución del paisaje. Tres de las cuatro muestras fueron fechadas por el método de datación por huellas de fisión en circones.

1.5 ANTECEDENTES

A continuación se presentan algunos trabajos realizados en el área de estudio sobre minerales pesados, que sirven de apoyo para el presente trabajo de investigación.

1.5.1 Antecedentes Geológicos

Lo Mónaco, S & Yanéz, C (1990) Realizaron un estudio de la textura, mineralogía y composición química del yacimiento de los Pijiguaos, proponiendo un modelo sencillo para explicar la formación de la bauxita de los Pijiguaos desarrollada sobre El Granito de Parguaza; dicho modelo comienza con un periodo de fracturamiento del granito por la actividad tectónica (Pre-Cámbrico), luego una etapa de estabilidad tectónica y percolación de aguas meteóricas a través de las fracturas, ocasionando la alteración de algunos minerales primarios y minerales neoformados como caolinita y gibbsita obteniéndose en el tiempo el desarrollo del proceso de laterización. Adicionalmente estos autores expresan que los elementos traza (Ga, Th, Nb) poseen mayores sus mayores concentraciones hacia el tope del perfil de meteorización.

Meléndez, W (1995) Estudió la distribución de elementos químicos y minerales pesados en perfiles de meteorización, a diferentes niveles topográficos. El análisis mineralógico permitió identificar fases minerales como magnetitas e ilmenitas como mayoritarias y apatito, rutilo y circón como minoritario en el complejo de Cuchivero.

Moreno, Y (1996) Realizó un estudio geoquímico donde caracteriza la mineralogía y granulometría de los minerales pesados presentes en los sedimentos de los ríos (Autana, Cataniapo, Maniapure, Suapure, Parguaza entre otros) que drenan las rocas del complejo Cuchivero de la provincia de Roraima en la zona Noroeste del estado Amazonas, concluyendo que el circón y la ilmenita constituyen la fase mineralógica mayoritaria en los ríos estudiados y contienen una concentración cerca

del 0.6 y 0,641%, además la distribución mineralógica encontrada en estos ríos estudiados permitió dividir el área de estudio en dos zonas con características diferentes, la primera está ubicada en el estado Bolívar presentando concentraciones de hastingsita mayores y menores de pseudorutilo y la segunda ubicada en el estado Amazonas donde se observó la desaparición de anfíboles y el incremento de pseudorutilo, esto es atribuido a modificaciones debidas a la meteorización y el transporte.

Dávila, J (1998) Estudió dos perfiles de meteorización del yacimiento bauxita de los Pijiguaos así como la distribución granulométrica de las muestras en fracciones de gravas y arenas, encontrando en los dos primeros metros de perfil que la fase mineral predominante es la gibbsita entre 60-80% la cual está presente en todas las fracciones granulométricas disminuyendo considerablemente a mayor profundidad, por otro lado el cuarzo en los 2 primeros metros de profundidad se encuentra concentrado con un 30 % y a mayor profundidad aumenta su concentración y la caolinita se encuentra con 10-15% en los primeros metros de perfil y a mayor profundidad aumenta su concentración.

Hurtado, R (2005) Realizó un estudio del comportamiento geoquímico de cinc en la zona de máxima meteorización del perfil laterítico del yacimiento de bauxita los Pijiguaos, edo. Bolívar, Venezuela. Los resultados obtenidos en este trabajo indican que la distribución granulométrica no varía con el incremento de la profundidad donde siguen dominando los guijarros y gravas y en porcentajes minoritarios arcillas, arenas y limos, esto se debe a la formación de agregados minerales debido a la cementación de las partículas finas por oxi- hidróxidos de hierro.

Meléndez, W (2006) Realizó un estudio químico y mineralógico de los yacimientos de bauxita de los Pijiguaos. Edo. Bolívar, los resultados obtenidos indicaron que hay un enriquecimiento de Al, Fe, Ti en los 8 metros iniciales de perfil laterítico y a mayor profundidad (19 metros) los porcentajes en estos elementos

disminuyen, siendo la Gibbsita y la Hematita los minerales predominantes en la zona superficial del perfil y en la zona más profunda el cuarzo, caolinita y goethita.

Gamero, A & Reveti, M (2011) Se enfocaron en el estudio mineralógico de minerales pesados en los ríos Pao, Cuchivero, Guaniapo, Suapure, Parguaza y Cataniapo localizados en la zona noroccidental del estado Bolívar, con el fin de ubicar y limitar zonas de interés para la prospección minera. Los resultados permitieron dividir la zona de estudio en cuatro zonas anómalas, la zona A presento valores anómalos en los elementos Cr, Y, La, Ce, Nd, Th, U, P_2O_5 y altas concentraciones de Fe_2O_3 y TiO_2 y los análisis mineralógicos arrojaron posibles fases minerales: ilmenita, magnetita, cromita, Hematita e ilmenorutilo. La zona B con anomalías en Zr, Hf y U y altas concentraciones de Nb, TiO_2 y Fe_2O_3 , las fases minerales propuestas son ilmenita y circón. La zona BI con anomalías en Zr, Hf, Th, MnO y altas concentraciones de Nb, TiO_2 y Fe_2O_3 , como fases minerales se presentaron: ilmenita (Mn), hematita y magnetita y la Zona BII con anomalías en Y, La, Ce, Nd, Th, U, P_2O_5 y altas concentraciones de Zr, Hf, Nb, TiO_2 y Fe_2O_3 las fases minerales identificadas en esta zona son monacita, ilmenita (Mn) e ilmenita.

1.5.2 Antecedentes Metodológicos

Codecido, G (1969) Su libro se enfoca en las técnicas para el estudio de los minerales pesados y su aplicación en la estratigrafía de Venezuela. Sus técnicas se enfocan en la separación, identificación y clasificación de las asociaciones de minerales pesados; se discute brevemente los asuntos de correlación de minerales, tipo de roca de la cual se derivaron los minerales y la mineralogía descriptiva.

Yoris, F (1992) Se basa en el estudio de secuencias clásticas por métodos petrográficos y estadísticos. Los objetivos principales de su trabajo fue analizar la información de geología de superficie de secuencias clásticas y estudiarlas con diversas metodologías estadísticas que ayudasen a la caracterización de las mismas a escala local y regional, especialmente a lo referente a las variables petrográficas. Al igual se desarrolló una metodología de análisis modales con inclusión de variables

granulométricas y de cuantificación de partículas en función de estimadores de áreas y peso de las mismas.

Bermúdez, M (2009) Se enfocó en la exhumación de los Andes venezolanos a través de las trazas de fisión de apatito. Cuantificando la historia de erosión durante la evolución del orógeno. Estableció la historia termal a baja temperatura en diversos marcos geológicos, a través de las trazas de apatito y determinó que la exhumación está siendo controlada por la tectónica y que el clima no ejerce un factor preponderante al menos durante el Mioceno-Plioceno.

Bermúdez, M y Otros (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.

Flores, M (2013) Realizó la discriminación entre relieve, clima, y tectónica utilizando los mismos métodos mencionados en este proyecto 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.

1.6 UBICACIÓN DEL AREA DE TRABAJO

La zona de estudio, (Figura 1.1) comprende una gran extensión que abarca tres estados del país comenzando de oeste a este con el río Meta en el estado Barinas, luego por un segmento del río Orinoco comprendido por un tramo del estado Amazonas y terminando en el estado Bolívar con la intersección de los ríos Cataniapo y Parguaza. A continuación, serán descritas cada una de las formaciones que corta cada drenaje.

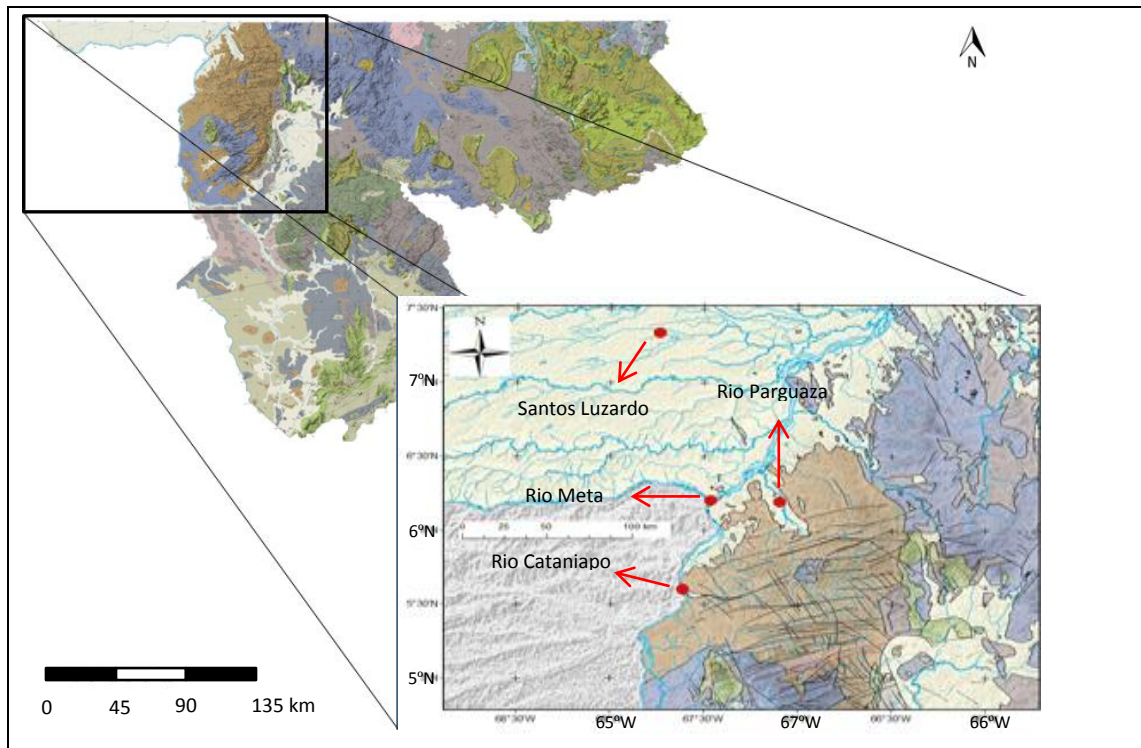


Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio y muestras recolectadas a lo largo de ella
(modificado de Hackley et al., 2005)

CAPÍTULO II

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la geología regional, geología estructural, descripción de las formaciones geológicas que atraviesan los principales sistemas fluviales situados en las cuencas a estudiar, así como aspectos fisiográficos de tales áreas.

2.2 GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra en el límite entre la cuenca del Paleozoico inferior y el Escudo de Guayana, está denotada en el cuadro de color amarillo en la figura 2.1.

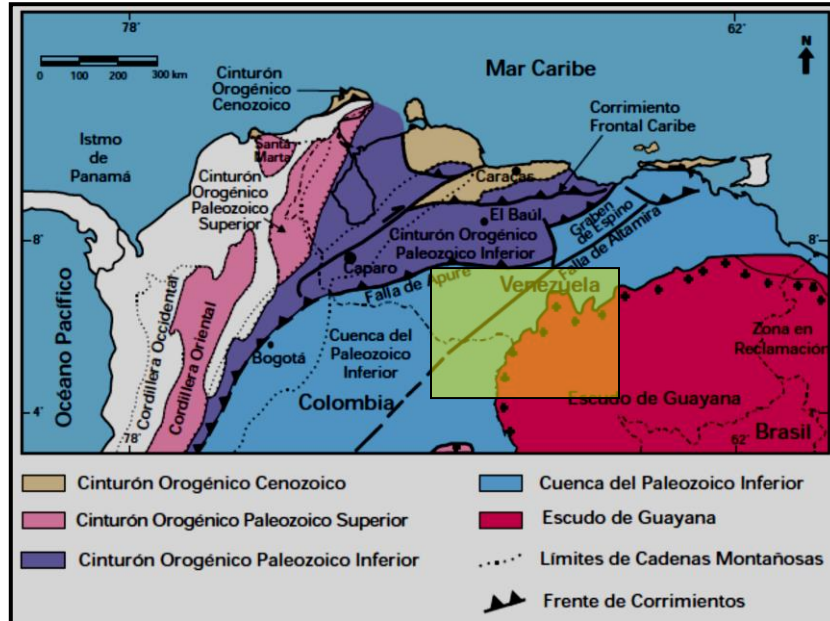


Figura 2.1. Mapa de distribución de terrenos alóctonos. Dichos terrenos fueron suturados secuencialmente a la cuenca autóctona del Paleozoico Inferior, durante el Ordovícico-Silúrico, durante el Carbonífero, y desde finales del Mesozoico hasta el presente (Tomado de Yoris y Ostos, 1997).

La Figura 2.2 muestra las diferentes provincias geológicas en las que se divide el sector del cratón de Guayana. Se observa en esta Figura 2.2 la distribución del basamento Precámbrico por debajo de las cuencas Paleozoicas y Cenozoicas.

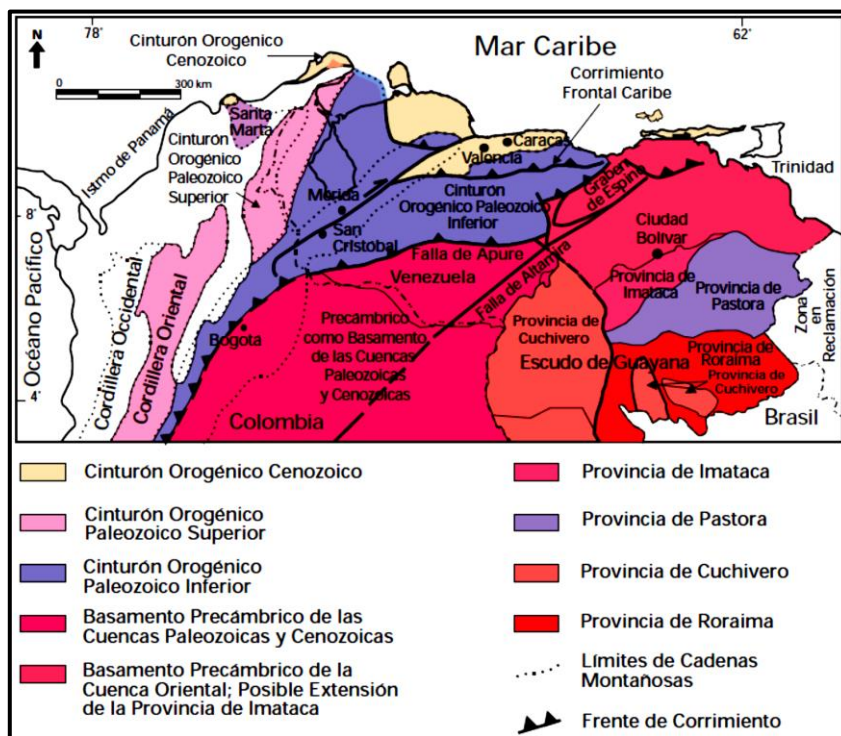


Figura 2.2. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el Norte de Suramérica, en los cuales hay rocas precámbricas. Dichos terrenos fueron suturados secuencialmente al Norte de Suramérica durante el Ordovícico-Silúrico (Orogénesis Herciniana) y desde finales del Mesozoico hasta el presente. (Tomado de Yoris y Ostos, 1997).

2.2.3 Evolución Tectónico – Estratigráfica del Escudo de Guayana.

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

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

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

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

d) Orogénesis Transamazónica: desarrollo de los océanos Pastora, Barama - Mazzaruni etc, formándose los CRV de Pastora, Botanamo y equivalentes y rocas graníticas TTG de Supamo, Bártica y equivalentes; subducción, cierre de esos océanos; colisión de los CRV-TTG con las rocas granulíticas, migmatíticas y anfibolíticas de Imataca-Kanukú, etc: de 2.3 Ga -1.95 Ga, granulitización de a) y b) de rocas de Imataca, formando parte del aglutinamiento y formación de otro gran supercontinente denominado Atlántica (Rogers, 1996). Rocas TTG de Supamo también intrusionaron al Complejo de Imataca en 2.22 Ga en La Esperanza.

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

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

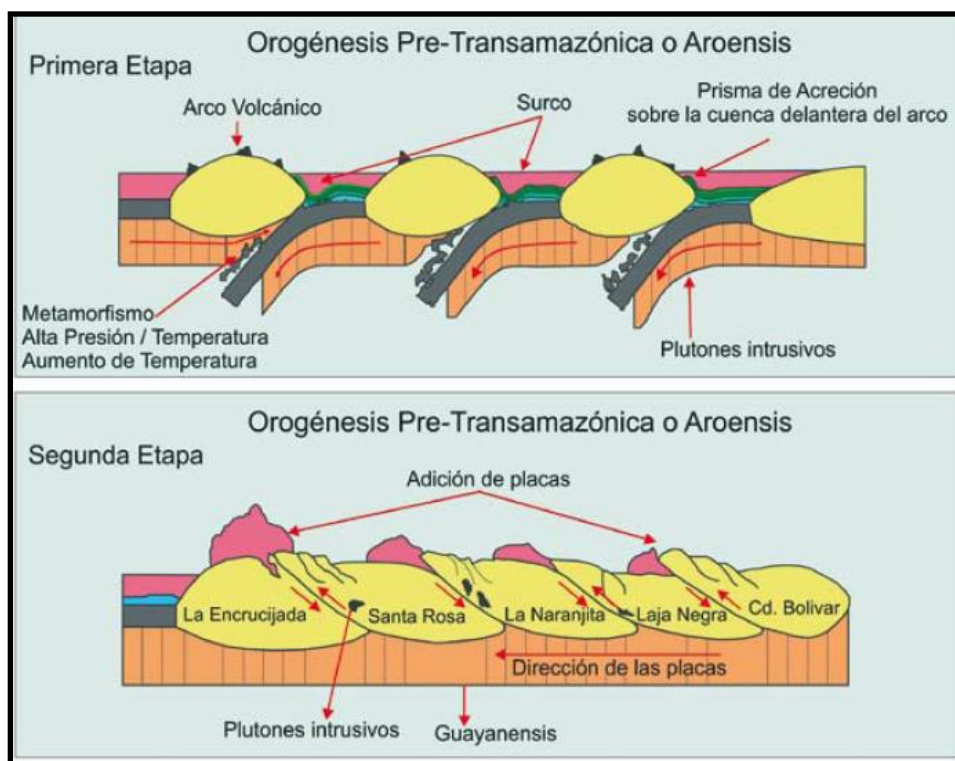


Figura 2.3. Evolución geodinámica de Imataca (1ª etapa) por compresión entre placas oceánicas con cambio de subducción a la izquierda y (2da etapa) sucesiva sobre posición o aglutinación de los arcos o microcontinentes formando parte del supercontinente Guayanensis o Valvaara o Kenoriano. Tomado de (Mendoza, 2005)

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

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

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

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

l) Después de la Orogenésis Herciniana: con Ciclos de Wilson de unos 200 Ma se separa el supercontinente Pangea en bloques continentales y comienza a formarse el Océano Atlántico. De ello tenemos algunos diques de rocas gabroides a norítico-dibásicas intrusivos en el Complejo de Imataca. La Falla de Gurí actúa como una falla de transformación en la parte oceánica y como una falla transcurrente en la parte continental.

Falla de Gurí

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

1.- >2.400 M.a. Rift continental de Gurí

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

2.- 2.150-1.960 M.a. Clímax de la Orogénesis Transamazónica

Cierre del océano Pastora. Choque de placas de Pastora versus Imataca. Gurí actúa como una zona de sutura. Se produce la granulitización de las rocas de Imataca y metamorfismo Facies Esquistos Verdes a Anfibolita en los CRV más antiguos de Pastora (Figura 2.4).

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

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

4.- 1.200±200 M.a. Orogénesis Nickeriana

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

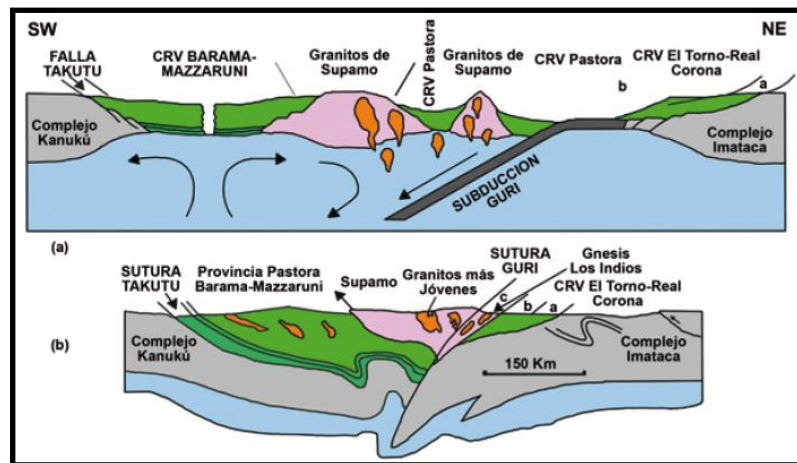


Figura 2.4. Estructura domica de los granitos sódicos del Complejo Supuamo y los sinformes de CRV de Pastora y Botanamo, b) cierre del océano y colisión de los CRV de Pastora y Botanamo contra el continente Imataca. La zona de colisión está representada por la Falla o Sutura del Guri al NE y de Takutu al SW. (Tomado de Mendoza, 2005)

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

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

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

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

7.- 150 M.a. Levantamiento, erosión, quietud tectónica:

Gurí se ha comportado desde entonces como una falla pasiva, inactiva.

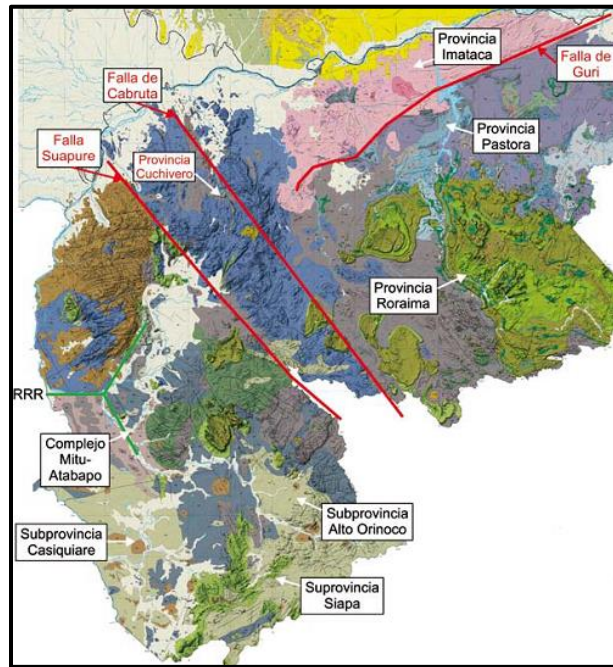


Figura 2.5. Mapa geológico actual del alto relieve del Escudo de Guayana
(Tomado y modificado de Hackley)

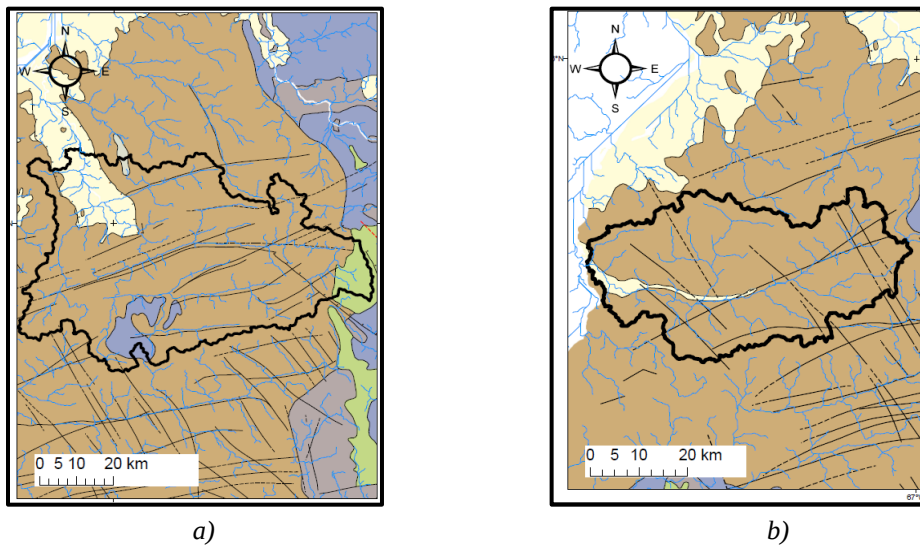


Figura 2.6. Mapas geológicos de las cuencas de los ríos Parguaza (a) y Cataniapo (b).

2.2.4 Descripción detallada de cada provincia

En el contexto regional, la zona de estudio está enmarcada dentro del llamado escudo guayanés, el cual a su vez, ha sido dividido en cuatro (4) provincias geológicas (Figura 2.2), ordenadas por Menéndez (1968) cronológicamente de la siguiente manera

1. Imataca
2. Cuchivero
3. Pastora
4. Roraima

El Escudo de Guayana se localiza al sur del Río Orinoco y ocupa aproximadamente el 50% de la superficie de Venezuela, está constituido por cuatro provincias geológicas (Figura 2.7): Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima, la zona de estudio se encuentra localizada en la Provincia de Cuchivero. Las rocas del escudo de Guayana están entre las más antiguas del país, como por ejemplo: granulitas y charnockitas del Complejo de Imataca de 3.41 Ga y otras más jóvenes como kimberlitas eclogíticas de Guaniamo de 0.711 Ga, que registran en buena parte una evolución geotectónica similar a la de otros escudos precámbricos en el mundo, con al menos ruptura de supercontinentes en 2.4-2.3 Ga (Guayanensis), 1.6-1.5 Ga (Atlántica-Caura), 0.8-0.7 Ga (Rodinia) y 0.2 Ga (Pangea) (Mendoza, 2005).

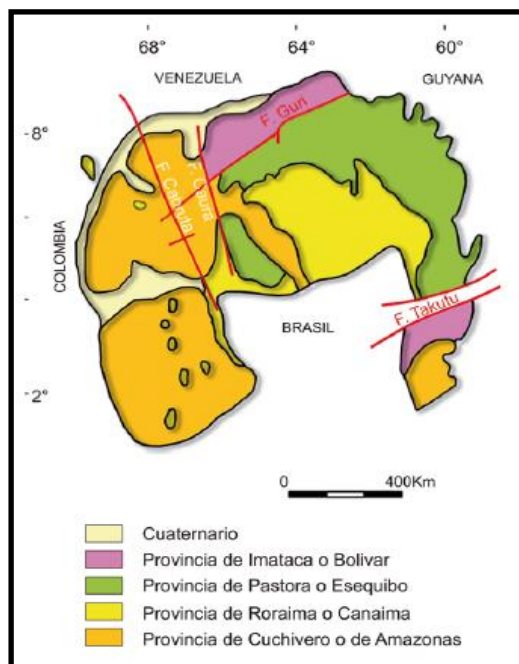


Figura 2.7. Mapa de Provincias Geológicas del Escudo de Guayana. Tomado de
2.2.4.1 Provincia de Imataca (Mendoza, 2005)

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

Litológicamente la Provincia de Imataca está formada por gneises graníticos y granulitas félsicas (60%-75)%, anfibolitas y granulitas máficas, y hasta ultramáficas (15%-20)%, y cantidades menores complementarias de formaciones bandeadas de hierro (BIF), dolomitas, charnockitas, anortositas, granitos intrusivos más jóvenes y remanentes erosionales de menos metamorizados y más jóvenes Cinturones Rocas Verdes – Tonalita, Trondjemitas Granodioritas (CRV-TTG) gnéisicos (El Torno-Real Corona) (Figura 2.8). El metamorfismo registrado en estas rocas decrece desde la Mina de Hierro de El Pao, con granulitas de dos piroxenos en charnockitas, anortositas y granulitas máficas y hasta ultramáficas (que sugieren temperaturas de

750 °C-850 °C y moderadas a elevadas presiones de 8 a 8.5 Kbs, equivalentes a menos de 30 Km de presión de roca), hacia la zona de Guri, con anfibolitas, granulitas y migmatitas, rocas graníticas, con granate-cordierita-sillimanita (que implican temperaturas de 650°-700°C y presiones de 4 a 7 Kbs, o sea menores de 20 Kms de espesor de rocas). Estas rocas de alto grado metamórfico se interpretan como evolucionados primitivos Cinturones de Rocas Verdes (CRV) y complejos graníticos potásicos y sódicos, varias veces tectonizados y metamorfeizados hasta alcanzar las facies anfibolita y granulita y sufrir luego parcialmente metamorfismo retrógrado (Mendoza, 1974).

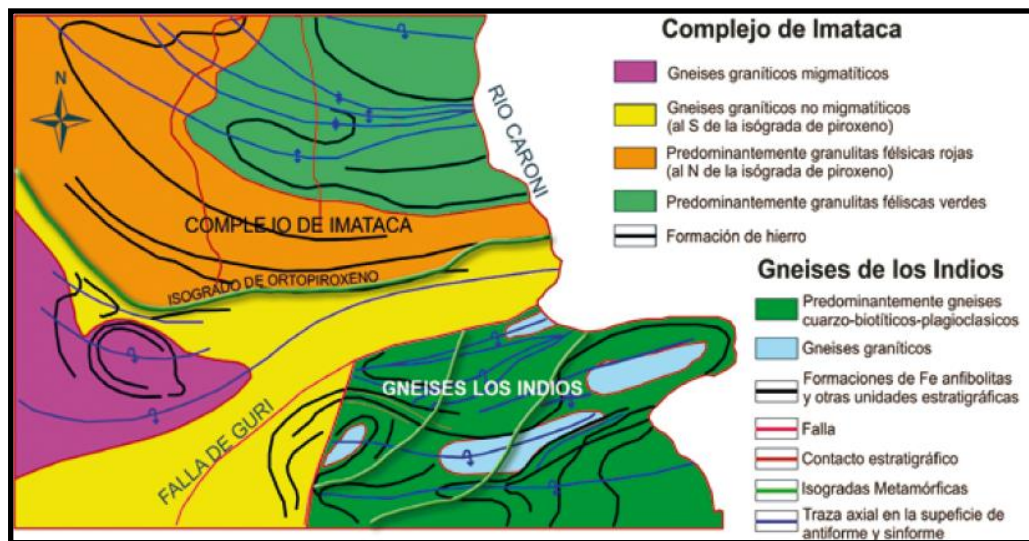


Figura 2.8. Mapa geológico esquemático del Complejo de Imataca al oeste de río Caroní.

Tomado de (Mendoza, 1972)

Ascanio (1975), postuló que parte del Complejo de Imataca está formado por varias fajas tectónicas que representan micro continentes que por deriva chocaron unos con otros con obducción, quedando separados entre sí por grandes corrimientos y fueron denominadas por el autor como: La Encrucijada, Ciudad Bolívar, Santa Rosa, La Naranjita, La Ceiba, Laja Negra y Cerro Bolívar (Figura 2.9).

Rodríguez (1997), destacó los tipos de rocas graníticas, charnockíticas y migmatíticas asociadas a cada una de estas fajas tectónicas y su importancia en usos ornamentales e industriales.

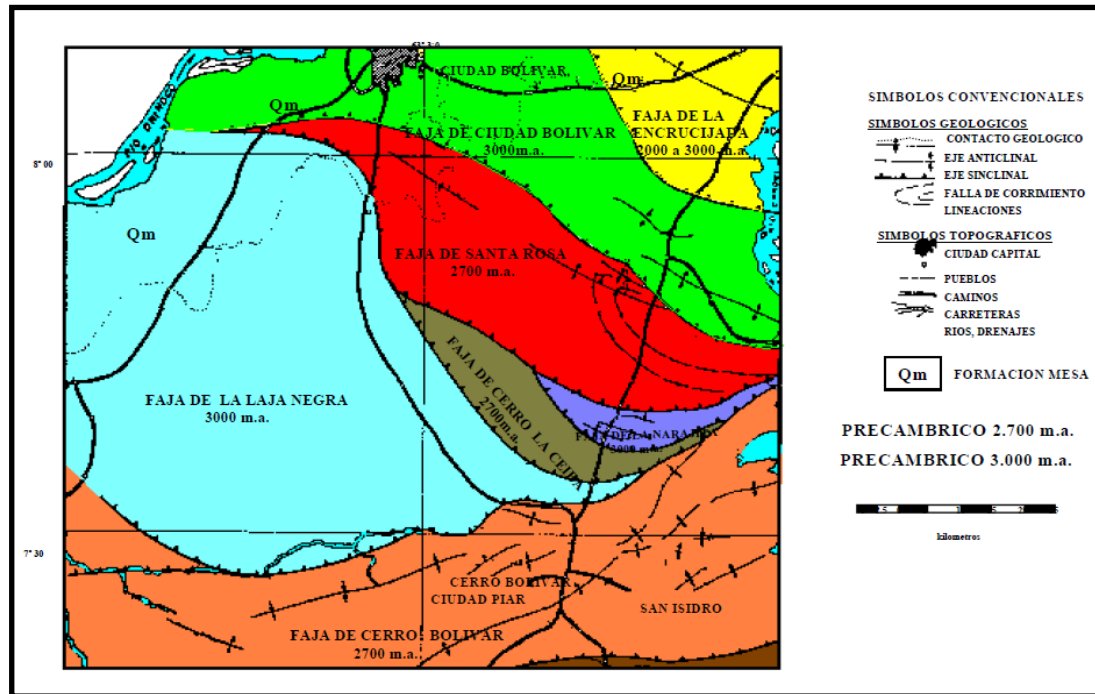


Figura 2.9. Complejo de Imataca fajas tectónicas. (Ascanio, 1975)

Edad de Complejo de Imataca

Algunos gneises, considerados sin evidencia alguna como metasedimentarios, fueron datados en roca total por Rb/Sr y Pb/Pb como en 3.7-3.4 Ga, como se ha referido antes, rocas del Complejo de Imataca fueron tectonizadas y deformadas, intrusionadas y metamorizadas alrededor de los 2.8-2.7 Ga (Migmatita de La Ceiba) y luego durante la orogénesis Transamazónica cuando fueron metamorizadas de nuevo hasta alcanzar la parte superior de la Facies Anfíbolita y la Facies Granulita de dos piroxenos (Sidder & Mendoza, 1995).

Circones recogidos en las arenas del río Orinoco al oeste inmediato de Ciudad Bolívar arrojaron dos poblaciones de edad U/Pb en esos circones: una próxima a los

2.8 Ga y otra mayoritaria y dominante de alrededor de los 2.1-2.0 Ga; pero circones de > 3.4 Ga no fueron encontrados en esa zona (Sidder y Mendoza, 1995).

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

2.2.4.2 Provincia de Pastora

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

Según Mendoza, (2005), la Provincia de Pastora o provincia del oro, está formada por dos Cinturones de Rocas Verdes (CRV), el primero delgado y el más antiguos que está tectonizado, tipo Carichapo formados en/o cerca de un arco de islas en una zona de convergencia. El segundo, más ancho y más joven y menos tectonizado y metamorfizados, tipo Botanamo, formado en la cuenca delante del arco de islas y complejos graníticos sódicos, como el Complejo de Supamo, siendo toda la secuencia intrusionada por granitos potásicos o “sensu stricto”, dioritas y rocas gabroides con escasos y no bien definidos complejos máficos-ultramáficos, ofiolíticos, tipo Yuruan-Uroy, e intrusiones de diques anulares como Nuria y sills de diabasas y rocas asociadas norítico-gabroides con algo de cuarzo. Los Cinturones de Rocas Verdes más antiguos, muestran tendencias estructurales próximas a NS (N 10° E a 20° O), mientras que los Cinturones de Rocas Verdes más jóvenes, casi siempre muestran tendencias en ángulo recto con las anteriores, próximas a E-O (N 70° - 80°

E). En la región de Guasipati-El Callao aflora una buena sección del Supergrupo Pastora (Menéndez, 1968, 1972), El Cinturones de Rocas Verdes más antiguo, está compuesto por el Grupo Carichapo y la Formación Yuruari. El Grupo Carichapo está constituido por las formaciones:

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

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

Rocas del Supergrupo Pastora más el Grupo Botanamo son correlacionadas con aquellos cinturones (CRV) del Supergrupo Barama-Mazzaruni de Guyana, el Grupo Marowijne y el Grupo Coeroni de Suriname, la Serie Paramaca (Grupos Orapú y Bonidoro) de la Guayana Francesa y el Grupo Vila Nova de Brasil (Sidder y Mendoza, 1.995) y el CRV de Parima-Cauarame del Alto Orinoco-Surucucú de Brasil (Tassinari y otros, 2.000).

La secuencia total supera los 11.000 m. de espesor, las rocas ultramáficas ocupan 1-2% de los antiguos CRV de Guayana, basaltos y rocas gabroides hasta un 75%, basandesitas y flujos de lavas andesíticas alrededor de un 15-17% y rocas

volcánicas félsicas y piroclásticas un 8% (Renner & Gibbs, 1.987).

Formaciones del Supergrupo Pastora:

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

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

-La Formación Florinda: Litológicamente está compuesta de metabasaltos almohadillados, toleiticoskomatíticos o magnesianos, intercalados con rocas ígneas posiblemente intrusivas alteradas con abundante talco y carbonatos, de composición komatítica y que se describieron originalmente (Menéndez, 1968) como serpentinitas

de Currupia. Según Menéndez (1.994) algunas de las lavas komatíticas muestran textura espinefex, preservada localmente hasta en zonas anfibolíticas.

-La Formación Yuruari: según Menéndez (1968, 1994) suprayace, concordantemente, a las formaciones El Callao y Cicapra. Sin embargo, la Formación El Callao está por encima de la Formación Yuruari, en contacto de falla inversa de ángulo bajo a intermedio. Está compuesta litológicamente de filitas, esquistos y metatobas félsicas, metalutitas negras de hasta 50 m de espesor. Los esquistos y filitas no parecen ser metasedimentarios, sino más bien tobas y lavas félsicas (dacíticas y ríodacíticas) metamorfizadas. Cerca del contacto de las formaciones Yuruari-El Callao se observan pequeñas intrusiones pórfidicas félsicas en las lavas de El Callao. Se ha interpretado que tales felsitas intrusivas en El Callao son comagmáticas y coevales con las felsitas de Yuruari. El espesor de esta formación, es de por lo menos 1.000 m y geomorfológicamente ocupa colinas bajas y sabanas, con vegetación tipo chaparros, con suelos lateríticos de colores amarillentos a algo rojizos.

-Formaciones del Grupo Botanamo

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

-Formación Caballape: esta formación yace discordantemente sobre rocas del Supergrupo Pastora y en general no son cortadas por intrusiones de granitos del tipo Complejo de Supamo, es decir que claramente son de edad post-Pastora y post-Supamo. El LEV (1997) publica una columna con granitos del Complejo Supamo reactivado en el Grupo Botanamo. En la zona de El Callao- Tumeremo, Quebrada Caballape, aflora una buena sección de grauvacas gradadas, limolitas y conglomerados (80) % con cantidades menores de tobas, brechas y flujos piroclásticos de composición andesítica a ríodacítica que según Benaïm (1.972) corresponde a la parte inferior o basal de la Formación Caballape. Esta secuencia fue

intrusionada por sills de gabros y fueron conjuntamente plegados, replegados y metamorfizados con ella.

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

Complejo Supamo

Según, Mendoza (1.975), como un conjunto de rocas graníticas, intrusivas, y/o reactivadas, en rocas del Supergrupo Pastora, con alto contenido de Na_2O , tales como tonalitas, trondjemitas, granodioritas cuarzo-monzonitas, gneises y migmatitas equivalentes. Las rocas graníticas con normal a alto contenido de K_2O y bajo a normal de Na_2O , o granitos “sensus estricto”, fueron consideradas por esos autores, como granitos más jóvenes, evolucionados e inclusive intrusivos en el Complejo de Supamo y hasta intrusivos removilizados en los Cinturones de Rocas Verdes más jóvenes como el de Botanamo. Los granitos del Complejo de Supamo, generalmente, forman domos expandidos y arqueados contra los apretados y replegados sinformes de los cinturones, como los domos de El Manteco, Santa Justa y otros. Asociados a estas rocas existen una serie de plutones pequeños y pórfidos ricos en cuarzo. Geomorfológicamente forman áreas bajas y planas, sabanas, con escasa vegetación y suelos muy arenosos, ricos en cuarzo y en vetas de cuarzo estériles, que desarrollan suelos arenosos de color blanco grisáceo a amarillento.

2.2.4.3 Provincia de Roraima

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

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

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

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

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

- **Formación Kukenan:** se encuentra concordante y supradacente a la Formación Uairén, de un espesor máximo de 100 m, integrada de paquetes

alternantes, compuesto cada uno de tope a base de areniscas feldespáticas, limolitas feldespáticas y lutitas o arcillitas.

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

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

Ambientes de Depositación

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

La estratificación cruzada, rizaduras y orientación de guijarros de los conglomerados indican que los sedimentos para la Roraima de la Gran Sabana fueron

transportados desde fuentes localizadas al NE, E y SE. Las cuencas de sedimentación fueron varias, limitadas por fallas con basamentos emergentes entre ellas simultáneas y también separadas en el tiempo (Ghosh, 1985)

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

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

Estas rocas máficas no metamorfizadas denominadas primeramente como Asociación Intrusiva en Roraima, hoy se conocen como Asociación Avanavero y se extienden intrusivas en las partes basal a media de Roraima desde el Río Paragua a la

Gran Sabana, Guyana, Suriname, posiblemente Guayana Francesa y en el Escudo Reguibat, con 1.600 Ma, de África Occidental. Así como tales diabasas no intrusieron al Granito Rapakivi de El Parguaza, tampoco alcanzaron a intrusionar a las rocas de Roraima en Amazonas, porque son posteriores a tales intrusiones registradas por lo tanto sólo en la parte Oriental del Escudo (Mendoza, 2005).

2.2.4.4 Provincia de Cuchivero

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

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

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

Asociación Cuchivero

El Grupo Cuchivero, ahora denominado Asociación Cuchivero, fue definido por (Ríos, 1972), está definida por rocas volcánicas ríolíticas de la Formación Caicara, ahora Volcánicas de Caicara, y los granitos biotíticos de Santa Rosalía y hornbléndicos de Guaniamito y San Pedro (Mendoza, 1974). En general, la Provincia de Cuchivero equivale o forma parte de la Provincia Ventuari-Tapajós, que ocupa una porción occidental del Cratón Amazónico y está formada por una serie de arcosmagmáticos de edad 1,98-1,88 Ga y que se caracteriza por un marcado tren tectónico NW-SE desde los ríos Cuchivero-Ventuari hacia el río Tapajós, y consiste esencialmente de rocas granitoides calco-alcalinas (Tassinari et al., 2000) y su basamento en el sur del Escudo de Guayana, en Venezuela, son gneises y migmatitas tonalíticos, similares a los del Complejo de Supamo (2,24 Ga en granodioritas de Las Bonitas y Bártica), pero recrystalizados y que dan edades de solo 1,75 Ga a 1,83 Ga para los gneises de Minicia - Macabana y las Cuarzo-dioritas de Atabapo, respectivamente (Mendoza, 2005).

Asociación Suapure

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

El Granito de Pijiguaos aflora en la mitad inferior de los domos del mismo nombre, en contacto no transicional con el Granito Rapakivi del Parguaza (GRP). Es

un granito de grano fino, equigranular, aspecto algo recrystalizado parcialmente homogéneo por el GRP, muy rico en cuarzo y microclino, con textura moteada en la que se observan dos o más generaciones de cuarzo, posiblemente correspondientes con las pulsaciones o intrusiones inmediatas posteriores del GRP (Mendoza, 2005).

Granito Rapakivi del Parguaza

El Granito Rapakivi del Parguaza es una roca masiva, de color gris, de grano muy grueso, con textura inequigranular Rapakivi, tipo wiborgita, con bajo a moderado contenido de cuarzo (5%-20)% alto de microclino-peritita (25%-55)%, moderado de oligoclasa (15%-30) % y notorio de minerales máficos enriquecidos en FeO (biotita 3%-17%, hornblenda 1-24% $\pm$ clinopiroxeno) con cantidades menores de magnetita, ilmenita, circón y fayalita. Son rocas metaluminosas a peraluminosas, de afinidad toleítica, ricas en Fe, K, Rb, Ni, Th, F y REE, muy fraccionadas (Figura 2.10) (Mendoza, 2005).

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



2.3 GEOLOGÍA LOCAL

Tabla 2.1 resume los principales ríos en donde fueron seleccionadas las muestras y las formaciones geológicas que atraviesan cada uno de ellos.

Tabla 2.1: *Formaciones que son atravesadas por los ríos en estudio.*

Río	Formaciones	Edad Conocida
Cataniapo	Granito Parguaza (Ypg)	Precámbrico Temprano
	Aluvión (Qal)	Cuaternario
Meta	Aluvión (Qal)	Cuaternario
Parguaza	Granito Parguaza (Ypg)	Precámbrico Temprano
	Grupo Cuchivero (Xcg)	Precámbrico
	Cinaruco (Xmo)	Precámbrico
	Esmeraldas (Xmo)	Precámbrico Temprano
	Grupo Roraima (XYrg)	Proterozoico Medio
Duna	Formaciones	Edad Conocida
Santos Luzardo	Duna Eólica (Qal)	Cuaternario

Tabla 2.2. Descripción del Granito de Parguaza (Tomado del LEV, 2010)

Formación	Granito de Parguaza
Localidad tipo	Está expuesto desde Puerto Páez hasta los Pijiguaos, los mejores afloramientos están en el Salto Maracas del río Parguaza en las montañas de El Tigre y en los domos Los Pijiguaos. edos Bolívar y Amazonas.
Descripción litológica	Granito biotítico de grano grueso a muy grueso, masivo, con textura Rapakivi, rico en feldespato potásico y hornblenda.
Espesor	No se ha mencionado en ninguna de las descripciones.
Extensión Geográfica	Parte de la región noroccidental del estado Bolívar, puede alcanzar los 10.000 Km ² . Se extiende desde el área norte y noreste de San Fernando de Atabajo y al norte y noroeste del poblado de Santa Barbara, en el estado Amazonas.
Contactos	En la región de Pijiguao, el granito contiene xenolitos de litología variable: cuarzo-latitas, micogranitos y metabasitas, pertenecientes a unidades contituyentes del Grupo Cuchivero y al Granito de Pijiguao.
Fósiles	No presenta
Edad	Precámbrico Temprano
Correlación	Probablemente correlacionable con el Granito de Guaniamito en la región de Caicara, con el Granito alcalino de La Paragua.
Paleoambientes	No se ha mencionado en ninguna de las descripciones.

Tabla 2.3. Descripción de la Formación Cinaruco (Tomado del LEV, 2010)

Formación	Cinaruco
Localidad tipo	Galeras de Cinaruco, estado Apure y su prolongación en la margen derecha del río Orinoco, hasta el valle del río Villacoa en el estado Bolívar.
Descripción litológica	Cuarcitas compactas, localmente ferruginosas, en parte sericíticas, con proporción menor de conglomerados intraformacionales, de esquistos cuarzo sericíticos que pasan transicionalmente hacia arriba a conglomerado, con el cual se hallan interestratificados y formando una matriz de filitas, a veces, hematítico-sericíticas.
Espesor	No se ha mencionado en ninguna de las descripciones.
Extensión Geográfica	Limitado a los afloramientos conocidos: Las Galeras de Cinaruco en Apure y su prolongación sobre el rumbo sur-sureste hasta el valle del río Villacoa en el estado Bolívar.
Contactos	Contacto discordante del conglomerado basal con una superficie erosional antigua en la margen sur del río Orinoco y en la sección del Valle del río Villacoa, se observan efectos de metamorfismo termal en la zona de contacto con el Granito de Parguaza. Es discordante por encima del Granito de Parguaza.
Fósiles	No presenta.
Edad	Precámbrico. Edad posterior a 1800 m.a.
Correlación	Se correlaciona estas rocas con las areniscas metamorizadas y con estratificación cruzada, infrayacentes a las ríolitas porfidíticas que afloran al Oeste del río Parguaza. Posible correlación con la Formación Esmeralda y con el Grupo Roraima
Paleoambientes	Fue afectada por el evento termal Orinoquensis que tuvo lugar hace 1300 m.a.

Tabla 2.4. Descripción de la Formación Esmeralda (Tomado del LEV, 2010)

Formación	Esmeralda
Localidad tipo	Las colinas al norte de la sabana de La Esmeralda, sobre la ribera derecha del Alto Orinoco, pocos kilómetros aguas arriba de la desviación del caño Casiquiare hacia la cuenca del Amazonas.
Descripción litológica	Esquistos cuarzo-cloríticos con epidoto, semejantes a rocas del Grupo Pastora, inyectados por diques de cuarzo que contienen xenolitos de la roca caja; con intercalaciones de cuarcitas de grano fino, compactas.
Espesor	Aflora en la sección tipo un espesor mínimo de 40 m.
Extensión Geográfica	Solo se ha reportado un área de afloramiento en la sabana adyacente al poblado de La Esmeralda.
Contactos	No se observan en el campo, sin embargo se infieren tanto el contacto boral de la unidad, intrusivo o sedimentario, con granodioritas que afloran extensamente en la región, como el superior con el Grupo Roraima.
Fósiles	No se ha mencionado en ninguna de las descripciones.
Edad	Precámbrico Temprano. Se consideran las rocas de esta unidad como Pre-Roraima y Post-Imataca.
Correlación	Posible correlación o equivalencia con la Formación Cinaruco y con la cuarcita de Mápare.
Paleoambientes	No se ha mencionado en ninguna de las descripciones.

Tabla 2.5. Descripción de la Formación Caicara (Tomado del LEV, 2010)

Formación	Caicara
Localidad tipo	En las colinas a ambos lados del camino Santa Inés - Morichal Negro, poblados situados al sur de Caicara del Orinoco, estado Bolívar.
Descripción litológica	Rocas volcánicas predominantemente ácidas, tales como ríolitas y ríolitas porfídicas y porfiríticas con matriz de grano fino a medio, seguidas en orden de abundancias por ríodacitas y dacitas porfídicas.
Espesor	No se menciona en la descripción original.
Extensión Geográfica	En la región de Caicara del Orinoco aflora en un área aproximada de 2000 Km². Rocas similares, han sido descritas en la región sur - central del estado Bolívar, en el área del río Suapure y en la región sur - Central del estado Amazonas.
Contactos	La unidad está en contacto intrusivo con los granitos de Santa Rosalia, Guaniamito y San Pedro. Se encuentra localmente en contacto de falla con el Granito de Parguaza.
Fósiles	No presenta.
Edad	Precámbrico. Se determinó una edad K/Ar en roca total de 1346 m.a. en ríolita cerca de la Paragua; Se determinó una edad isócrona de 1736 m a por Rb/Sr en roca total en el área del río Suapure y definieron una edad Rb/Sr en roca total de 1750
Correlación	Con las formaciones El Viejo y Carum. Correlaciona con la Formación Iwokrama y con la parte volcánica del Grupo Kuyuwini de Guyana, con la Formación Surumú de Brasil, con la Formación Dalbana y las volcánicas ríodacíticas del Grupo Tapajé de Surinam y con las rocas volcánicas de la Serie Paramaca de Guayana Francesa.
Paleoambientes	No se menciona en la descripción original.

Tabla 2.6. Descripción del Grupo Cuchivero (Tomado del LEV, 2010)

Grupo	Cuchivero
Localidad tipo	Rocas ígneas ácidas expuestas en la región noroccidental del estado Bolívar
Descripción litológica	Rocas ígneas ácidas, probablemente consanguíneas de un ciclo magmático único, en el cual incluyó rocas plutónicas, volcánicas y sedimentarias metamorfizadas; La Secuencia la describió compuesta de: a) rocas extrusivas: riolitas porfidicas, metaforizadas termalmente o por contacto con intrusiones ácidas posteriores; b) rocas intrusivas: pórfidos riolíticos y graníticos con textura de augeneis y granito hornbléndico y biotítico; y c) la Formación Cinaruco. (González de Juana et al. ,1980)
Espesor	No se menciona.
Extensión geográfica	Región Sur - Central del estado Bolívar.
Contactos	Unidad basal denominada "Metasedimentos", seguida por la Formación El Viejo, la Tonalita de Caño Roja y el Granito de Danto, además de unos diques denominados I, II, III, constituidos esencialmente por andesita; En la región del Alto Paragua, describieron a la Formación Caicara, a su Miembro Carum y al Granito de Caño Mari como integrantes del Grupo.
Fósiles	No presenta.
Edad	Precámbrico.
Correlación	<u>Santa Rosalia, Granito de Guaniamito, Granito de Caño Roja, Tonalita de Danto, Granito de Caño Mari, Granito de las Trincheras, Granito de Caicara, formación El Viejo y Formacion Carum.</u>
Paleoambientes	No se ha mencionado en ninguna de las descripciones.

Tabla 2.7. Descripción del Grupo Roraima (Tomado del LEV, 2010)

Grupo	Roraima
Localidad tipo	Cerro Roraima, en el extremo suroriental de Venezuela, en el área de la Gran Sabana del estado Bolívar, colindante con Brasil y Guyana.
Descripción litológica	Sedimentos casi horizontales y en posiciones normales son principalmente cuarzo arenitas con menores proporciones de areniscas feldespáticas, lutitas y tobas volcánicas silicificadas. En el área tipo cuatro formaciones han sido descritas (de base a tope): 1) Formación Uairén 2) Formación Cuquenán 3) Formación Uaimapui 4) Formación Mataui.
Espesor	1) Formación Uairén (850 m de espesor); 2) Formación Cuquenán (50-100 m); 3) Formación Uaimapue (250 m); 4) Formación Mataui (600 m).
Extensión geográfica	La montaña principal del Grupo Roraima está ubicada en la región Gran Sabana, Venezuela oriental, extendiéndose hacia Guyana centro occidental y la parte norte de Brasil, y cubre un área de 73000 Km².
Contactos	El Grupo Roraima suprayace discordantemente sobre diversos basamentos: el metamórfico del Grupo Pastora, y los metasedimentos y metavolcánicas del Grupo Cuchivero, y Formación Los Caribes en el estado Bolívar.
Fósiles	Identificaciones de polen y esporas fósiles de edad Cretácico-Mioceno, en las lutitas del Grupo Roraima.
Edad	Dentro del Grupo Roraima en Venezuela oriental, Brasil, Guyana y Suriname, oscilan entre 1700- 1800 m.a. Se ha establecido que se hace más joven de este a oeste. En realidad, dataciones sobre el basamento de Granito de Parguaza y su facies cogenéticas (entre 1350 a 1550 m.a.).
Correlación	La unidad se correlaciona con la secuencia Kaieteur (hoy Formación Roraima en Guyana) expuesta en la Sierra Pakaraima en Guyana y con la Formación Roraima reconocida en Suriname y formaciones Roraima y Urupi en Brasil.
Paleoambientes	La secuencia en el área tipo de origen fluvio-deltaico-lagunal, con influencia marino somero (tipo playa), hasta marino próximo costero y nerítico interno.

2.4 Aspectos Fisiográficos del área de estudio

2.4.1 Cuenca del río Apure

Oficialmente la extensión del estado Apure es de 76.500 Km² y ocupa el 8,3% del territorio nacional

Relieve

Las tierras apureñas presentan una altitud que oscila entre los 60 y los 200 m aproximadamente en la confluencia de los ríos Apure y Orinoco. Solamente, y aparte de los afloramientos rocosos cercanos a la rivera del Orinoco, existe en el extremo occidental del estado un sistema montañoso. Se trata de una porción muy limitada de la Cordillera Oriental Andina ubicada dentro del territorio estatal.

La topografía de las tierras llaneras apureñas no presenta accidentes geográficos que resalten a la vista, como consecuencia de las lluvias, amplias extensiones llaneras se cubren de agua, resaltan las elevaciones que reciben el nombre de bancos de arena. Los cauces de los ríos no modifican mayormente el relieve como en otros estados.

El desnivel de las tierras de Apure presenta una dirección única de oeste a este. La distancia en la línea recta, desde donde el río Uribante cruza la curva de nivel 200 m hasta la desembocadura del Apure al Orinoco (60m.) es de 575 Km, es decir un descenso de 26,9 m por cada 100 Km. El relieve apureño es parte de la gran Depresión Orinoquense, se halla limitado al sur por la gradería llanera que pertenece a Colombia. El cauce del Meta recorre esta gradería por el norte, actuado de límite entre los llanos venezolanos y los colombianos (*Tomado de Vila, 1950*).

Clima

El reducido sector montañoso del occidente del estado es la única parte de Apure donde se presentan pisos térmicos por encima del tropical o tierra caliente. Las

tierras de Apure se encuentran en casi su totalidad comprendidas dentro del piso
térmico tropical. (Figura 2.11).

Durante todo el año los vientos dominantes de los llanos de Apure son los
procedentes del Este y secundariamente del Noreste. Ello permite afirmar que el
conjunto de la Depresión Orinoquense constituye una zona de baja depresión con
referente al mar caribe y el océano atlántico. Los vientos del este son el mismo del
noroeste producto de una declinación de la ruta desde que penetran en la depresión
Orinoquense, debido a la influencia de los vientos alisios del Sureste delante de las
costas deltaicas, procedentes de la Depresión Amazónica y del Macizo Guayanés.

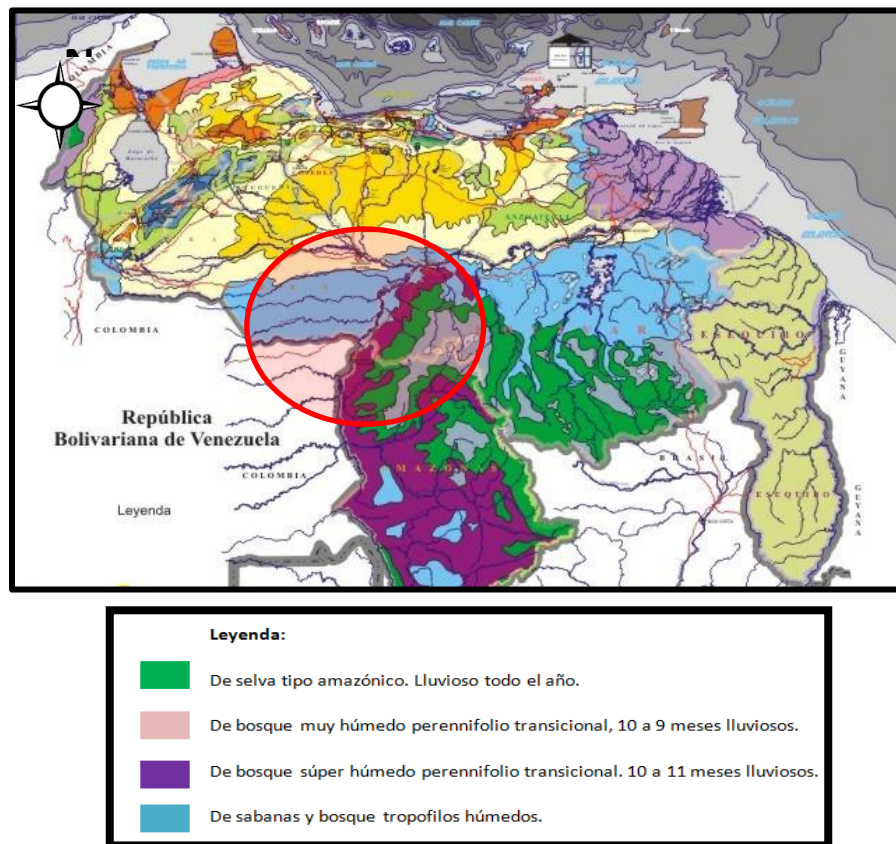


Figura 2.11. Mapa de pisos térmicos de Venezuela (Tomado y modificado de
www.venemia.com)

Durante el mes de abril a mediados de septiembre, es cuando la presión atmosférica media permanece constante por encima de los 756mm, alcanzando en el mes de julio su máxima de 765.9 mm.

Es extremas en los meses de junio y julio se registran los máximos en las bajas de temperaturas de 28,7 grados debido a la alta pluviosidad y las máximas extremas alcanzan las 40,2 grados en febrero y de marzo a abril 39,4.

Tabla2.8. Características fisiográficas de la cuenca de Apure. (Tomado de Vila, 1950)

Localidad	Municipio	Región	Altura s/nivel del mar	Piso térmico	Temperatura media	Precipitación anual media en mm
Bruzual	Bruzual	Llanos Altos	104 m	Tropical	27	1.493
El Amparo	El Amparo	Llanos Altos	135 m	Tropical	27	1.755
Puerto Paez	Codazzi	Llanos Bajos	80 m	Tropical	27,5	1.800
San Fernando	San Fernando	Llanos Bajos	73 m	Tropical	27,5	1,415

Hidrografía

La red hidrográfica del estado Apure está dominada por dos factores principales: El escaso nivel de suelo y las altas precipitaciones en las hoyas superiores de los ríos que lo recorren. No menos del 60 % de las tierras apureñas se inundan en épocas de lluvias que comienzan en abril hasta noviembre y de diciembre a marzo se desarrolla la época de sequía.

La fachada oriental del estado Apure mira al Orinoco, la longitud del Orinoco entre el Meta y el Apure de unos 240 Km. El Orinoco separa dos regiones naturales totalmente diferentes al oeste los Llanos Bajos y al este el Macizo Guayanés

En cuanto al río Meta es el segundo río de Venezuela por su caudal, sirve de frontera de nuestro país y Colombia desde la Islas Culebra hasta la Desembocadura del río Orinoco, el meta nace en la vecina República de Colombia y es navegable todo el año por embarcaciones.

2.4.2 Cuenca del Amazonas

El estado Amazonas se halla en el extremo suroeste de Venezuela. Limitado por el oeste con la República de Colombia; por el sur con Brasil; por el este con Brasil y el estado Bolívar y por el norte con el estado Bolívar. Oficialmente (Vila, 1950) la superficie total del Territorio es de 175.750 Km². El relieve del territorio está sometido al sistema orográfico del Escudo de Guayana. Las formaciones de rocas duras de esta formación geológica integran las elevaciones del territorio.

Las elevaciones del territorio colaboran con la condensación del vapor de agua atmosférico y constituye un factor importante en las altas precipitaciones. El alto volumen de lluvia ha moldeado el alto relieve en forma de cúpula haciendo desaparecer los picos agudos y las filas en aristas.

La dureza de las rocas y su estructura ha impedido la formación de laderas suaves por lo cual son tan verticales que impiden la formación de vegetación, en el pie de monte se ha acumulado material disgregado desarrollándose la vegetación arbórea (*Tomado de Vila, 1950*).

Clima

Solo existen datos climáticos aunque no completos de Puerto Ayacucho y San Carlos. En Puerto Ayacucho las temperaturas oscilan entre 39,4 grados máxima y

mínima 20,8 grados y en San Carlos la temperatura alta es de 26,6 grados en las zonas más selvosas.

Tabla 2.9. Características fisiográficas del estado Amazonas (tomado de Vila, 1950).

Municipio	Piso Térmico	Temperatura	Precipitación anual media en mm
Puerto Ayacucho	Tropical	34	2371
San Carlos	Tropical	26.6	3633

Hidrografía

En el Territorio existen dos cuencas: La del río Orinoco y la del río Guainía-Negro, esta última subsidiaria de la cuenca del río Amazonas. Ambas cuencas están relacionadas por el Brazo del Casiquiare que lleva parte del agua del Orinoco al río Negro, afluente del Amazona. La totalidad de las aguas del territorio son vertidas al Océano Atlántico.

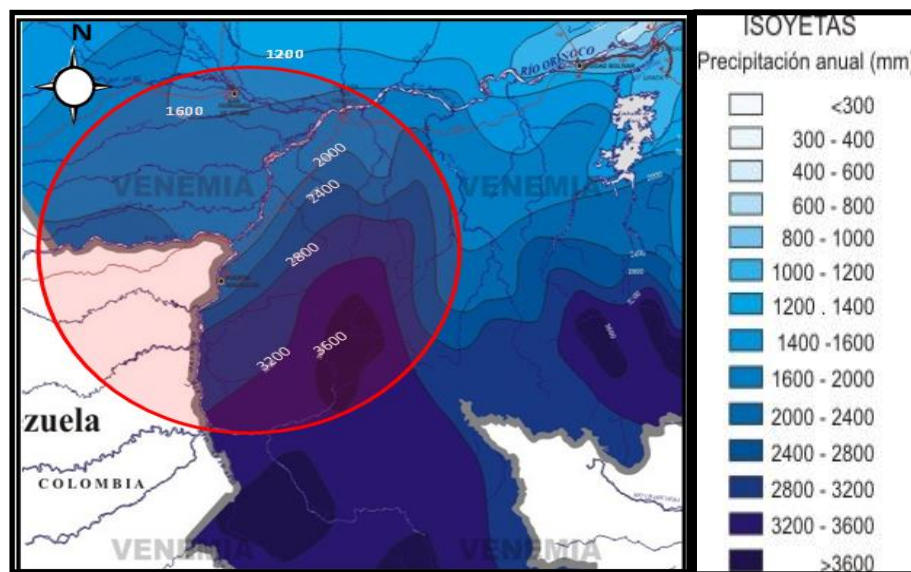


Figura 2.12. Tipos climáticos de Venezuela según Thornthwaite (Tomado y modificado de www.venemia.com)

CAPITULO III

3. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

A continuación, en el siguiente capítulo se presentarán los fundamentos teóricos que soportan la presente investigación, aquí se proporcionarán las definiciones y conceptos necesarios que soportan conceptualmente este trabajo. Adicionalmente, se presentará el marco metodológico, con cada una de las fases realizadas con la finalidad de cumplir los objetivos del presente Trabajo Especial de Grado.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Geomorfología tradicional: Es la rama de la geología que describe y explica las formas del relieve terrestre actual, tomando en cuenta el estudio de su evolución. En su concepción moderna la geomorfología es al mismo tiempo descriptiva (Morfología, Fisiografía, Morfometría, etc.) explicativa y dinámica de las formas. Por lo general se habla de geomorfología dinámica (Tricart, 1978).

3.2.3 Geomorfología cuantitativa: En los primeros pasos de la geomorfología como ciencia solo se enfocaba en el aspecto visual de los efectos que ocurrían en la superficie terrestre, hoy en día se han desarrollado mecanismos y técnicas cuantitativas las cuales tienen como objetivo fundamental encontrar expresiones matemáticas que faciliten entender los procesos naturales que dan origen a las geoformas existentes en el paisaje (Mayer, 1990).

3.2.4 Análisis visual de formas granos mediante un software especializado: Se basa en el uso del programa *Scion Image* que permite el procesamiento y análisis de imágenes por medio de computadora (Collins, 2007).

3.2.5 Image J: Es un programa para 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, ángulos y calibraciones entre imágenes para obtener datos reales y medidas de longitud (Ferreira y Rasband, 2007).

3.2.6 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 resultante luego de haber sido pasado por la batea y el número de veces por muestra. (Fernández y Gutiérrez, 1965).

3.3 IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE LOS MINERALES PESADOS

La definición de minerales pesados es netamente operacional, basada en la densidad del líquido empleado, tal es el caso del Bromoformo, siendo este un líquido de alta gravedad específica. Así se ha logrado definir a los minerales pesados como aquellos minerales detríticos que poseen una gravedad específica superior a 2,96 grs/cm³ (Densidad del Bromoformo) y constituyendo por lo general, una fracción minoritaria o accesorio en la roca (Carver, 1971).

Los minerales pesados se han utilizado para determinar áreas fuentes y trayectorias de transporte de sedimentos. La clave del uso de los minerales pesados como trazadores naturales reside, tanto en su comportamiento hidrodinámico, debido a su densidad, como a en su potencial de preservación, dada su resistencia a la meteorización (Pettijohn, 1975). En la Tabla 3.1, se presentan algunos ejemplos de los minerales pesados y sus propiedades resaltantes.

Tabla 3.1. Algunos minerales pesados y sus características Tomado de (Hurlbut, 1991)

Mineral	Brillo	Densidad (g/cm ³)	Estabilidad	Roca Fuente
Rutilo	Adamantino	4,3	Ultraestable	Granito, Sienitas, anfibolitas y Eclogitas
Circón	Adamantino	4,6	Ultraestable	Granitos, granodioritas, sienitas y monzonitas.
Apatito	Vítreo	3,1	Estable	Pegmatitas y filones de origen hidrotermal.
Granate	Vítreo-Resinoso	3,6	Estable	Genis, kimberlitas, pegmatitas, granitos, peridotitas y serpentinitas
Biotita	Submetálico-Metálico	5,1	Estable	Granitos y granitoides en general.
Esfena	Resinoso	3,5	Moderada	Granitos, gneises, anfibolitas.
Olivino	Vítreo	3,8	Muy Inestable	Rocas intrusivas, maficas- ultramaficas
Casiterita	Adamantino	6,8	No definida	Granitos, pegmatitas, riolitas, filones, hidrotermales.
Cromita	Vítreo	4,6	No definida	Accesorios en peridotitas y rocas ígneas.
Hematita	Metálico	5,3	Estable	Asociada a formaciones bandeadas de hierro, granitos, sienitas, riolitas y traquitas.
Ilmenita	Metálico	4,7	Estable	En gneises, gabros, Noritas, anortositas, accesorios en pegmatitas y sienitas.
Oro	Metálico	19,3	Estable	Nativo y filones hidrotermales
Magnetita	Metálico	5,2	Estable	Accesorios en dioritas y peridotitas.
Pirita	Metálico	5,0	Estable	Sulfuros y filones hidrotermales.

3.3.1 Descripción de algunos minerales pesados en la fracción (>2.96 grs/cm3)

Ilmenita

Es un óxido de hierro y titanio que cristaliza en el sistema hexagonal – trigonal, los cristales son normalmente tabulares, gruesos, con planos basales bien desarrollados y pequeñas truncaciones romboédricas. Normalmente los cristales son macizos y compactos; también se dan en forma de granos o en arenas. Básicamente la

composición de la ilmenita (FeTiO_3) es $\text{Fe} = 36,8\%$, $\text{Ti} = 31,6\%$, $\text{O} = 31,6\%$. Sillimanita.

En secciones delgadas, es incolora, por lo general, se encuentra en cristales prismáticos pequeños, con frecuencia diminutos y siempre delgados. Relieve moderadamente alto, birrefringencia moderada, así los colores de interferencia llegan hasta el azul de segundo orden. Algunas de las características especiales es que la silimanita se distingue de la andalucita por tener la birrefringencia más alta y el ángulo axial más pequeño. Los yacimientos de silimanita se encuentran en gneis, esquistos, pizarras y otras rocas metamórficas. Los asociados comunes son el corindón, andalucita, cianita y cordierita (Klein y Hurlbut, 1997).

Magnetita

La magnetita (Fe_3O_4) es un óxido de hierro que cristaliza en el sistema isométrico, generalmente se halla en forma de cristales de hábito octaédrico, en algunos casos maclados, es más raro en dodecaedros. Normalmente es maciza, granular o de grano fino. Es de dureza 6 y de peso específico $5,18 \text{ g/cm}^3$; de brillo metálico, color negro de hierro y deja huella negra, a menudo es fuertemente magnética, puede actuar como un imán natural. Su composición general es $\text{Fe} = 72,4\%$, $\text{O} = 27,6\%$.

La magnetita es una mena corriente de hierro. Se halla diseminada como mineral accesorio en muchas rocas ígneas, en ciertos tipos de segregación magmática es uno de los principales constituyentes de la roca y forma así grandes masas de mineral. Dichas masas son generalmente muy titaníferas. Corrientemente aparece asociada a rocas metamórficas y también a inmensas capas y lentes en rocas metamórficas antiguas. Es común de las formaciones bandeadas de hierro del Precámbrico de origen sedimentario – químico. Se encuentra en las arenas negras del mar, en hojas finas y crecimientos detríticos entre hojas de mica (Klein y Hurlbut, 1997).

Apatito

El apatito es un mineral con cristales hexagonales y dureza 5 en la escala de Mohs. Su composición química aproximada es $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$. El color es variable aunque predominan los cristales incoloros, parduzcos o verdosos, la tenacidad del apatito es frágil.

El apatito es un mineral frecuente como constituyente accesorio de todas las clases de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Se halla también en pegmatitas y filones, probablemente de origen hidrotermal. También aparece en las masas magnéticas titaníferas. Ocasionalmente se concentra en depósitos grandes o en filones asociados a rocas alcalinas (Klein y Hurlbut, 1997).

Circón

El circón es un mineral que pertenece al grupo de los silicatos, de la clase (nesosilicatos), según la clasificación de Strunz; es un silicato de circonio de fórmula química ZrSiO_4 , de color variable. Es el mineral conocido más antiguo de la Tierra y uno de los más abundantes en la corteza terrestre. Su origen es secundario como resultado de la oxidación de la galena, junto con cerusita, vanadinita y otros minerales.

La estructura del circón pertenece al sistema cristalino tetragonal. El color natural del circón varía entre incoloro y amarillo-dorado, rojo, marrón, azul y verde. Los cristales grandes de circón son raros, su tamaño medio en rocas de granito es de aproximadamente 0,1-0,3 mm, pero también puede crecer a tamaños de varios centímetros, especialmente en pegmatitas.

Debido a su contenido de uranio y torio, algunos circones podrían experimentar decaimiento radiactivo, el cual genera daño por radiación interna, tales procesos interrumpen parcialmente su estructura cristalina y en parte explican las propiedades altamente variables del circón.

El circón es un mineral accesorio corriente en toda clase de rocas ígneas. Es especialmente frecuente en las de tipo silíceo como granito, granodiorita, sienita, monzonita. Comúnmente, se encuentra en las calizas cristalinas, en gneis y esquistos.

Como es estable, aparece corrientemente como mineral accesorio en muchos sedimentos. Su característica en la fracción mineral pesada de las calizas se emplea a menudo para la valoración de su procedencia. Frecuentemente aparece en granos redondos de arenas de los ríos y de las playas; muchas veces, junto con oro (Klein y Hurlbut, 1997).

Rutilo

El rutilo tiene dureza 6, presenta brillo adamantino a sub-metálico y los colores van desde rojo, castaño rojizo a negro, normalmente sub-translúcido y hasta puede ser transparente. Su composición general es de Ti: 60%, O: 40%. El rutilo se halla en granitos, pegmatitas graníticas, gneis, esquistos micáceos, calizas metamórficas y dolomita. Como mineral accesorio, se halla en las rocas o en filones de cuarzo. Con frecuencia, aparece como cristales delgados en cuarzos y micas. Se encuentra en considerables cantidades en las arenas negras asociado a ilmenita, magnetita, circón y monacita (Klein y Hurlbut, 1997).

Esfena o Titanita

La titanita o esfena es un mineral del grupo de los silicatos, sub-grupo nesosilicatos, su composición es CaO: 28,6%, TiO₂: 40,8%, SiO₂: 30,6%, sistema cristalino Monoclínico. Puede presentarse en colores de verdoso o pardo, en ocasiones con otras coloraciones. Su brillo es diamantino a resinoso, de raya blanca, dureza de 5 a 5.5 y con una exfoliación clara. Su peso específico es de 3,45 a 3,56, se presenta en cristales monoclinicos, implantados o incluidos en forma de cuña o tabulares.

La esfena es un mineral accesorio bastante común en los granitos, granodioritas, dioritas, sienitas, sienitas nefelinicas. También es común en cristales de tamaño considerable incrustados en las rocas metamórficas, gneis, esquistos cloríticos y calizas cristalinas. Corrientemente se encuentra en menas de hierro, piroxeno, anfíbol, escapolita, circón, apatito, feldespato y cuarzo (Klein y Hurlbut, 1997).

Andalucita

La andalucita se presenta en cristales prismáticos de sección cuadrangular o en agregados radiales con colores que van desde el rosa pardo, siendo posibles las tonalidades grises, verdes y rojas. Puede ser opaca, translúcida o incluso transparente, en cuyo caso posee brillo vítreo y muestra un fuerte pleocroísmo (cambio de color en función del ángulo en que se mire), entre rosa y verde.

La andalucita se forma típicamente en las aureolas de contacto de intrusiones ígneas en rocas arcillosas. Allí coexiste comúnmente con la cordierita. Puede encontrarse en asociación con la cianita, silimanita, o con ambas a la vez, en terrenos metamórficos regionales. Estos yacimientos pueden reflejar variaciones de presión y temperatura durante el metamorfismo, así como la inactividad de las reacciones en el sistema Al_2SiO_5 (Klein y Hurlbut, 1997).

Sillimanita

Presenta una dureza de 6-7, con brillo vítreo y colores que pueden variar desde pardo, verde pálido hasta blanco, puede ser transparente a translucido, se caracteriza por los cristales delgados con solo una dirección de exfoliación.

La sillimanita se presenta como un constituyente de rocas arcillosas metamórficas de alta temperatura. En rocas metamórficas de contacto puede presentarse en el gneis de sillimanita- cordierita o en corneanas de sillimanita-biotita. En rocas regionalmente metamórficas se encuentra, por ejemplo, en esquistos de cuarzo-moscovita-biotita-oligoclasa-almandino-sillimanita. En rocas pobres en sílice puede encontrarse asociada al corindón (Klein y Hurlbut, 1997).

Topacio

Presenta dureza de 8 según la escala de Mohs, de brillo vítreo, sus colores pueden ser amarillo, rosado, amarillo de vino, rosa, azulado, verdoso, puede presentarse también incoloro. Puede ser transparente a translucido. Su composición es de Al_2O_3 : 56,6%, SiO_2 : 33,4%, H_2O : 10%.

El topacio es unos minerales formados por la acción de los vapores con flúor emanados en los últimos estados de la solidificación de las rocas ígneas. Se halla en cavidades de las lavas riolíticas y granitos; es un mineral característico de las vetas de pegmatita, especialmente de las que contienen estaño. Aparece asociado a turmalina, casiterita, apatito y fluorita. Se encuentra en algunos lugares como cantos rodados en las arenas de los ríos (Klein y Hurlbut, 1997).

3.3.2 Abundancia Relativa de los Minerales Pesados

Durante el ciclo sedimentario existen varios procesos que alteran la abundancia relativa de los minerales pesados, estos procesos ocurren durante la meteorización de la roca, así como también en el transcurso del transporte y depositación del sedimento. Las rocas que afloran en una determinada área o región están expuestas a procesos de meteorización que puede alterar la composición de los minerales pesados, antes de que estos sean incorporados a los sistemas de transporte. Esto es debido a la estabilidad relativa de muchos de estos minerales frente a los procesos de meteorización de acuerdo a esto, en el sedimento habrá un enriquecimiento de los minerales más estables como es el caso del cuarzo y una baja concentración o ausencia de minerales inestables como el olivino y los anfíboles. De igual forma en el transporte los minerales están sujetos a una serie de procesos de desgaste donde la abrasión parece ser el factor más importante, afectando así, la abundancia relativa de aquellos minerales con diferente estabilidad mecánica. Así, los granos de minerales que presentan un buen clivaje y que además tienen una dureza baja tienden a desintegrarse más rápido que los de habito prismático y los de mayor dureza (Morton y otros, 1994).

3.3.2.1 Los factores que alteran la abundancia de los minerales pesados

Los factores más importantes que afectan la abundancia de los minerales pesados son los hidráulicos y la estabilidad química de los mismos. Adicionalmente, se consideran factores como la concentración del mineral en la roca fuente, condiciones climáticas y morfológicas del área fuente, abrasión y destrucción

mecánica durante el transporte y procesos diagenéticos; aunque los efectos de estos factores no han sido bien evaluados, en forma aislada o en combinación, pueden modificar la asociación original de los minerales pesados (Morton y otros, 1994).

-Efecto Hidráulico

El efecto hidráulico opera durante el transporte y está controlado por las condiciones del régimen de flujo presente. El escogimiento de los minerales pesados por efecto hidráulico depende de su forma, tamaño y densidad. La forma controla la abundancia relativa con diferentes hábitos, ya que los minerales de hábito prismático se comportan diferentes a los de hábito hojoso. Así, los minerales que presentan hábito hojoso presentan un comportamiento hidráulico similar a los minerales de menor densidad. Este comportamiento es evidenciado en las micas, las partículas de micas, tamaño arena, siendo más densas que el cuarzo, son equivalente hidráulico de los granos de cuarzo tamaño limo (Morton y otros., 1999).

-Estabilidad química de los minerales

Se puede indicar como cambio de magnitud variable en los minerales, pero destaca, que estos cambios son el resultado de unos procesos que se generan por la interacción entre los minerales y los agentes de la meteorización (Agua, CO₂, O₂, H⁺, entre otros). La cantidad, naturaleza del agente y el tiempo de interacción de este con el mineral, están controlados, por los que se denominan factores de intensidad, a la vez que las características propias del mineral, que determinan su vulnerabilidad o alterabilidad, constituye los factores de capacidad (Gonzáles y otros, 2004).

El proceso de transporte involucra la meteorización, que genera una alteración química del material original. La incidencia de este factor sobre la abundancia relativa de los minerales pesados en los sedimentos, depende del tiempo que tardan estos en ser transportados. 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 están presentes

en la roca fuente. Caso contrario, si los sedimentos son transportados después que la meteorización afecte considerablemente la estabilidad química de los minerales pesados, la relación entre estos serán diferentes a los presentes en la roca que les dio origen (Morton y otros, 1994).

-Concentración del mineral en la roca fuente y sedimentos.

Dependiendo de la concentración de minerales pesados en la roca fuente éstos pueden alcanzar generalmente hasta un 2% y existirá una mayor o menor disponibilidad de estos en los sedimentos, esto dependerá de los procesos de meteorización que actúen sobre la roca fuente y el transporte el cual es el encargado finalmente de llevarlos hasta las cuencas donde se encuentran diseminados entre los sedimentos en cantidades muy pequeñas, generalmente menores al 1% (Morton, 1999).

-Condiciones climáticas y morfológicas del área fuente

Estos factores son de gran impacto en la preselección de los granos minerales durante la meteorización de la roca fuente, controlando el aporte de las especies de minerales pesados en los sistemas sedimentarios. Las condiciones climáticas extremas como altas precipitaciones, fuertes vientos pueden acelerar el desgaste mecánico de muchos de los minerales, al mismo tiempo las condiciones del terreno como fuertes pendientes pueden incrementar la capacidad de transporte de minerales pesados en los caudales de los ríos, esto debido a que a mayor pendiente mayor energía en el caudal (Morton y otros, 1999).

-Abrasión y destrucción mecánica durante el transporte

Este factor afecta la asociación de los minerales pesados una vez que son liberados de su roca fuente e incorporados al sistema de transporte. Este material experimenta una alteración física debida a la erosión, que se refleja principalmente en tamaño, la fracturación y redondez de los granos, aunque algunas especies pueden ser selectivamente destruidas durante el transporte y diagénesis, el remanente de estos

minerales son comúnmente los mejores, y algunas veces la única guía de proveniencia (Carver, 1971).

-Procesos diagenéticos

Los efectos de disolución afectan a los minerales pesados una vez han sido depositados, provocando la corrosión y descomposición química de los mismos, siendo estos indicadores de las condiciones de diagénesis, ya que los minerales cambian sus características originales al ser sometidos a estos procesos de disolución que puede ser causados por fluidos como las aguas meteóricas que percolan en el ambiente de depositación, o el agua expulsada de los poros de los sedimentos debido a la compactación de estos. Los minerales pesados responden al aumento de la temperatura de estos fluidos a medida que incrementa el soterramiento, disminuyendo su estabilidad química y generando así la pérdida parcial o total de dichos minerales (Morton y otros., 1999).

3.3.3 Minerales pesados en los estudios de prospección.

Mendoza (1993) y Herrera (2004), indican que las fracciones de minerales pesados presentan ventajas operacionales, destacando:

- Se localizan preconcentrados en algunas zonas del lecho del río, lo cual hace más fácil el muestreo.
- Presentan alta resistencia a la meteorización y erosión, lo cual permite detectar su presencia a grandes distancias aguas abajo.
- Forman parte de la litología asociada al área de muestreo, lo cual permite visualizar la abundancia natural de los elementos químicos presentes.
- El análisis de paleocorriente permite determinar las rutas de transporte de los sedimentos.
- La elaboración de mapas de dispersión de los sedimentos.

- La localización de depósitos de interés económicos.
- Indicar la acción de regímenes hidráulicos particulares y procesos de concentración.
- La elucidación de procesos diagenéticos.
- El hecho de que contengan U, Th, Sm y otros elementos radioactivos los hace bastante útiles a la hora de fecharlos por métodos de datación radiométrica.

3.3.4 Características texturales generales

3.3.4.1 La forma de los granos (Esfericidad)

Tiene más que ver con sus propiedades físicas que con el transporte que hayan sufrido. Los clastos procedentes de rocas metamórficas suelen ser alargados, mientras que granitos y mármoles suelen dar clastos más esféricos. La redondez de los clastos depende también del tipo de roca y de la intensidad con que haya sufrido los procesos de abrasión, aunque los clastos gruesos suelen adquirir la redondez más fácilmente que los finos.

3.3.4.2 Rasgos superficiales

Su origen físico es producto de los procesos de meteorización mecánica y erosión, y su forma nos demuestran los procesos que han sufrido (Figura 3.1). Los clastos de origen glacial suelen tener estrías, aunque también las pueden tener algunos clastos fluviales. Los de formas curvas se deben al impacto a alta velocidad de clastos transportados por ríos de gradientes altos. Algunos clastos presentan su superficie pulida, pues son capaces de difundir la luz dando la apariencia de un hielo. El transporte eólico es el principal causante de este rasgo generado por el impactos grano a grano a alta velocidad, durante las tormentas de arena, esto genera numerosas micro-fracturas en la superficie.

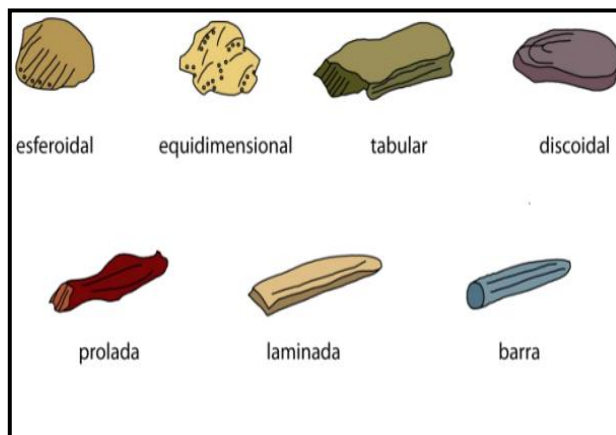


Figura 3.1. Forma de las partículas. (Tomado y modificado de Viana y Arcia, 2013)

Dependiendo de las formas de las partículas (Figura 3.1) se tiene que los clastos procedentes de los esquistos y pizarras tienen formas tabulares o de espada. Las rocas isotrópicas como la cuarcita, tienen forma equidimensionales, sub-esféricas y conforme una partícula es transportada alejándola desde la fuente, disminuye su tamaño y tiende a adquirir una forma equivalente.

En cuanto al significado de la forma de la partícula, la esfericidad va en función principalmente de la forma original del grano y esta puede modificarse por abrasión y fracturas durante el transporte, afectando así la velocidad con que es transportada la partícula, mientras que la redondez depende de la composición de la partícula, tamaño, tipo de proceso de transporte y distancia desde la cual fue transportada la partícula. Las partículas más duras como el circón se redondean menos que las partículas que presenten menor dureza como los feldespatos (Viana y Arcia, 2013).

3.5 EROSIÓN

3.5.1 Erosión Eólica

La erosión eólica: es el proceso por el cual el material superficial de los suelos es removido y transportado por el viento. Algunos investigadores consideran la abrasión producida por el impacto de las partículas removidas por el viento, como parte del proceso de erosión eólica. La acumulación del material removido puede ocurrir a distancias variables de la fuente de origen, dependiendo principalmente por la energía del viento y del tamaño de las partículas removidas.

3.5.1.1 Mecanismos de erosión por el viento

La erosión eólica, al igual que la erosión hídrica, involucra tres procesos: desprendimiento, transporte y depósito. El flujo de aire produce parte del desprendimiento de partículas pequeñas, cuando se incorporan partículas de suelo, su capacidad erosiva se incrementa significativamente. El impacto de esas partículas produce el desmoronamiento de los agregados del suelo, aumentando la disponibilidad de las partículas pequeñas, factibles de ser removidas por el viento, las cuales pueden ser transportadas mediante tres mecanismos diferentes: saltación, raptación y suspensión (Figura 3.2). El modo en que son transportadas las partículas dependerá de sus propiedades aerodinámicas (tamaño, forma y densidad) y de la capacidad de transporte del viento según su turbulencia, viscosidad y densidad.

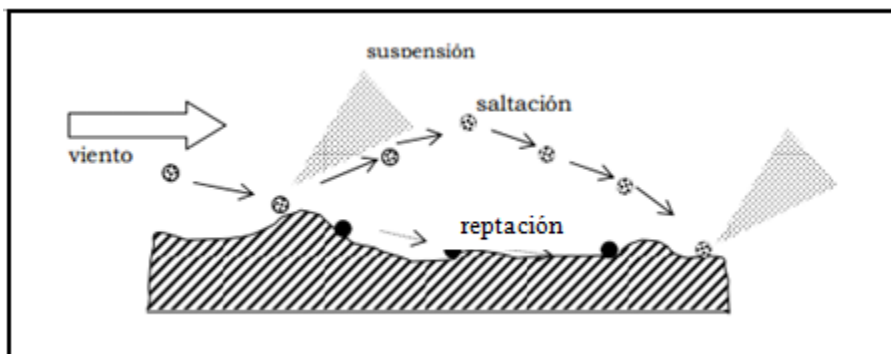


Figura 3.2. Mecanismos de erosión generados por el viento (Savat, 1982).

- **Saltación:** Es el proceso de transporte más importante. Las partículas que se mueven por saltación permanecen relativamente cerca de la superficie del suelo, generalmente a menos de 30 cm. El tamaño de partículas que se mueve por saltación varía de 0,05 a 0,50 mm (arenas muy finas a arenas medias). La velocidad crítica necesaria del viento para el desprendimiento de las partículas, varía con el tamaño de las mismas, siendo mínima (0,15 m/s), para las partículas de 0,10 a 0,15 mm y aumentando tanto las de mayor como para las de menor tamaño. La resistencia de las partículas de mayor tamaño resulta de su peso; las de menor tamaño deriva de su mayor cohesión y por la protección brindada por las partículas más grandes que la rodean. Según las condiciones del viento y el tipo de suelo, este proceso puede explicar entre el 50% y 90% del transporte de sedimento (Savat, 1982).

- **Reptación:** Proceso descrito como el rodado y deslizamientos de las partículas de mayor tamaño sobre la superficie del suelo, es favorecido por el impacto de las partículas que se desplazan por saltación, y puede representar el 15% y 25% de los sedimentos removidos de un área determinada. El tamaño de partículas transportadas por este proceso se encuentra entre los 0,5 y 2 mm (Savat, 1982).

- **Suspensión:** Es el proceso de transporte más visible y describe el movimiento de las partículas más pequeñas, generalmente $< 0,2$ mm de diámetro, a gran altura y distancias muy largas. Las partículas más pequeñas pueden permanecer suspendidas en el aire largos períodos de tiempo. La mayor expresión del proceso de suspensión

son las tormentas de polvo, las cuales pueden representar grandes pérdidas de suelo, aunque generalmente no superan el 15% de las pérdidas totales del suelo por erosión eólica (Savat, 1982).

3.5.2 Erosión Fluvial.

Según Tarbuck (2005), las corrientes fluviales son el agente erosivo más importante de la Tierra. No solamente tienen la capacidad de excavar sus cauces, sino que también pueden transportar enormes cantidades de sedimentos producidos por la meteorización. La meteorización produce cantidades tremendas de materiales que son liberadas a la corriente por la escorrentía, procesos gravitacionales y aguas subterráneas.

Las corrientes erosionan sus cauces de tres maneras: recogiendo los granos débilmente consolidados, mediante abrasión y por disolución. La última de ellas es menos significativa. Aunque se produce algo de erosión por la disolución del lecho de la roca soluble y de los derrubios del cauce, la mayoría del material disuelto en una corriente procede de los flujos de entrada del agua subterránea.

Cuando el flujo del agua es turbulento, el agua hace remolinos suficientemente fuertes para desalojar partículas del cauce y recogerlas en agua en movimiento. De esta manera, la fuerza del agua erosiona los materiales poco consolidados del lecho y los márgenes de la corriente. Cuanto más fuerte sea la corriente con mayor eficacia recogerá los granos. En algunos casos el agua es empujada a través de las grietas y planos de estratificación con la suficiente fuerza para recoger trozos de rocas del lecho del cauce.

3.5.2.1 Mecanismos de transporte fluvial

Las corrientes transportan su carga de sedimentos de tres maneras: en solución (carga disuelta), en suspensión (carga suspendida) y a lo largo del fondo del cauce (carga de fondo).

Carga Disuelta:

La mayor porción de la carga disuelta transportada por la mayoría de las corrientes es suministrada por el agua subterránea. Cuando el agua atraviesa el terreno, lo primero que adquiere son los componentes solubles del suelo. A medida que profundiza más a través de grietas y poros del lecho de roca subyacente, puede disolver mas materia mineral, por ultimo gran parte de esta agua rica en minerales llega a las corrientes fluviales.

La cantidad de material transportado en solución es muy variable y depende de factores como el clima y el contexto geológico. Normalmente, la carga disuelta se expresa como partes de material disuelto por partes de millón de agua (partes por millón, ó ppm; Tarbuck, 2005).

Carga Suspendida:

La mayoría de las corrientes transporta la mayor parte de su carga en suspensión. De hecho, la nube visible de sedimento suspendido en el agua es la porción mas obvia de la carga de una corriente. Normalmente, sólo los granos del tamaño de la arena fina, el limo y la arcilla pueden ser transportados de esta manera, pero durante la época de las inundaciones se transportan también partículas mayores y la cantidad total de material en suspensión aumenta de manera notable. El tipo y la cantidad de material transportado en suspensión están controlados por dos factores: la velocidad del agua y la velocidad de sedimentación de cada grano de sedimento.

La velocidad de sedimentación se define como la velocidad a la cual cae una partícula a través de un fluido inmóvil. Cuanto mayor sea la partícula, más rápida se dirigirá al lecho de la corriente. Además del tamaño, la forma y el peso específico de los granos influyen también en la velocidad de sedimentación. Los granos planos se

hunden en el agua más lentos que los esféricos, y los granos densos caen hacia el fondo más rápido que los granos menos densos. Cuanto más lenta se la velocidad de sedimentación y más fuerte la turbulencia, más tiempo permanecerá en suspensión una partícula de sedimento y más lejos será transportada corriente abajo por el flujo del agua (Tarbuck, 2005).

Carga de Fondo:

Una parte de la carga de material sólido de una corriente consiste en sedimentos demasiado grandes para ser transportados en suspensión. Estos granos más gruesos se mueven a lo largo del fondo de la corriente y constituyen la carga de fondo.

Los granos que constituyen la carga de fondo se mueven a lo largo del mismo mediante rodamiento, deslizamiento y saltación. El sedimento que se mueve por saltación parece saltar o brincar a lo largo del lecho de la corriente. Esto ocurre cuando los granos son expulsados hacia arriba por las colisiones o levantados por la corriente y luego son transportados río abajo hasta que la gravedad los empuja de nuevo hacia el lecho de la corriente. A diferencia de las cargas suspendidas o disueltas que están constantemente en movimiento, la carga de fondo está en movimiento sólo de manera intermitente, cuando la fuerza del agua es suficiente para mover los granos más grandes (Tarbuck, 2005).

Capacidad y competencia:

La aptitud de una corriente para transportar partículas sólidas suele describirse utilizando dos criterios. En primer lugar, la carga máxima de las partículas sólidas que una corriente puede transportar se denomina capacidad. Cuanto mayor es la capacidad de agua que fluye en una corriente (caudal), mayor es la capacidad de la

corriente para arrastrar el sedimento. En segundo lugar, la competencia de una corriente indica el tamaño de grano máximo que una corriente puede transportar. La velocidad de una corriente determina su competencia: cuanto más fuerte es el flujo más grandes son los granos que puede transportar en suspensión y como carga de fondo.

El aumento del caudal se traduce en una mayor capacidad, el aumento de la velocidad produce una mayor competencia. Con el aumento de la velocidad, el agua se vuelve más turbulenta y se ponen en movimiento partículas cada vez más grandes (Tarbuck, 2005).

3.6 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

A continuación se presentan los fundamentos teóricos que rigen la geomorfología cuantitativa, así como las ecuaciones utilizadas en este trabajo y la descripción de los parámetros y funciones empleadas en ArcGIS 10.0

El análisis digital del terreno (Wilson y Gallant, 2000) se basa en el cálculo de los atributos topográficos primarios y secundarios resumidos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem). Tomado de Moore et al (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 sub-superficial, 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

Tabla 3.2 (Cont.). Atributos Topográficos Primarios que pueden ser calculados por El Análisis de Terreno de los Datos (Dem). Tomado de Moore et al (1991).

ATRIBUTO	DEFINICIÓN	SIGNIFICADO
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
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

Tabla 3.3. Características Topográficas Secundarias que pueden ser calculados mediante el análisis digital del terreno a partir del modelo de elevación digital (MED) (Tomado de Moore et al, 1991).

ATRIBUTOS	DEFINICIÓN	Objetivo
INDICES DE HUMEDAD TOPOGRAFICA	$W = \ln\left(\frac{A_s}{r \tan \beta}\right)$	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.
	$W = \ln\left(\frac{A_e}{\tan \beta}\right)$	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 RÍO	$SPI = A_s \tan \beta$	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 deposición neta en áreas de perfil cóncavo (zonas de disminución de la velocidad de flujo)
	$LS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m \left(\frac{\sin \beta}{0.0896}\right)^n$	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)

Tabla 3.4. Parámetros ecuaciones y dimensión de las diversas variables objeto de estudio (Tomado y modificado de Flores 2013)

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	%
	Pendiente media del perfil longitudinal de la corriente principal	S_m	$S_m = (\sum \sqrt{S_{mi}} / m)^2$ $S_{mi}^{(1)} m^{(2)}$	%

Para realizar todos estos cálculos de todos los atributos tanto primarios como secundarios del terreno y también los cálculos hidrológicos se usará un programa de Sistema de Sistema de Información Geográfico (SIG), llamado SIG ArcGIS 10.

3.7 CÁLCULO DE ÍNDICES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS (ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO)

Los cálculos de índices primarios y secundarios del terreno fueron analizados a través de los índices de erosión, potencial total de la corriente (TSP), potencial de corte de la corriente (SSP), potencial de unidad de la corriente (USP), índice de transporte de sedimento (STI), índice de humedad (WI). Cada uno de éstos índices necesita que la pendiente sobre el Modelo de Elevación Digital (MED) sea calculada previamente

3.7.1 Pendiente

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente. La pendiente se mide calculando la tangente de la superficie, ésta a su vez se calcula dividiendo el cambio vertical en

altitud entre la distancia horizontal. Si se visualizara la superficie en sección transversal, se podría ver el triángulo rectángulo mostrado en la Figura 3.3.

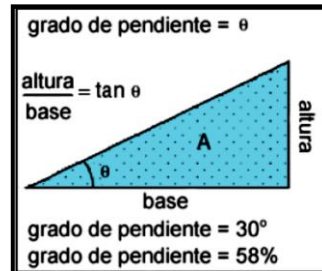


Figura 3.3. Cálculo de la pendiente.

3.7.2 Índice de transporte de sedimento (STI)

Esta herramienta puede ser usada para calcular el índice de transporte de sedimento descrito por Moore & Burch (1986), este índice es derivado de la teoría del potencial de unidad de la corriente y es usado a veces en lugares con factores de longitud de pendiente en la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) para longitudes de pendiente menores que 100 m y pendientes menores de 14°. El índice combina el área de contribución de la pendiente ascendente (A_s), bajo el supuesto de que el área que contribuye es la descarga directamente relacionada, y la pendiente (B)

$$STI = (m + 1) \times (A_s / 22.13) m \times \sin(B / 0.0896)n$$

3.7.3 Índice de humedad (WI).

Es utilizada para el cálculo de índice de humedad topográfico, comúnmente usado en el modelado del marco de precipitación-escorrentía. El índice describe la tendencia de un lugar a ser saturado debido al área de contribución y características de las pendientes locales.

$$WI = \ln(A_s / \tan(\text{Slope}))$$

3.7.4 Índices de erosión

De acuerdo con Bermúdez y otros., (2012) los índices de erosión pueden ser calculados de diversas formas como una función del poder erosivo del afluente o tributario, el cual se define como la tasa de gasto de energía potencial por corrientes de agua y se ha utilizado ampliamente en los estudios de erosión, transporte de sedimentos, y en geomorfología como una medida de la fuerza erosiva de los ríos y arroyos (Wilson y Gallant, 2000). El análisis se basa en una predicción de la tasa de incisión en el lecho de roca como una función de la potencia de la corriente (Finlayson, Tucker y Whipple, 2002).

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

Donde $\dot{e}$ es la tasas de incisión local, A_s es el área de drenaje aguas arriba (usada como una aproximación para la descarga), S es la pendiente local, m , n y k son constantes. El parámetro k está relacionado a la litología.

Con el propósito de incorporar las variaciones espaciales en la tasa de precipitación P y estudiar su influencia sobre el índice de erosión se realiza la siguiente modificación a la fórmula anterior, así quedaría:

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

Donde A_p es el área de cada píxel y el símbolo de sumatoria implica que se ha tomado la suma de las precipitaciones sobre cada píxel dentro de la cuenca y es agregado la variable precipitación (P) donde se tiene así el índice de erosión con precipitación $\dot{e}_p$ (Bermúdez y otros, 2012) .

Diferentes valores de m y n pueden ser usados en las ecuaciones anteriores dependiendo de la forma como son controladas las tasas de incisión de los ríos. Así se derivan las siguientes expresiones:

3.7.5 Poder de flujo total o (TSP)

Es el caso en el cual la tasa de incisión está controlada por el poder de flujo total o "total stream power (TSP)" $m=1, n=1$

$$TSP = A_s S$$

3.7.6 Poder de flujo unitario (USP)

La tasa de incisión está controlada por el ancho del canal, también se conoce como "stream power per unit channel width" (USP) $m=1/2, n=1$

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

3.7.7 Poder de flujo de cizalla (SSP)

Si la incisión es controlada por el esfuerzo de cizalla fluvial o "fluvial shear stress (SSP)"

Así se obtiene: $m=1/3, n=2/3$

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

Las ecuaciones anteriores miden 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. También predicen la erosión total 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).

3.7.8 Cálculo del relieve

El relieve es calculado según Bermúdez y otros. (2012) como la diferencia entre dos rásters (malla o matriz de píxeles), el proporcionado por la máxima elevación dentro de un radio variable (1, 3 y 5 km) y el ráster proporcionado por el modelo de elevación digital del área de estudio. Así:

$$R = H_r - h$$

Donde H_r es el ráster obtenido de considerar la máxima elevación en un radio r , y h es el ráster de elevaciones dato por el MED.

3.8 METODOLOGÍA

3.8.1 INTRODUCCIÓN

A continuación es presentada la metodología empleada en la ejecución de este trabajo de investigación, dicha metodología constó de 4 etapas: pre campo, trabajo de campo, laboratorio y oficina.

3.8.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.8.2.1 Fase Pre-campo

- Recopilación bibliográfica, hemerográfica: Libros, tesis, artículos, informes técnicos, etc.
- Recopilación cartográfica: Mapas geológicos, Mapas topográficos, Mapas hidrográficos, imágenes satelitales y de radar.
- Elaboración de mapa y planificación del campo (vías de acceso, afloramientos, etc.). Señalando las estructuras, el drenaje haciendo la división por cuencas, unidades y vías de acceso a la zona, para acceder a los ríos.

3.8.2.2 Fase de Campo

- Se recolectaron 4 muestras: 3 de sedimentos recientes de los ríos antes mencionados y 1 muestra de las dunas de Santos Luzardo, se tomó la ubicación de cada una de las muestras a través del GPS. Para cada muestra, dos fracciones fueron consideradas: una de 100 gramos resultado de una concentración in-situ mediante batea y otra fracción de 10 kilogramos de muestra sin concentrar. La fracción de 100 gramos fue refinada para su posterior datación por el método de trazas de fisión en apatitos y circones.
- La técnica de muestreo consistió en tomar sedimentos en bancos de arenas dentro del cauce del río, lo cual se realizó con una pala. Igualmente la muestra

proveniente de la erosión eólica (Santos Luzardo) se seleccionó en el pie de la duna.

3.8.2.3 Fase de laboratorio y oficina

- Con la ubicación de las muestras en GPS se pasaron al mapa geológico estructural (Hackley y otros, 2005), y se procedió a calcular el área que delimita el punto de captura de la muestra, para posteriormente hacer los cálculos de tasas de erosión y medidas geomorfológicas cuantitativas, mediante el programa *ArcGIS 10.0*.
- Se analizaron las propiedades del terreno mediante geomorfología cuantitativa, utilizando *Matlab* y otros códigos desarrollados en *ForTran* (Bermúdez y otros, 2012).
- Se determinaron los índices topográficos primarios y secundarios del terreno para integrarlos a una base de datos.
- Se separaron los minerales pesados en el Laboratorio de Termocronología de la UCV
- Se dedujo la proveniencia de los granos, mediante el análisis de forma, redondez, esfericidad sobre los minerales pesados pertenecientes a sedimentos detríticos de los ríos Meta, Parguaza y Cataniapo.
- Los minerales pesados fueron analizados según su redondez, esfericidad y forma con la ayuda de un microscopio petrográfico, en el laboratorio se utilizó un programa de análisis de imágenes, *Image J* para medir el área, media, centroide, perímetro, etc. Esto permitió hacer un análisis de partículas y medidas de longitudes de las trayectorias y ángulos.

3.9 DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES TÉCNICAS A UTILIZAR

3.9.1 Fase Campo

3.9.1.1 Toma de muestras de sedimentos pesados

Consistió 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.



Figura 3.4. Toma de muestra con batea in-situ (Tomado de Arcia y Viana, 2014).

3.9.1.2 Fase de Laboratorio

En la mayoría de las areniscas hay pequeñas cantidades de minerales accesorios y estos son componentes que aparecen en proporciones menores del 1%. Suelen ser silicatos y óxidos resistentes a la meteorización química y abrasión mecánica. Los minerales pesados pueden dividirse convencionalmente en tres grupos: ligeros hasta $3,0 \text{ gr/cm}^3$, medios de $3,0$ a $4,0 \text{ gr/cm}^3$ y pesados más de $4,0 \text{ gr/cm}^3$ (Milosvski y otros., 1982). Estos minerales pesados pueden ser opacos (ilmenita, magnetita, etc.) o no opacos (apatito, circón, etc; Boggs, 2009). Su peso específico

suele ser superior a 2,9, más alto que el del cuarzo y feldespatos (2,6) por eso para separarlos del resto del sedimento y analizarlos se utilizan líquidos densos.

3.9.1.3 Tamizado de las muestras

En un equipo con estructura cilíndrica con aros en la parte superior para soportar las mallas y cuenta con movimientos vibratorios que facilitan el tamizado, como se observa en la (Figura 3.5a, b) en el cual se separaron los diferentes tamaños de grano y se agruparon los sedimentos no consolidados. Se utilizaron los tamices de malla No. 60 (granos mayores a 0,25 mm) y No. 200 (granos menores 0,074 mm) de lo cual se obtuvo una porción de sedimento pasante de la malla 60 y retenido de la malla 200, este último objeto de nuestro estudio.

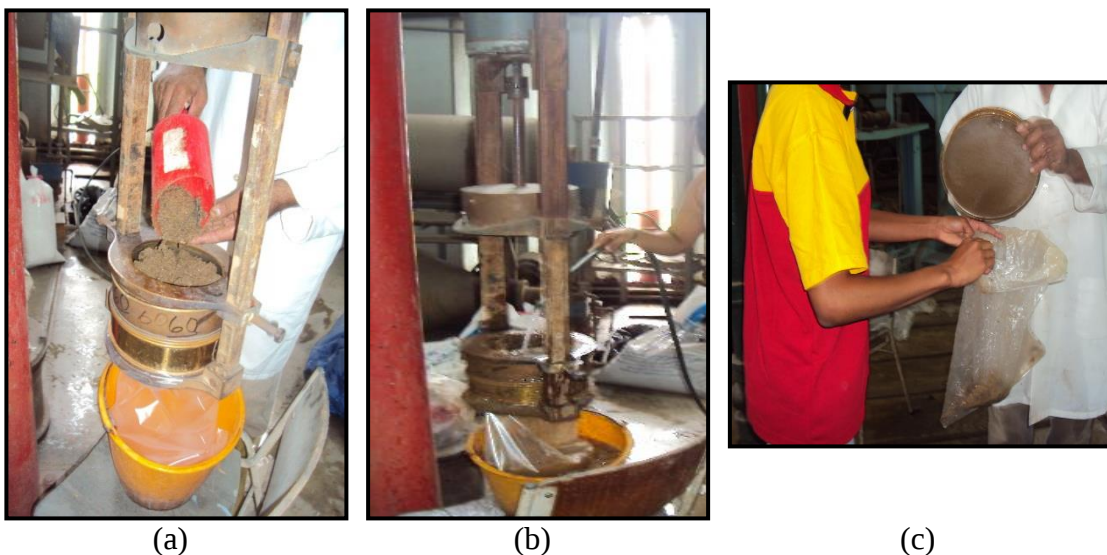


Figura 3.5. Colocación de la muestra en la tamizadora (a). Se le agrega agua a la muestra con una manguera (b). Se guarda e identifica el material que queda en el tamiz 200 (c).

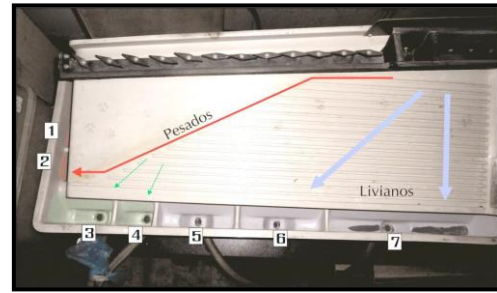
3.9.1.4 Separación de los minerales pesados por sistema hidrogravimétrico

Este método permitió la separación de minerales pesados de los livianos, utilizando la Mesa de Wilfley, que 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 cíclico horizontal paralelo al flujo de agua y un movimiento brusco contrario al flujo del agua, lo que

provoca que los minerales más pesados se separen del resto. La muestra se vierte en la mesa por medio de un alimentador de vibración variable que la dosifica. Esta, al caer en el flujo de agua, separa los minerales más ligeros, los cuales describen una trayectoria perpendicular al eje mayor de la mesa. Los minerales con densidades intermedias, al golpear la mesa, flotan siguiendo una trayectoria oblicua y muy cercana a los rizos longitudinales de la mesa. Los minerales pesados no flotan y solo se arrastran con el movimiento de la mesa en dirección del flujo de agua, siguiendo una trayectoria casi paralela al eje mayor de la mesa. Al final se obtuvo un concentrado de minerales pesados que se depositaron de acuerdo a su densidad en las bandejas 1 y 2 que son las de mayor concentración de pesados, las bandejas 3, 4 son de mediana concentración y en las bandejas 5, 6 y 7 se recolectaron los minerales livianos. Cada una de las fracciones obtenidas se vertió en bolsas de cierre hermético que fueron tituladas con la identificación de la muestra.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.6. Mesa Wiffley utilizada en la separación de minerales pesados (a, b). Los minerales pesados recorren diagonalmente la mesa y no saltan las separaciones (c). Los minerales se alojan en diferentes envases según se densidad (d).

3.9.1.5 Secado de la muestra

Figura 3.7, se tomaron las muestras 1 y 2 y se colocan en bandejas de aluminio o vidrio bajo lámparas hasta que estén completamente secas las muestras.

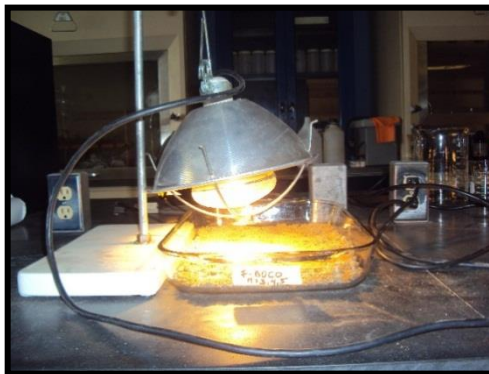


Figura 3.7. Lámpara de secado

3.9.1.6 Separación Magnética Manual

Con un imán se separaron los minerales magnéticos del resto de los minerales (generalmente Magnetita y Pirrotita). El proceso consistió en pasar un imán común por encima de la muestra esparcida en una hoja de papel, luego de pasar repetidas veces el imán, hasta que no se adhirió a este más minerales pesados, se repitió el proceso hasta que se terminó toda la muestra, la fracción obtenida se colocó aparte en bolsas con su respectiva identificación, para su posterior uso. En la Figura 3.8 se observa cómo se llevó a cabo la separación de los minerales magnéticos aplicando el imán. Luego de haber sido separados los minerales magnéticos manualmente, la fracción es guardada para estudios posteriores y las muestras no magnéticas se toman para ser procesadas por el Magnet Lift.



Figura 3.8. Separación manual de la magnetita y pirrotita con un imán.

3.9.1.7 Separación magnética por el Magnet Lift

Procedimiento:

Las muestras recolectadas de la Mesa Wilfley en las bandejas 1 y 2 de los Ríos Orinoco, Parguaza, Meta, Cataniapo y la duna Santos Luzardos son las que se toman para ser procesadas mediante el Magnet-lift (Figura 3.9), con el fin de ir separando los minerales desde los 0,3 amperios hasta 1,2 amperios.

Pasos para trabajar con el separador:

- 1- Se enciende la máquina (Start) y todas las perillas deben estar en cero (0), el Roll Speed control se coloca en 30.
- 2- Vibrator control se coloca en 20 ó 30.
- 3- El Magnet Coil Current primero se coloca a 0,3, 0,5, 0,7, 0,9, y 1,2 amperios y en cada paso por el equipo se van separando los magnéticos y se guardan en diferentes tubos de vidrios cilíndricos identificados con el nombre de la muestra y el amperaje utilizado, el material que se aloja en la bandeja de no magnéticos luego de haber sido pasado por el amperaje de 1,2 es el utilizado para la separación por medio de líquidos densos (Bromoformo).
- 4- Para apagar se realiza de atrás hacia adelante se lleva a cero (0) con la perilla de Magnet Coil Current y se apaga (Off).
- 5- Luego se lleva a cero el Vibrator Control y se apaga (Off).

6- Después se lleva a cero el Roll Speed Control y se paga (Off).



Figura 3.9. Separador magnético Lift Magnet.

3.9.1.8 Separación de minerales pesados mediante Bromoformo

Considerando parte de lo propuesto en las técnicas de identificación de Rubio (1952), Codecido (1969), para la separación de minerales pesados en muestras de areniscas, con el uso del líquido denso Bromoformo (CHBr_3) (Figura 3.10c).

Primero que nada es importante seguir cada medida de seguridad que aquí se hace referencia:

- Protección respiratoria: Se utiliza máscara o mascarilla.
- Protección de manos: Se utilizan guantes protectores.
- Cubrimiento del cuerpo: Se utiliza bata de laboratorio para proteger la ropa.
- Instalaciones de seguridad: Campana con extractor de gases tóxicos.

Metodología de trabajo:

- En un embudo especial de separación de 250 ml, se colocó el líquido denso (Bromoformo) hasta la línea blanca (250 ml) (Figura 3.10b). El embudo se colocó en un soporte universal, luego se agregó la muestra y se agitó con una vara de vidrio, luego de unos minutos se comenzó la separación de los minerales más pesados (densidad $> 2,9$), que descienden dejando una separación marcada con los minerales $\leq 2,9$ de densidad (Figura 3.10c).

- Debajo se coloca otro embudo sencillo de vidrio con un papel filtro de pase rápido y porosidad gruesa, y un vaso precipitado de 500 ml. Después que se separan los pesados de los livianos, se abre la llave del embudo especial, se dejan pasar los minerales pesados al papel filtro y se recuperan en ese momento. Posteriormente, se cierra nuevamente la llave una vez que no hay pesados y se deja escurrir hasta poder recuperar el Bromoformo concentrado. Luego en otro vaso de precipitado con otro embudo sencillo de vidrio y otro filtro se deja salir los minerales livianos.
- Una vez terminado este proceso, se deja escurrir un poco y se devuelve el Bromoformo a otro embudo de separación para seguir trabajando con otras muestras, sino se regresa a su botella original. (El bromoformo no debe sacarse de la campana, de hacerlo se debe sacar tapado).
- Luego bajo la campana se coloca etanol para lavar la muestra en el embudo, se deja escurrir y se dejan en la campana secándose (Figura 3.10d).
- Se saca tapado de la campana el bromoformo que se destiló con el etanol al lavar las muestras para otra campana, donde se recuperará el bromoformo.
- Se coloca etanol en unas pipetas para lavar todo lo que haya tocado el bromoformo (embudo de separación, embudos sencillos, agitadores, vasos de precipitado, etc.) y se deja todo dentro de la campana hasta el día siguiente.



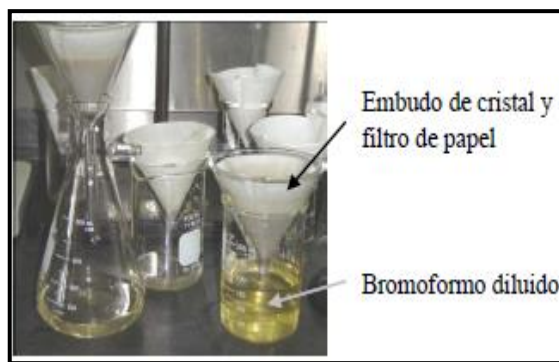
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.10. Bromoformo (a). Bata y guantes deben usarse para trabajar con este peligroso líquido (b). En el embudo los minerales pesados quedan en la parte de abajo y los livianos quedan flotando arriba (c). Un embudo y un filtro separan el Bromoformo que cae en un vaso precipitando los minerales pesados quedan en el filtro (d).

3.9.1.9 Recuperación del Bromoformo

El Bromoformo es un líquido sumamente costoso y difícil de conseguir por lo que es necesario recuperar una gran parte del mismo, debido a esto el líquido remanente diluido con alcohol que queda en los vasos precipitados producto de la separación de minerales pesados y livianos, es llevado a un embudo de separación de 1 litro lleno de agua destilada que se encuentra en otra campana con la finalidad de que estos reaccionen y la mezcla se torna blanca, luego que el agua y el alcohol se pongan transparentes y el Bromoformo se deposita en el fondo del embudo, posteriormente se recupera el líquido pesado dejándolo salir en un vaso de

precipitado y se regresa tapado a la campana donde está su envase para volver a utilizarlo, esto se hace con cada una de las muestras (Figura 3.11).



Figura 3.11. Separación de Bromoformo del alcohol en un embudo de separación

3.9.1.10 Separación magnética de minerales pesados usando el separador isodinámico Frantz

El separador está compuesto por un riel con dos canales, en uno de ellos, estarán los minerales no magnéticos o de menor susceptibilidad magnética, y en el otro, los minerales magnéticos o con mayor susceptibilidad magnética. (Ver 3.12b,c). Este riel se encuentra entre dos bobinas que generan un campo magnético variable controlado por un amperímetro. La muestra se introdujo 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 repitió varias veces cambiando el amperaje para cada fracción, con la finalidad de separar los minerales de acuerdo a susceptibilidad magnética.

Procedimiento para usar el separador Isodinámico Frantz:

- Antes de encender el equipo se realiza la limpieza de todo el sistema con un cepillo y alcohol, se lleva el inclinómetro del equipo a 5° de pendiente.
- Se enciende la vibración y los interruptores de la corriente.

- Luego se va agregando la muestra de pesados, después de la separación con el líquido pesado Bromoformo, en una gama de corriente desde 0,2 amperios hasta llegar a 1,0 amperio. Se almacenan en pequeños tubos de ensayos separadas e identificadas con el respectivo amperaje utilizado desde magnéticos de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0 y de último también se almacenan los no magnéticos de 1,0. Los minerales no magnéticos caen en el recipiente derecho y los magnéticos en el izquierdo.

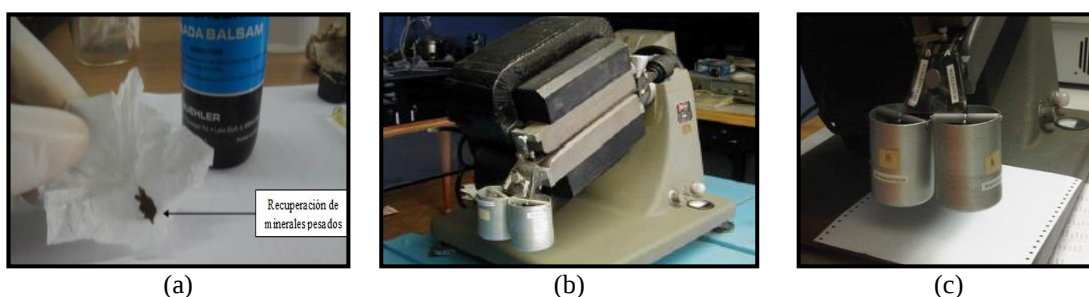


Figura 3.12. Recuperación de los minerales pesados que quedan en el filtro(a). Separador isodinámico Frantz (b). Vasos donde se depositan los minerales magnéticos y no magnéticos (c).

De acuerdo con lo obtenido en el separador Franz se logró separar los minerales en pesados magnéticos y pesados no magnéticos los cuales se encuentran clasificados en la Tabla 3.5 muestra cada los diferentes minerales pesados separados de acuerdo al amperaje utilizado en el equipo Frantz.

Tabla 3.5 Minerales pesados separados por el equipo isodinámico Frantz de acuerdo a amperaje y ángulos de inclinación (Tomado de Hess, 1959)

Ángulo de Inclinación 20°				Ángulo de Inclinación 5°	
A Imán de mano	B Magnéticos 0,4 Amps	C Magnéticos 0,8 Amps	D Magnéticos 1,2 Amps	E Magnéticos 1,2 Amps	F No Magnéticos 1,2 Amps
Magnetita Pirrotita	Ilmenita Granate Olivino Cromita Cloritoides	Hornblenda Hipersteno Augita Actinolita Estaurolita Epidoto Biotita Clorita Turmalina	Diopsido Tremolita Estantita Espinela Estaurolita Moscovita Zeosita Clinzoecita Turmalina	Leucoxeno Apatito Andalucita Monzonita Xenocita	Circón Rutilo Pirita Corindón Topacio Fluorita Silimanita Anidrita

3.9.1.1 0 Preparación de las secciones montadas

Consistió en esparcir de manera uniforme y sutil los minerales pesados magnéticos y no magnéticos obtenidos a través del separador Frantz a 1,2 amperios, en un área de aproximadamente 1 cm^2 sobre un porta muestra, aplicando previamente Bálsamo de Canadá, barniz o cualquier otra resina sobre el portaobjeto para adherir los minerales a este y poder estudiarlos mediante un microscopio petrográfico (Figura 3.13).

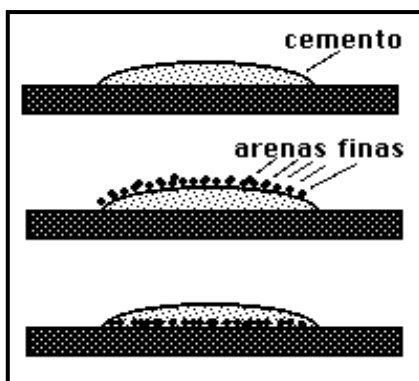


Figura 3.13. Explicación para la preparación de una sección montada (Tomado de: <http://edafologia.ugr.es>)

3.9.2 Fase de Oficina

3.9.2.1 Análisis visual de minerales pesados

Se utilizó un microscopio óptico petrográfico de luz polarizada, modelo OLYMPUS CX31 este viene dotado de una cámara OLYMPUS con la cual se tomaron las fotos procesadas con el programa Image J y además se emplearon imágenes obtenidas por el Microscopio Electrónico de Barrido Itachi S2400 del año 1992. Se analizaron entre 80 y 100 granos por cada muestra de sección montada y luego fueron comparadas grano a grano con la carta de índice de esfericidad y redondez (Krubein y Sloss, 1.963), donde se obtuvieron dichos parámetros para cada

uno de los granos de las muestras. Este mismo procedimiento se realizó, para las 10 muestras siendo un total de 1000 granos (Figura 3.14).



Figura 3.14. Grano evaluado visualmente y comparados con el modelo Krumbein y Sloss (1963), para determinar Redondez y Esfericidad pertenecen a la muestra del Rio Cataniapo Magnético.

La Redondez y la esfericidad han demostrado ser propiedades útiles de las partículas tamaño grava, al investigar el transporte y la deposición de las partículas sedimentarias y la relación entre estas dos propiedades (Figura 3.15).

La redondez se refiere a la agudeza de las esquinas y los bordes de un grano, fue definida por Wadell (1932) “Como la relación entre el radio medio de curvatura de las esquinas para el radio del mayor círculo inscrito”. Por mucho tiempo se ha utilizado el método común de estimación de redondez; que consiste en comparar visualmente granos de redondez desconocidos con imágenes estándar de granos de redondez conocido.

La esfericidad mide el grado en el que una partícula se aproxima a una forma esférica. Definida por Wadell (1932) “Como la relación entre el diámetro de una esfera con el mismo volumen que la partícula y el diámetro de la esfera circunscrita”. La esfericidad de una partícula se determina usualmente mediante la medición de las tres dimensiones lineales de la partícula (el más largo (L), intermedio (I) y diámetros más corta (S)).

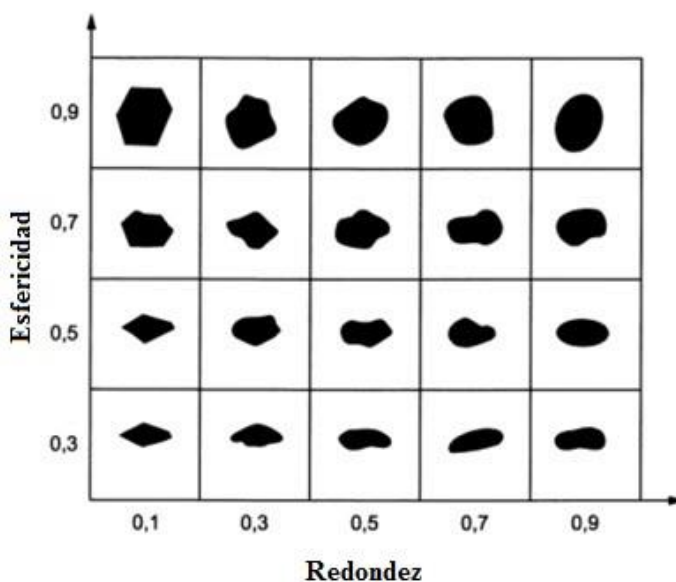


Figura 3.15. Carta de índice de esfericidad y redondez
(Tomada y modificada de Krumbein y Loss, 1963).

3.9.2.2 Análisis automatizado de imágenes

Este método se aplicó adicionalmente a un total de 1000 fotografías obtenidas por el microscopio petrográfico OLYMPUS CX31 a las secciones montadas tanto de minerales pesados magnético y no magnético los cuales fueron analizados grano a grano por medio del Software ImageJ.

Los análisis digitales tienen muchas aplicaciones en las geociencias, ya que permite generar datos cuantitativos con un margen de error reducido, en este sentido para el siguiente estudio se utilizó, el software ImageJ (Collins, 2007).

El análisis digital se define como un conjunto de técnicas destinadas a obtener datos relativos a un sistema objeto de estudio a partir de imágenes de dicho sistema. Los datos de interés suelen ser casi siempre numéricos.

Las imágenes observadas al microscopio deben adquirirse mediante una cámara fotográfica (Figura 3.16). La técnica de adquisición de imágenes al microscopio mediante cámaras fotográficas recibe el nombre de fotomicroscopía. Las cámaras fotográficas empleadas pueden ser ópticas o digitales. Para tomar imágenes de microscopía en formato digital es necesario disponer de un microscopio, una

cámara fotográfica (o de vídeo) digital, un computador y el software necesario para capturar y analizar las imágenes.

Los procesos de captura y análisis de una imagen digital se realizan por medio de softwares diferentes. En general, el software de captura se proporciona junto con la cámara mientras que el de análisis se adquiere aparte.

3.9.2.3 Análisis de imágenes petrográficas

Es una herramienta que permite procesar imágenes obtenidas a partir de escáner o microscopio mediante una cámara con la finalidad de cuantificar, caracterizar y describir rasgos petrográficos particulares (textura, mineralogía, fábrica, porosidad, permeabilidad, entre otros) (Figura 3.16).

El análisis de imágenes consiste simplemente en la captura de imágenes digitales y posteriormente el análisis de las propiedades de las mismas mediante software automatizado.

3.9.2.4 Equipos para el análisis de imágenes petrográficas

Los dispositivos utilizados en el análisis de imágenes petrográficas, pueden variar dependiendo de la elección del analista y el propósito del estudio, como por ejemplo, el equipo de Microscopia electrónica de barrido marca Itachi S-2400 y el microscopio óptico modelo CX31 marca Olympus con cámara digital incorporada. Además de estos dispositivos es necesario un computador equipado con el software para realizar el análisis de las imágenes.

Si las imágenes son capturadas por la cámara conectada al microscopio, el aumento, la intensidad y polaridad de la luz deben ser estandarizadas, de modo que todas las muestras sean comparables entre sí. Las imágenes deberán ser guardadas en cualquier extensión JPEG, TIFF, etc.

3.9.2.5 Microscopio Óptico

Este dispositivo tiene la ventaja de tener distintos campos de visión (10, 20, 40 y 60X) el cual hizo más fácil el reconocimiento de parámetros morfo-texturales y adicionalmente permitió la toma de imágenes que fue procesada por los métodos descritos a lo largo del manuscrito (Figura 3.16).

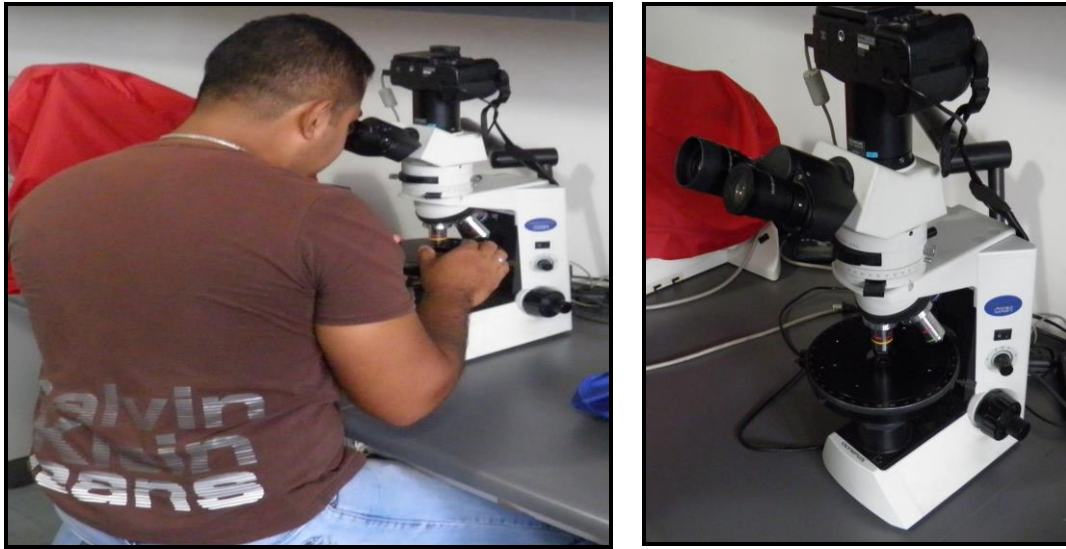


Figura 3.16 Microscopio Olympus CX31 utilizado para la toma de imágenes y el análisis morfo-estructural de los granos

3.9.2.6 Microscopio Electrónico de Barrido

El principio del sistema consiste en que si se hace incidir sobre la muestra un haz de electrones finamente enfocado, la misma emite una señal que puede registrarse en pantalla mediante un tubo de rayos catódicos. Los componentes principales del microscopio de barrido Hitachi S2400 (Figura 3.16) son los siguientes:

- **Fuente de energía:** del microscopio electrónico da barrido depende de varios factores, siendo los más importantes el voltaje de aceleración, la intensidad de la corriente y el diámetro de haz. En unos de los puntos el haz de electrones es desviado 1,2,3...n veces por los campos magnéticos controlados por el generador de barrido. Como consecuencia el haz es movido sobre la superficie de la muestra y la señal es detectada por el colector de electrones.

- **Portamuestra:** La muestra montada sobre un soporte puede moverse en tres direcciones, ser calentada, enfriada, estirada, etc. dentro del instrumento. Para el estudio de ciertos tipos de muestras como metales, minerales, semiconductores, etc., se requiere calefacción de la muestra. La calefacción puede conseguirse por medio de un hilo incandescente o calentando la muestra en un crisol aplicando directamente a la muestra corriente eléctrica.
- **Sistema de amplificación:** Este sistema recoge las señales y procesa la información procedente de la muestra, al mismo tiempo que el haz de electrones barre la muestra. El generador de barrido está conectado al tubo de Rayos catódicos (TRC) para que el haz de electrones en este tubo sea barrido en la misma forma que, el haz principal. Las muestras fueron evaluadas en Microscopio Electrónico de Barrido, empleando un voltaje de aceleración de 20 Kv, en los modos de observación de electrones retro dispersados (BSE) y/o secundarios, además de realizarse análisis químico puntual de partículas mediante espectroscopia de rayos x por dispersión de energía (EDS).



Figura 3.17. Microscopio Electrónico de Barrido Itachi S-2400 utilizado para el análisis químico de las muestras.

3.9.3 Preparación de la Muestra

La preparación de las muestras embutidas es un proceso muy importante., por dos razones: 1) facilitará el estudio de la misma bajo el microscopio, y 2) es necesario

para la posterior datación por las técnicas radiométricas. Así mismo, es importante que el nivel de desgaste sea uniforme para así evitar que las imágenes capturadas sean borrosas, además no deben contener materiales extraños o contaminantes y burbujas atrapadas en la resina epóxica, debido a que estos agentes reducen el nivel de contraste entre granos y los materiales constituyentes de la resina presentes en la petrografía.

3.9.4 Adquisición de imágenes

Obtener imágenes de un microscopio óptico (Figura 3.18a) y un microscopio electrónico de barrido (Figura 3.18b), es una tarea sencilla, ya que las imágenes obtenidas permiten una visión general o parcial de los granos embebidos obteniendo así sus características más resaltantes, para posteriormente ser analizadas por el procesador de imágenes ImageJ.

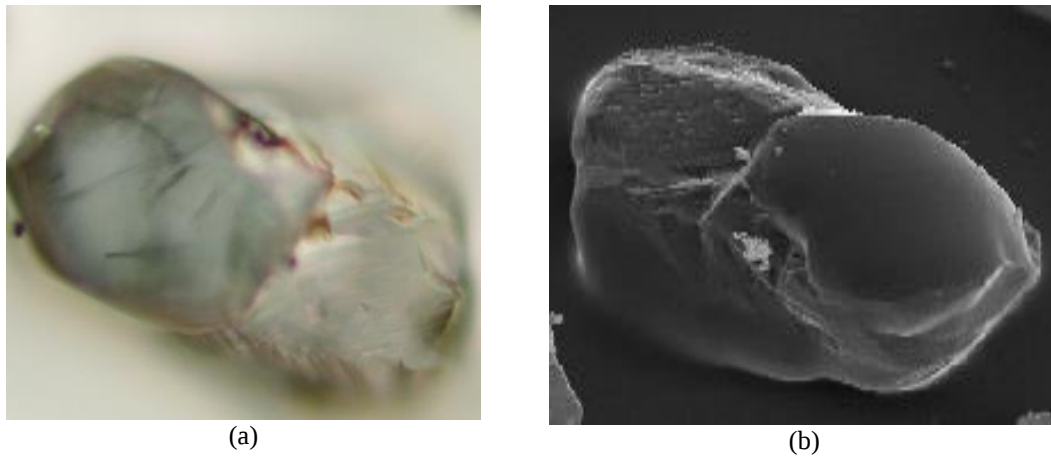


Figura 3.18. (a) Imagen Obtenida por Microscopio Óptico 150 X (b) Imagen Obtenida por el Microscopio Electrónico de Barrido

CAPITULO IV

4. RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos a partir de los análisis: químicos, mineralógicos, petrográficos, y morfo-texturales de los minerales pesados obtenidos de las muestras de sedimentos modernos de los ríos de interés. También, tal cual como fue mencionado en el capítulo de la metodología, se presentan los resultados obtenidos del análisis digital del terreno: índices primarios (elevación y pendiente) y secundarios (índices de erosión, de humedad, y la capacidad de transporte de sedimentos). De esta manera se obtiene una serie de datos cuantitativos y cualitativos que son mostrados en formas de mapas e histogramas, y que serán discutidos en las secciones siguientes.

4.2 ANÁLISIS MORFO-TEXTURAL DE GRANOS

El análisis morfo-textural se basó, en el estudio de los minerales pesados previamente separados y concentrados, presentes en las secciones epóxicas realizadas para las muestras de cada cuenca, mediante el software ImageJ, el cual permitió obtener cuantitativamente los parámetros de redondez y esfericidad de los minerales analizados, para luego ser comparados con el análisis visual obtenido mediante la Tabla 3.15 de redondez-esfericidad de Krubein y Sloss (1954).

4.2.1 MUESTRA DEL RÍO CATANIAPÓ

A continuación se presenta en la Tabla 4.1 los resultados del análisis morfo-textural para la fracción magnética y no magnética del río Cataniapo. En esta tabla, se observa que los minerales más abundantes corresponden a los circones con (96%), para la fracción magnética y (54%) para la no magnética seguidos por granos de

cuarzo con (30%) en la fracción no magnética, topacio con (11%) de la fracción no magnética, rutilo con (3%) para ambas fracciones y minerales óxidos y apatitos en escasas proporciones con (2%) para cada uno. La alta cantidad de circones encontrados en esta muestra es producto de que el río Cataniapo atraviesa gran parte de la formación Granito de Parguaza que está constituido por rocas ígneas acidas en donde el circón es un accesorio común en este tipo de rocas.

La fracción magnética presento un alto contenido de circones y se debe a que la mayoría de los cristales presentaron inclusiones, posiblemente de magnetita o algún mineral enriquecido en Fe, la Figura 4.1 muestra algunos de los circones encontrados en la fracción magnética donde se evidencia algunas zonas rojizas que representan los óxidos dentro de los circones.



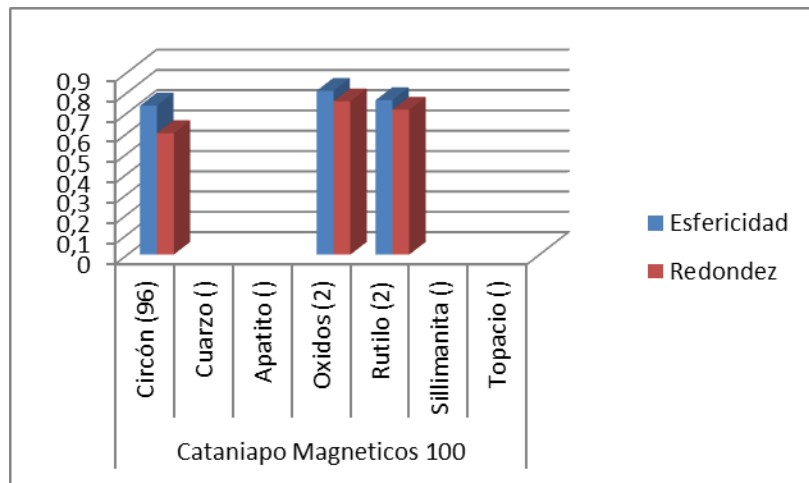
Figura4.1. *Circones de la fracción magnética del río Cataniapo.*

La redondez y esfericidad de los circones los cuales son mayoría en ambas fracciones es de 0,7 en esfericidad que equivale a granos moderado a altamente esféricos y en redondez el valor promedio es de 0,6 que equivale a granos sub-angulosos lo que corrobora que en los sedimentos de la cuenca de Cataniapo se encuentran cercanos a

la roca fuente por lo que sus granos no han sido lo suficientemente retrabajados por el transporte.

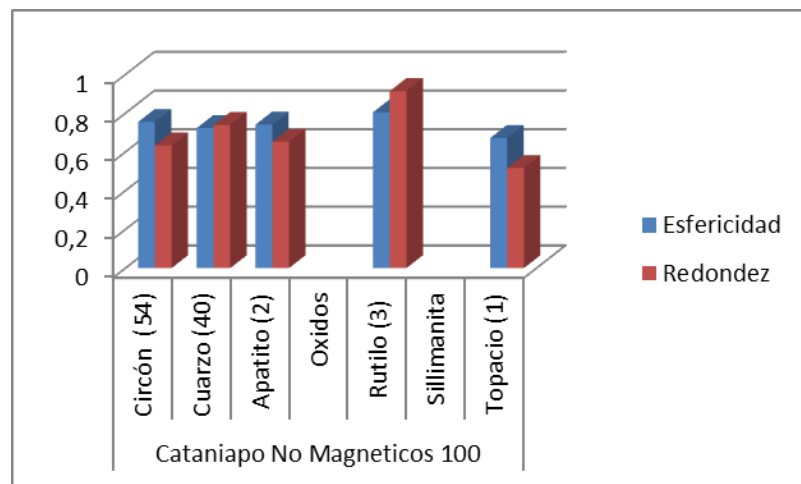
Tabla 4.1. Muestra la media de esfericidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Río Cataniapo. El número de granos analizados es $N=100$.

Cataniapo Magnéticos (N=100)						
Propiedades	Circón (96)	Cuarzo ()	Apatito ()	Óxidos (2)	Rutilo (2)	Topacio ()
Esfericidad	0,735			0,808	0,762	
Redondez	0,599			0,756	0,715	
Cataniapo No Magnéticos (N=100)						
Propiedades	Circón (54)	Cuarzo (40)	Apatito (2)	Óxidos	Rutilo (3)	Topacio (1)
Esfericidad	0,754	0,723	0,741		0,804	0,672
Redondez	0,633	0,739	0,652		0,914	0,517



(a)

Figura 4.2 (a). Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) de la cuenca del Río Cataniapo.

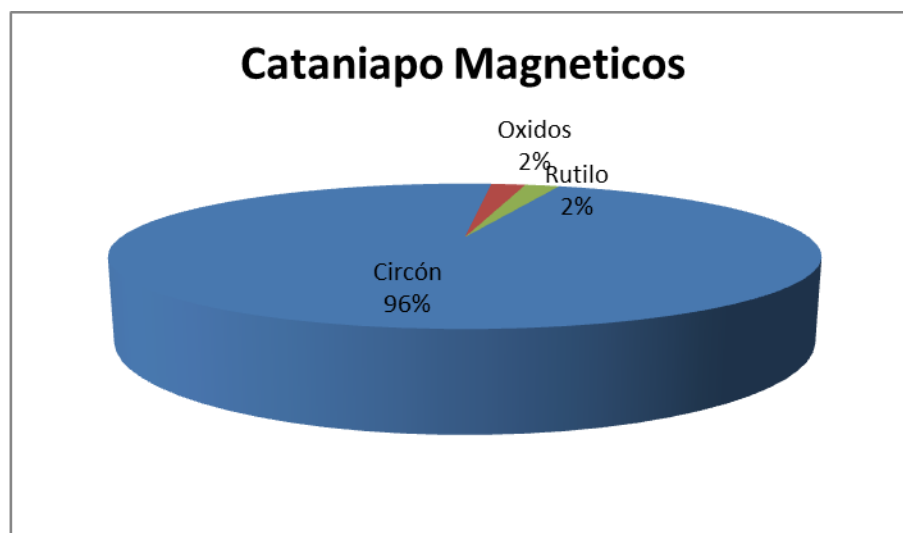


(b)

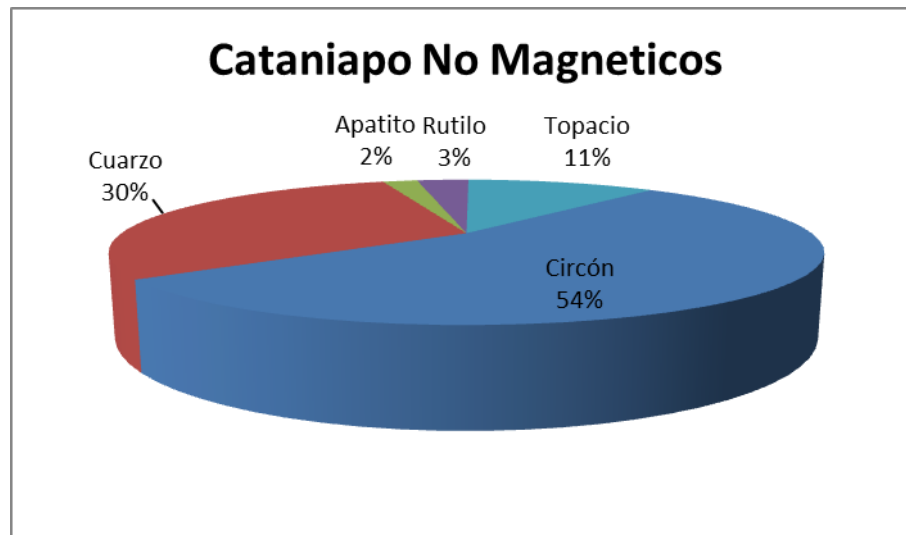
Figura 4.2 (b): Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales no magnéticos de la cuenca del Río Cataniapo.

Tabla 4.2. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Río Cataniapo.

Muestra	Circón	Cuarzo	Apatito	Óxidos	Rutilo	Sillimanita	Topacio
Cataniapo Magnéticos	96			2	2		
Cataniapo No Magnéticos	54	30	2		3		11



(a)

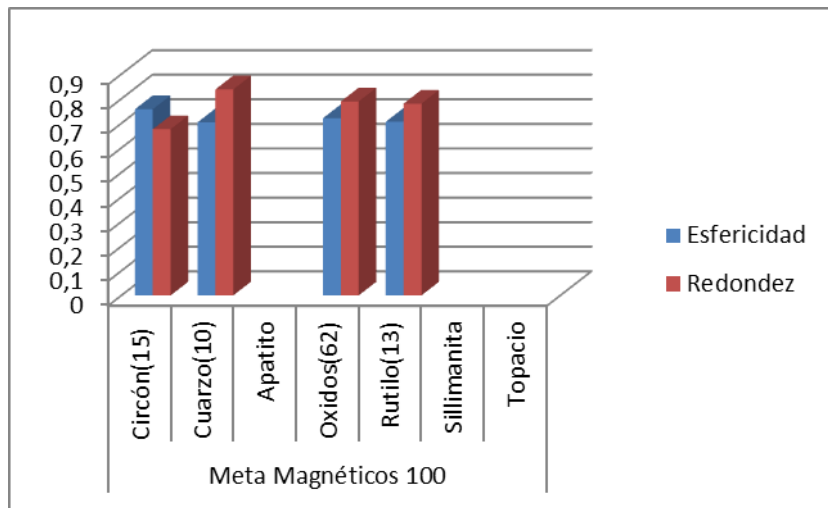


(b)

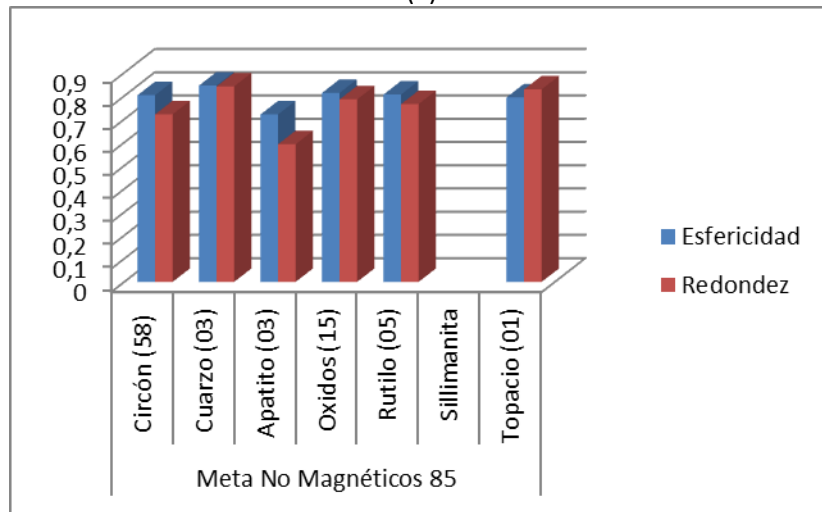
Figura 4.3. Diagramas circulares que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la cuenca del Río Cataniapo.

Tabla 4.3. Muestra la media de esfericidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Río Meta.

Meta Magnéticos (N=100)						
Propiedades	Circón(15)	Cuarzo(10)	Apatito	Óxidos(62)	Rutilo(13)	Topacio
Esfericidad	0,757	0,704		0,721	0,706	
Redondez	0,676	0,838		0,789	0,78	
Meta No Magnéticos (N= 85)						
Propiedades	Circón (58)	Cuarzo (03)	Apatito (03)	Óxidos (15)	Rutilo (05)	Topacio (01)
Esfericidad	0,803	0,845	0,72	0,813	0,806	0,794
Redondez	0,721	0,841	0,592	0,785	0,765	0,828



(a)



(b)

Figura 4.4. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) de la cuenca del Río Meta.

Tabla 4.4. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Río Meta.

Muestra	Circón	Cuarzo	Apatito	Óxidos	Rutilo	Sillimanita	Topacio
Meta Magnéticos	15	10		62	13		
Meta No Magnéticos	58	3	3	15	5		1

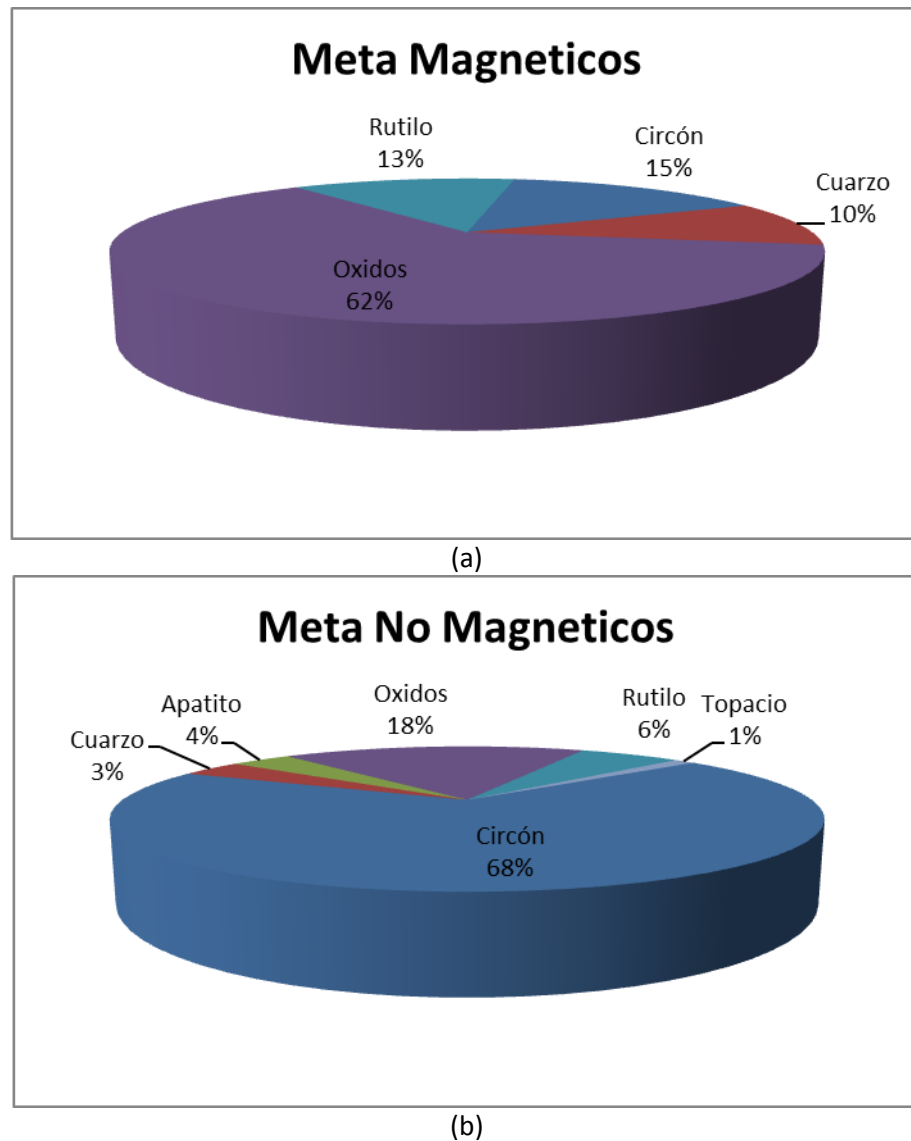


Figura 4.5. Diagramas circulares que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la cuenca del Río Meta.

4.2.2 MUESTRA DEL RÍO META

Las Figuras 4.5 a y b muestran los resultados del análisis morfo-textural para la fracción magnética y no magnética del río Meta. De igual forma en la Tabla 4.4 se observa que los minerales más abundantes corresponden a los óxidos en la fracción magnética con 62% y para la fracción no magnética los de mayor abundancia son los circones con 68%, sin embargo para la fracción magnética se tiene cristales de

circones con el 15%, rutilo (13%), granos de cuarzo (10%) y para la no magnética encontramos aparecen óxidos (18%) seguidos por granos de rutilo (6%), apatito (4%) y cuarzo (3%).

La esfericidad promedio de los circones en ambas fracciones es de 0,75 que equivale a granos con alta esfericidad y la redondez es de 0,75 que son granos sub-redondeados, mientras que en la fracción magnética los óxidos que son mayoría, tienen una esfericidad de 0,8 los que refleja una alta esfericidad y sub-redondeados con 0,75 de redondez.

Esto se debe a que los granos están relacionados genéticamente a rocas de origen ígneo y en cuanto a su redondez es causa del desgaste de las aristas del mineral a través del transporte, por lo que se ve reflejado que el sedimento está siendo transportado a mayor distancia de la roca fuente más lejana se asume que estos sedimentos provienen de la Cordillera Oriental de Colombia y del flanco sur de Los Andes de Venezuela.

4.2.3 MUESTRA DEL RÍO PARGUAZA

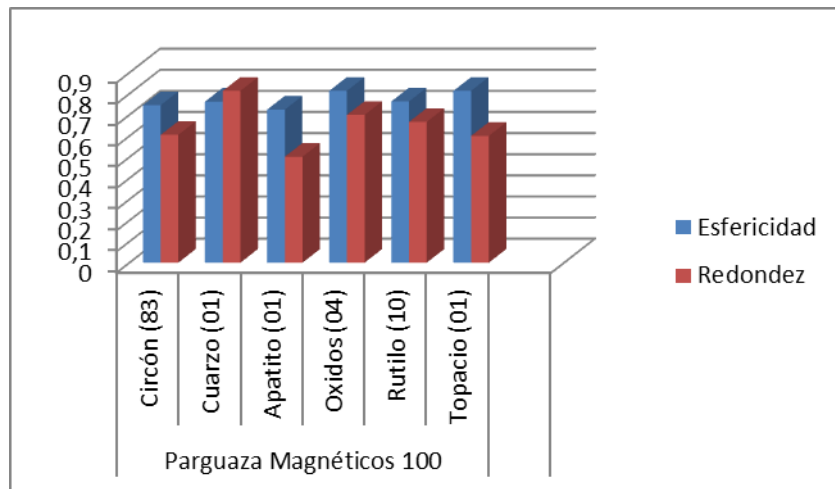
Las Figuras 4.6 a y b muestran los resultados del análisis morfo-textural para la fracción magnética y no magnética del río Parguaza. Por otro lado, la Tabla 4.6 presenta los porcentajes obtenidos. Allí se observa que los minerales más abundantes corresponden a los circones con 83% en la fracción magnética y 86% para la fracción no magnética seguidos por granos de Rutilo (10 %), óxidos (4%) en la sección magnética y en la fracción no magnética granos de cuarzo (6%) y apatitos (6%).

La esfericidad promedio de los circones es de 0,7 en ambas muestras lo que es equivalente a una alta esfericidad y en redondez los granos son sub-angulosos (0,5), la baja redondez de los granos se debe a que el río incide directamente sobre la

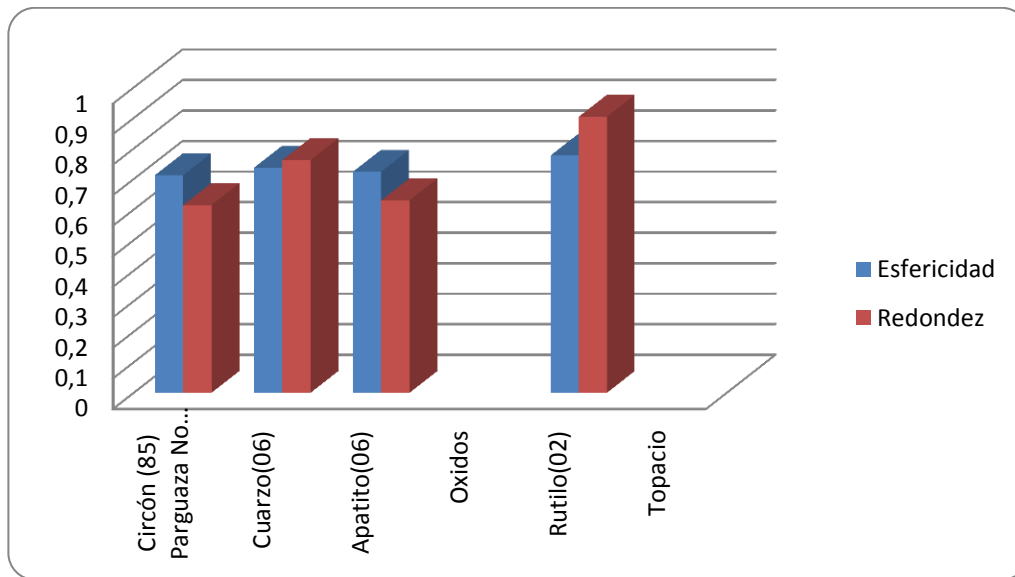
formación granito de Parguaza y existe una menor distancia de transporte de los sedimentos la roca fuente con respecto a la cuenca del río Parguaza.

Tabla 4.5. Muestra la media de esfericidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Río Parguaza.

Parguaza Magnéticos 100						
Propiedades	Circón (83)	Cuarzo (01)	Apatito (01)	Óxidos (04)	Rutilo (10)	Topacio (01)
Esfericidad	0,745	0,762	0,724	0,813	0,763	0,813
Redondez	0,605	0,813	0,501	0,699	0,666	0,6
Parguaza No Magnéticos 99						
Propiedades	Circón (85)	Cuarzo(06)	Apatito(06)	Óxidos	Rutilo(02)	Topacio
Esfericidad	0,713	0,737	0,724		0,777	
Redondez	0,615	0,762	0,63		0,904	



(a)



(b)

Figura 4.6. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) de la cuenca del Río Parguaza.

Tabla 4.6. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Río Parguaza.

Muestra	Circón	Cuarzo	Apatito	Óxidos	Rutilo	Sillimanita	Topacio
Parguaza Magnético	83	1	1	4	10		1
Parguaza No Magnéticos	85	6	6		2		

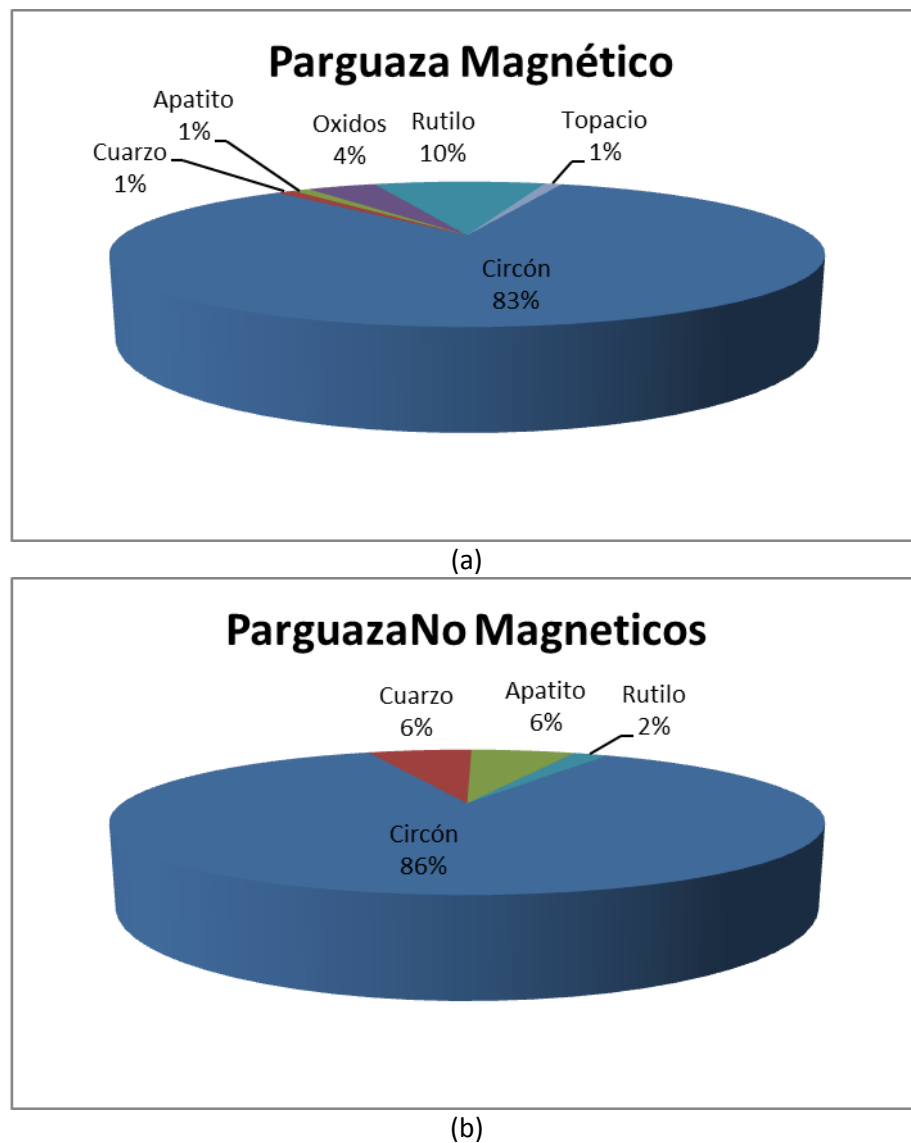


Figura 4.7. Diagramas circulares que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la cuenca del Río Parguaza.

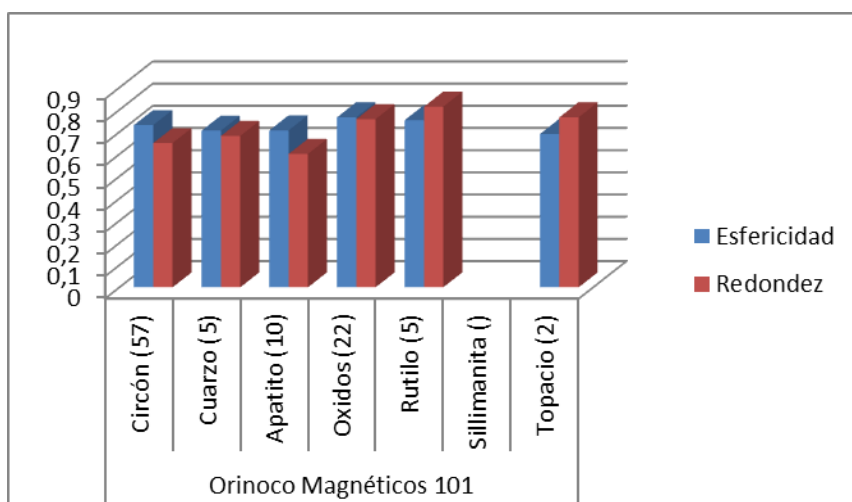
4.2.4 MUESTRA DEL RÍO ORINOCO

La Tabla 4.7 a continuación resume los resultados del análisis morfo-textural para la fracción magnética y no magnética del río Orinoco. En esta tabla se observa que los minerales más abundantes corresponden a circones (56%), óxidos (22%), apatito (10%), cuarzo (5%) y rutilo (5%) de la fracción magnética, mientras que en la no magnética circón (39%), topacio (26%), óxidos (22%) y rutilo (9%).

En cuanto a la esfericidad y redondez de los minerales de mayor abundancia que son los circones presentan valores medios de 0,7 y 0,65 por lo cual se tiene en su mayoría granos de alta esfericidad y sub redondeados, la alta esfericidad se debe a que los minerales pesados que son transportados por este río en su mayoría son de origen ígneo lo que confiere que los minerales tienen mayor desarrollo de su sistema cristalino, con lo cual se explica que la esfericidad se impone sobre la redondez.

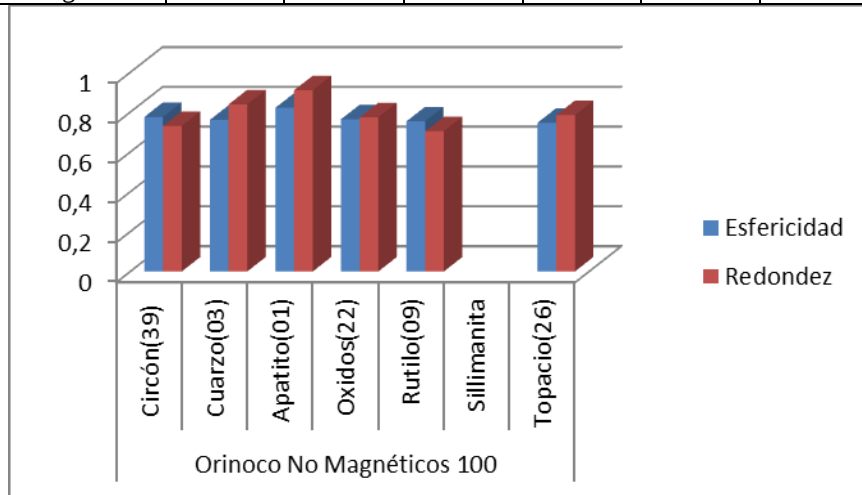
Tabla 4.7. Muestra la media de esfericidad y redondez por grupo mineral para la cuenca del Río Orinoco

Orinoco Magnéticos (N=101)						
Propiedades	Circón (57)	Cuarzo (5)	Apatito (10)	Óxidos (22)	Rutilo (5)	Topacio (2)
Esfericidad	0,731	0,706	0,707	0,766	0,753	0,691
Redondez	0,65	0,682	0,601	0,758	0,814	0,766
Orinoco No Magnéticos (N=100)						
Propiedades	Circón(39)	Cuarzo(03)	Apatito(01)	Óxidos(22)	Rutilo(09)	Topacio(26)
Esfericidad	0,776	0,761	0,822	0,764	0,754	0,747
Redondez	0,731	0,839	0,91	0,774	0,704	0,785



(a)

Muestra	Circón	Cuarzo	Apatito	Óxidos	Rutilo	Sillimanita	Topacio
Orinoco Magnético	57	5	10	22	5		2
Orinoco No magnéticos	39	3	1	22	9		26



(b)

Figura 4.8. Histograma de Esfericidad y Redondez de los minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) de la cuenca del Río Orinoco.

Tabla 4.8. Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la cuenca del Río Orinoco.

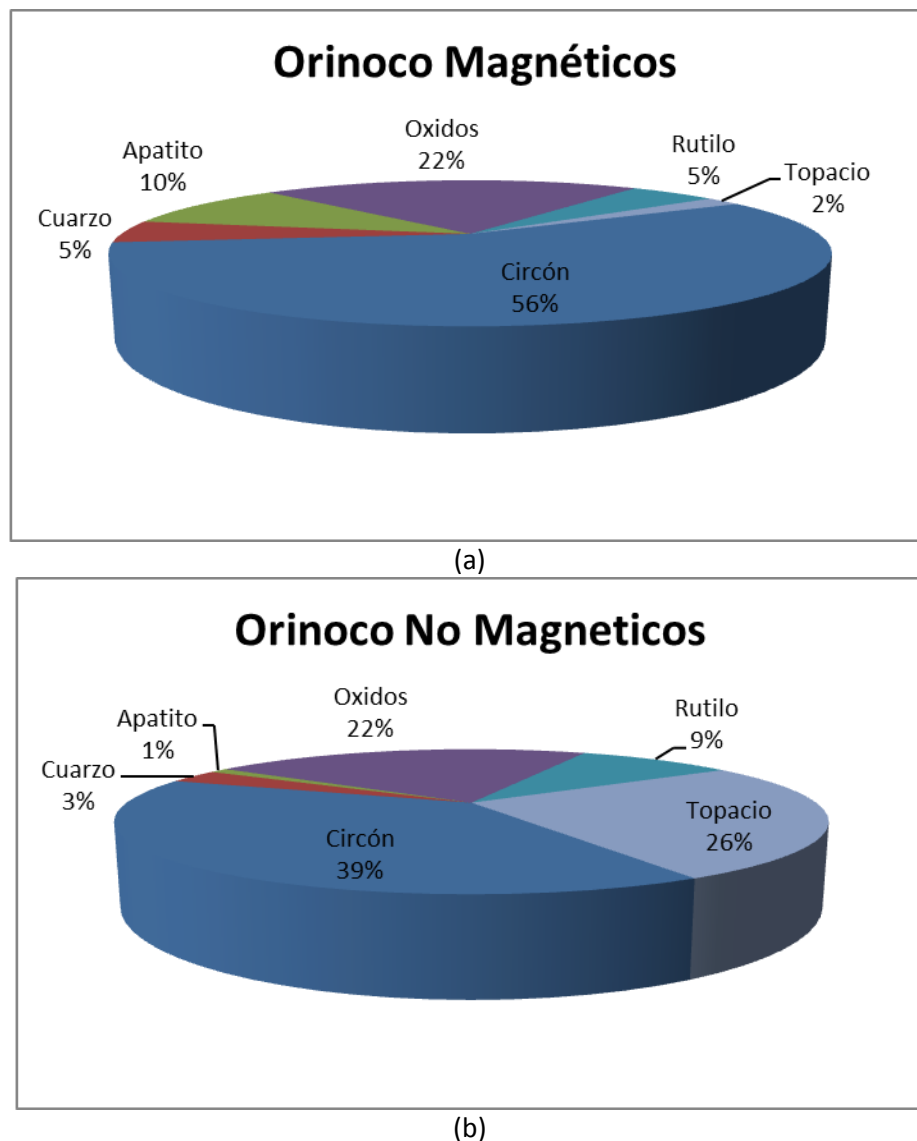


Figura 4.9. Diagramas circulares que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la cuenca del Río Orinoco.

4.2.5 MUESTRA DE SEDIMENTOS DE LA DUNA SANTOS LUZARDO

La Tabla 4.7 a continuación resume los resultados del análisis morfo-textural para la fracción magnética y no magnética de los sedimentos de la Duna Santos Luzardo. En esta tabla se observa que los minerales más abundantes en la fracción magnética corresponden a óxidos (44%), cuarzo (22%), circón (18%), rutilo (9%) y

topacio (5%) y de la fracción no magnética circón (34%), seguidos por los óxidos con (27 %) y cuarzo (27%), topacio (8%) y rutilo (4%).

En cuanto a la esfericidad y redondez de los minerales de mayor abundancia que son los óxidos, circones y cuarzos los valores de esfericidad son similares de 0,75 y 0,7 por lo cual se tiene en su mayoría granos de alta esfericidad y sub-redondeados.

Tabla 4.10 Muestra la cantidad de minerales magnéticos y no magnéticos que se obtuvieron a partir de las secciones montadas mediante el microscopio petrográfico, para la duna de Río Santos Luzardo.

Muestra	Circón	Cuarzo	Apatito	Óxidos	Rutilo	Sillimanita	Topacio
Santos Luzardo Magnéticos	16	20	1	40	8	1	5
Santos Luzardos No magnéticos	30	24		24	4		7



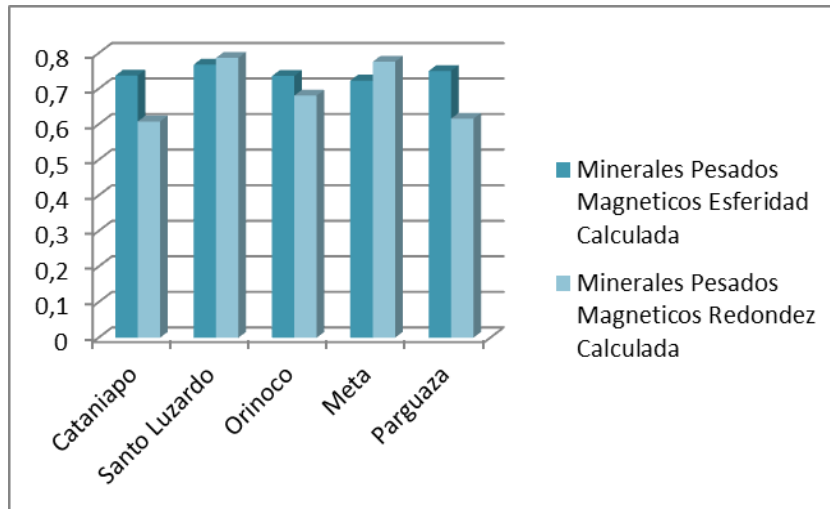
(a)



(b)

Figura 4.11. Diagramas circulares que muestran los porcentajes de minerales magnéticos (a) y no magnéticos (b) para la duna de Santos Luzardo.

Tabla 4.11 Promedio de la esferidad y redondez por cuenca para las muestras de minerales magnéticos y no magnéticos.



(a)

Cuenca	Minerales Pesados No Magnéticos		Minerales Pesados Magnéticos	
	Esferidad Calculada	Redondez Calculada	Esferidad Calculada	Redondez Calculada
Cataniapo	0,742	0,681	0,737	0,608
Santos Luzardo	0,743	0,763	0,768	0,787
Orinoco	0,763	0,743	0,736	0,681
Meta	0,805	0,736	0,723	0,776
Parguaza	0,716	0,631	0,75	0,616

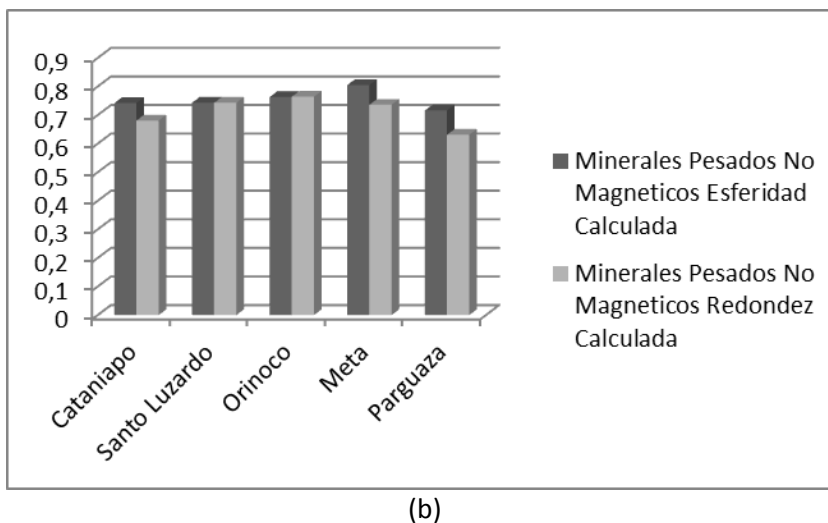


Figura 4.12. Histogramas que muestran el promedio de los índices de esfericidad y redondez calculados y observados por cuenca para minerales magnéticos(a) y no magnéticos (b).

4.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

En este estudio se analizaron un total de nueve (9) minerales representativos de las cinco (5) cuencas estudiadas y se separaron en dos fracciones: magnéticas y no magnéticas, con esto se buscaba corroborar los resultados obtenidos a partir de aquellos minerales que no pudieron ser identificados a través del microscopio petrográfico, entre ellos minerales opacos, posibles óxidos u otros minerales.

Los granos tomados fueron los siguientes: (1) río Parguaza, (1) río Orinoco, (2) río Meta, (4) duna Santos Luzardo, (1) río Cataniapo, para un total de 9 granos.

La microscopia electrónica de barrido proporcionó información de elementos químicos más abundantes que se encontraban en los cristales, lo que permitió llegar al nombre del mineral y aparte de esto se observaron los parámetros texturales y morfológicos de los granos a mayor resolución.

4.3.1 RÍO PARGUAZA

4.3.1.1 MUESTRA (1) MINERALES MAGNÉTICOS

La Figura 4.13a muestra el grano analizado por medio de la microscopía electrónica de barrido de la fracción magnética del río Parguaza, allí se muestra los dos puntos analizados sobre el cristal encerrados en rectángulos. La Figura 4.13d,e representan por medio de histogramas los valores aproximados de átomos que fueron encontrados por el MEB para las dos zonas denotadas como 1 y 2 de la Figura 4.12a, por último, se tiene en la tabla 4.12a,b en la cual se representan en porcentajes de peso y átomos donde se observa que el titanio (Ti) y el oxígeno (O) representan los elementos mayoritarios. A pesar que aparecen picos elevados de azufre (S) esto es debido a que los granos se recubrieron con esmalte para fijarlos al portamuestra y carbono (C) ya que se utilizó un material grafitoso como adhesivo para sujetar las secciones montadas al microscopio electrónico. Como estos valores son frecuentes en todos los análisis de microscopía electrónica, no se hará énfasis en describir ambos elementos en los resultados siguientes por lo cual se hará un recalcu de porcentajes en átomos con respecto al 100% de los elementos químicos excluyendo azufre, carbono y otros elementos que no sean consistentes en los dos puntos tomados sobre el cristal para el análisis químico.

La Tabla 4.12a,b muestra los porcentajes en peso (tabla 4.12a) y en átomos (tabla 4.12b) de los elementos químicos más abundantes en el grano, donde se tiene que el oxígeno es el elemento con mayor porcentaje en átomos con 57,27% y el titanio con 42,73% por lo que este grano se asocia según los elementos químicos encontrados a un rutilo, en este cristal se puede apreciar una fractura de tipo concoidea en la Figura 4.13a, la cual es característica en este mineral además de su transparencia en la Figura 4.13 c,d que es translúcida y tiene un color marrón oscuro que coincide con las descripciones de Klein y Hurlbut (1997) para este tipo de mineral.

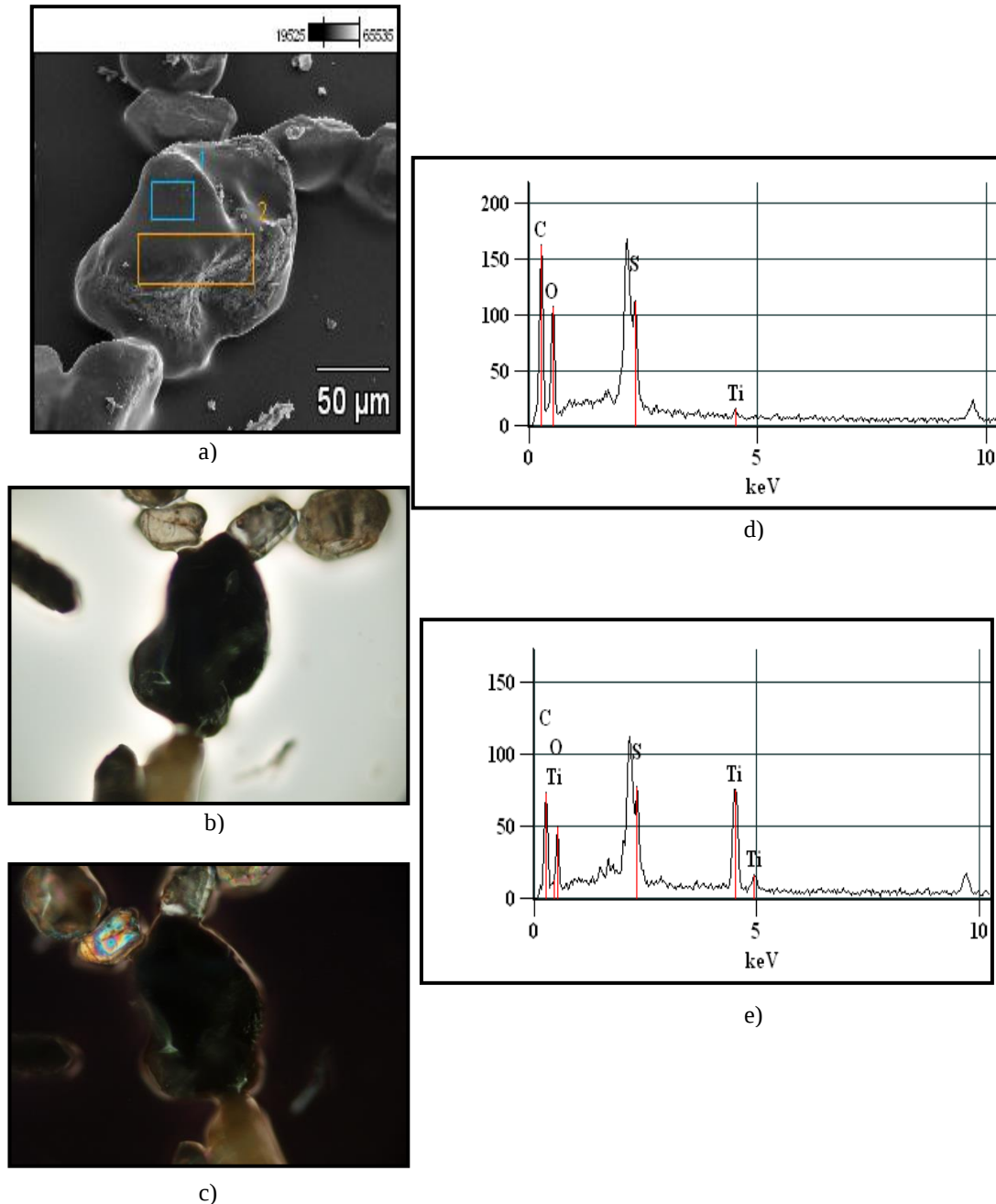


Figura 4.13. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra del río Parguaza magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.12. *a,b* Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética de Parguaza.

<i>MUESTRA (%peso)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Parguaza Magnéticos_pt1</i>	74.17	23.04	2.68	0.11
<i>Parguaza Magnéticos_pt2</i>	71.79	19.41	3.21	5.58

<i>MUESTRA (%átomos)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Parguaza Magnéticos_pt1</i>	65.95	27.29	6.37	0.39
<i>Parguaza Magnéticos_pt2</i>	55.87	20.13	6.67	17.33

4.3.2 RÍO ORINOCO

4.3.2.1 MUESTRA (1) MINERALES NO MAGNÉTICOS

La Figura 4.14a muestra las dos zonas que fueron estudiadas sobre el grano mediante la MEB para un cristal perteneciente a sedimentos del río Orinoco. La Figura 4.14d,e representa los valores de la composición química arrojada para este grano mediante histogramas donde se observa que el aluminio (Al), silicio (Si) y oxígeno (O) son quienes representan los elementos mayoritarios y se ven representados en la Tabla 4.13a,b donde se muestran los porcentajes en peso (tabla 4.13a) y en átomos (4.13b) de los elementos químicos más abundantes presentes en el grano, tomando en cuenta que el elemento con mayor cantidad de átomos presentes es el O (83,4%), Al (10,62%) y Ti (5,8%), lo que indica según estos elementos encontrados en el grano que corresponde a un topacio.

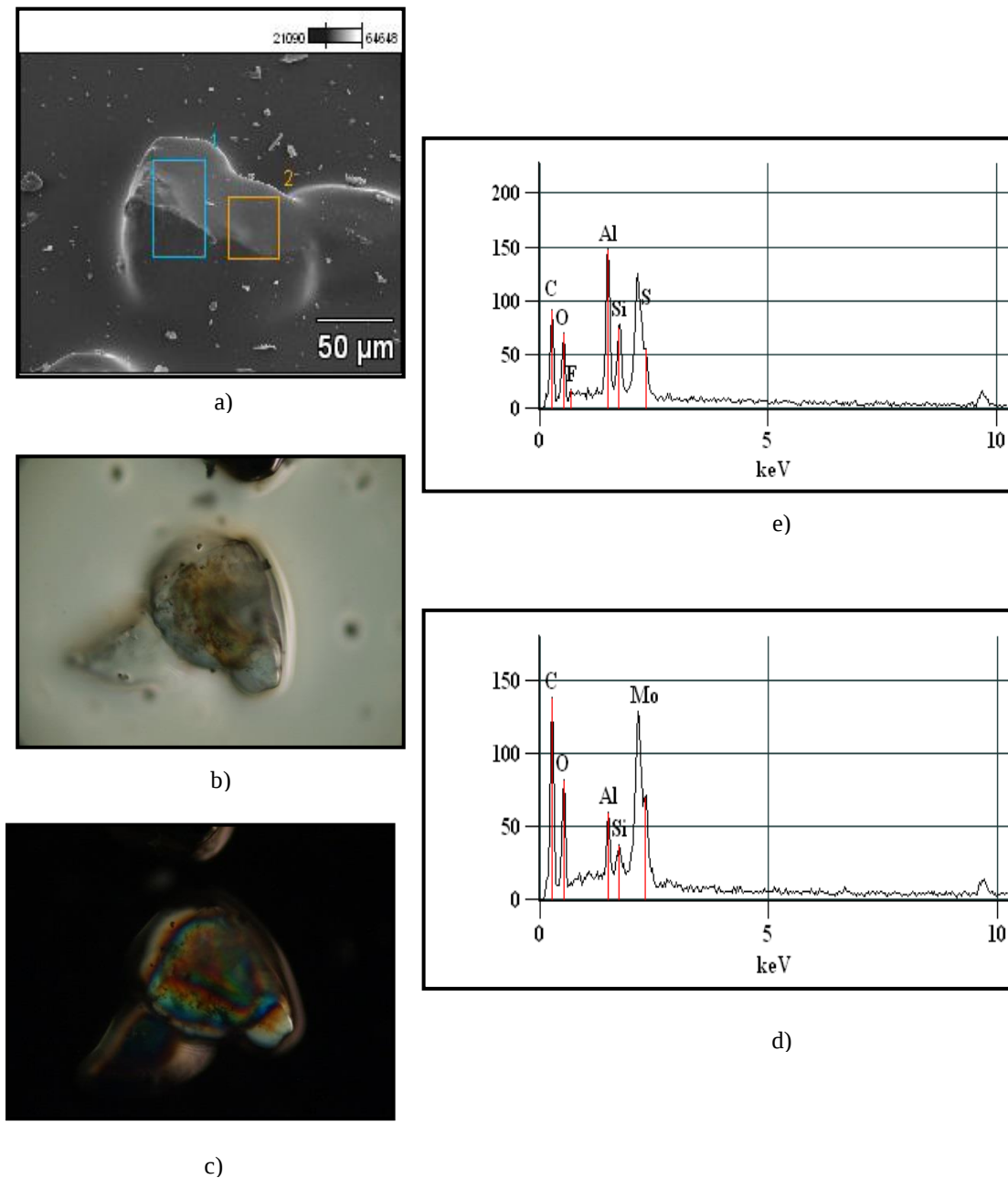


Figura 4.14. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Orinoco no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.13. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Orinoco.

<i>MUESTRA (%peso)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>F-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Orinoco No Magnéticos_pt1</i>	59.51	19.83	5.34	7.11	4.06	4.16	
<i>Orinoco No Magnéticos_pt2</i>	56.19	23.30		2.39	1.77		16.35
<i>MUESTRA (%átomos)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>F-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Orinoco No Magnéticos_pt1</i>	70.65	17.68	4.00	3.76	2.06	1.85	
<i>Orinoco No Magnéticos_pt2</i>	72.46	22.55		1.37	0.98		2.64

4.3.3 RÍO META

4.3.3.1 MUESTRA (1) MINERALES MAGNÉTICOS

La Figura 4.15a muestra las zonas analizadas por MEB para un cristal perteneciente a los sedimentos del río Meta. La Figura 4.15d,e representa los valores de la composición química arrojada para este grano mediante histogramas, allí se observa que el Silicio (Si), oxígeno (O), titanio (Ti) y calcio (Ca) son quienes representan los elementos mayoritarios y se ven representados en la tabla 4.14, donde se muestran los porcentajes en peso (tabla 4.14a) y en átomos (tabla 4.14b) de los elementos químicos presentes en el grano y se tiene que la mayor cantidad de átomos lo presentan los elementos O con 82,43%, Si con 16,82%, Ca con 0,26% y Ti con 0,48%, se deduce con esto que el cristal pertenece a una esfena o titanita según los elementos químicos encontrados.

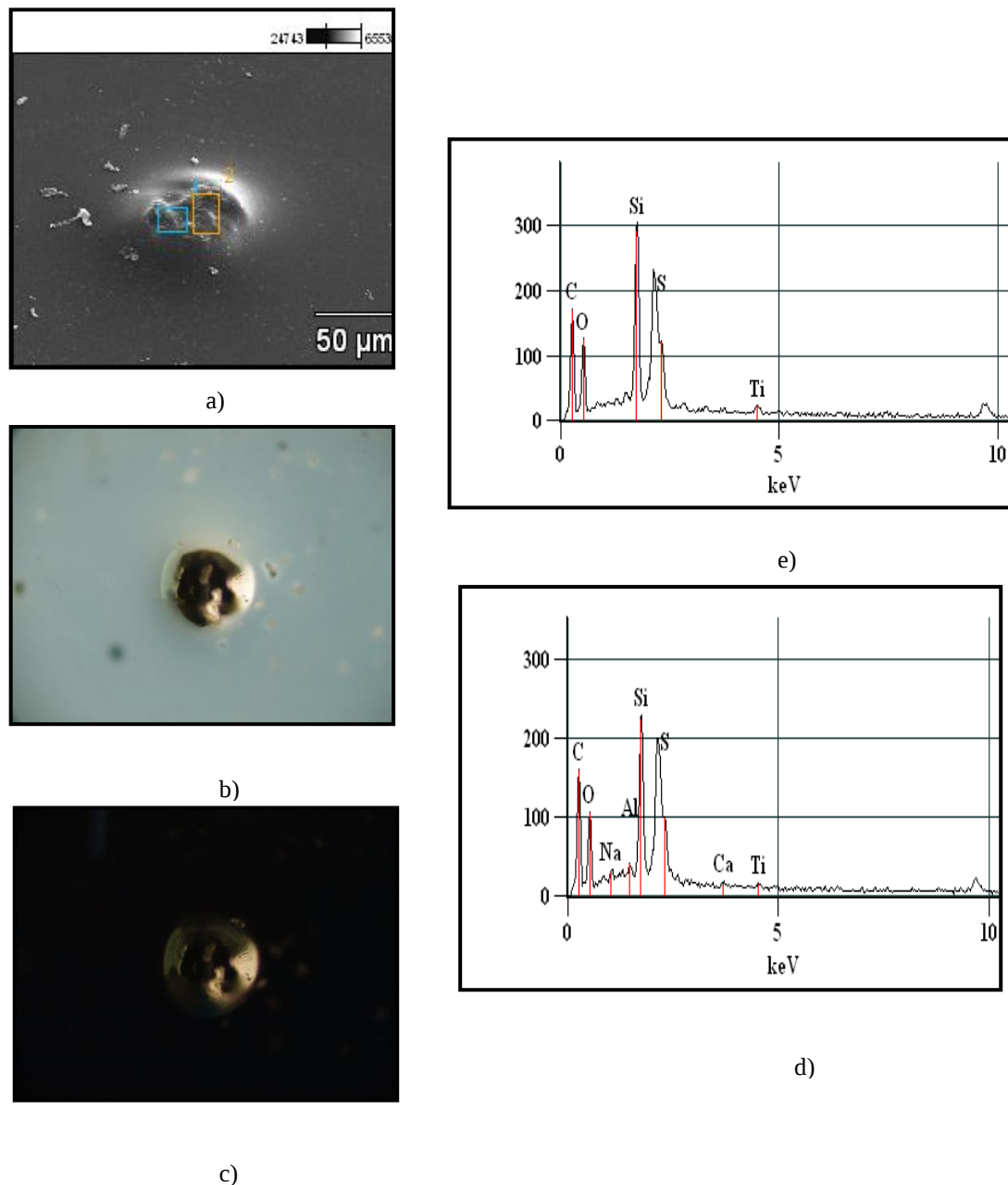


Figura 4.15. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Meta magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.14. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética Meta.

<i>MUESTRA (%peso)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Na-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ca-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Meta Magnéticos_pt1</i>	63.78	22.05			8.37	5.22		0.57
<i>Meta Magnéticos_pt2</i>	64.69	21.19	1.36	0.88	7.12	4.43	0.16	0.17

<i>MUESTRA (%átomos)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Na-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ca-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Meta Magnéticos_pt1</i>	74.15	19.24			4.16	2.28		0.17
<i>Meta Magnéticos_pt2</i>	74.79	18.39	0.82	0.45	3.52	1.92	0.05	0.05

4.3.3.2 MUESTRA (2) MINERALES NO MAGNÉTICOS

La Figura 4.16a muestra las dos zonas analizadas por MEB para un grano de los sedimentos pertenecientes al río Meta. La Figura 4.16d,e representa los valores de la composición química arrojada por el MEB para las dos zonas antes mencionadas, donde se observa que el titanio (Ti) y oxígeno (O) representan los elementos químicos mayoritarios en ambos histogramas y pueden observarse en la tabla 4.15a,b donde se muestran los porcentajes en peso (tabla 4.15a) y en átomos (tabla 4.15b) de los elementos químicos presentes en el grano y se tiene que los elementos mayoritarios son el O con 64,18% y el titanio con 35,82%, teniendo así que el grano pertenece al mineral rutilo.

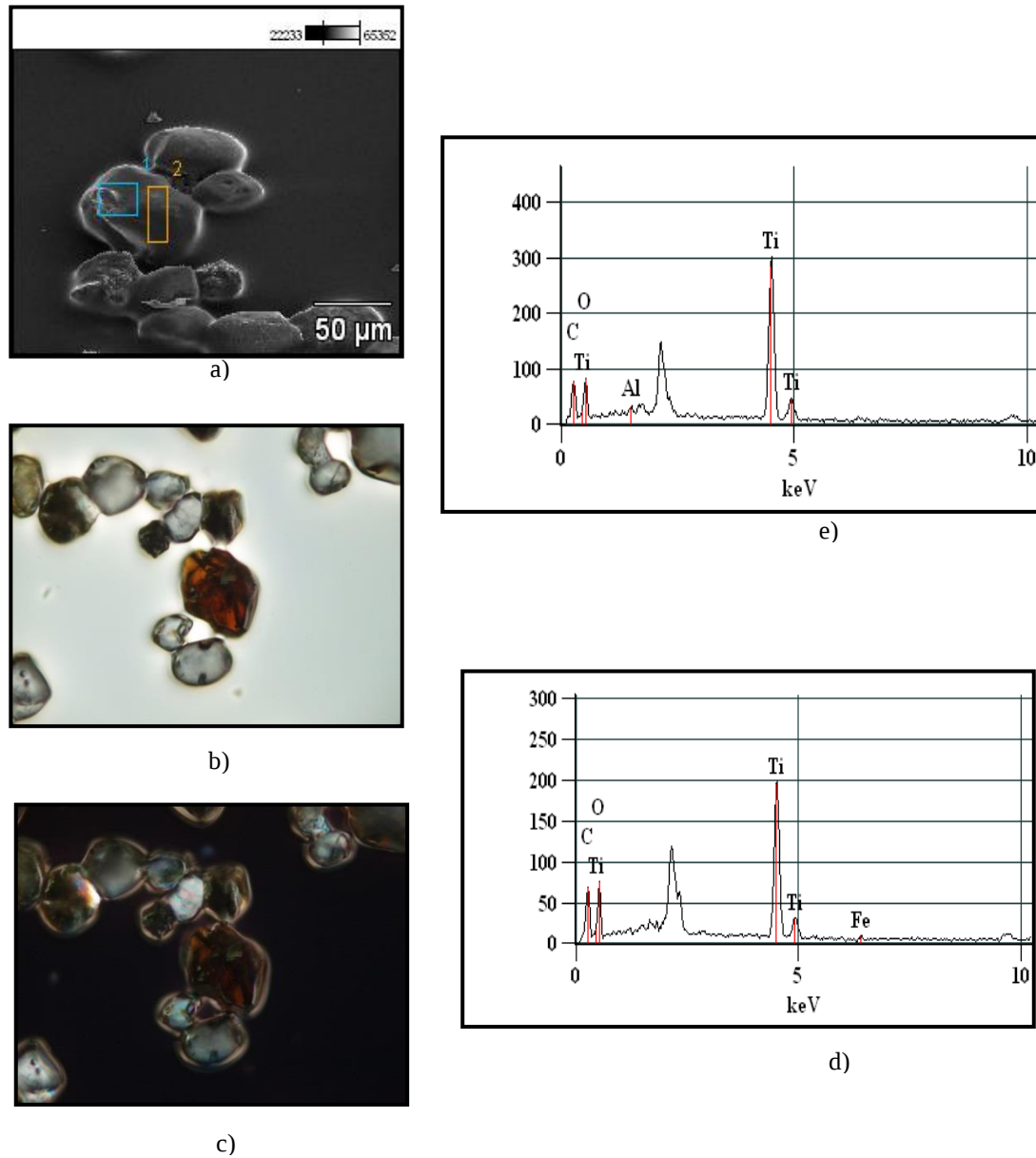


Figura 4.16. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Meta no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.15. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética Meta.

<i>MUESTRA (%peso)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Ti-K</i>	<i>Fe-K</i>
<i>Meta No Magnéticos_pt1</i>	30.75	24.01	1.19	44.05	
<i>Meta No Magnéticos_pt2</i>	33.01	26.52		40.18	0.29

<i>MUESTRA (%átomos)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Ti-K</i>	<i>Fe-K</i>
<i>Meta No Magnéticos_pt1</i>	50.95	29.87	0.88	18.30	
<i>Meta No Magnéticos_pt2</i>	52.36	31.57		15.98	0.10

4.3.4 DUNA DE SANTOS LUZARDO

4.3.4.1 MUESTRA (1) MINERALES MAGNÉTICOS

La Figura 4.17a muestra las dos zonas analizadas por MEB para un grano de los sedimentos pertenecientes a la duna de Santos Luzardo. La Figura 4.17d,e muestra los histogramas que representan los valores de la composición química arrojada por el MEB para las dos zonas analizadas, se observa que el Aluminio (Al), Silicio (Si), oxígeno (O) representan los elementos químicos mayoritarios en el grano los cuales se ven reflejados en la Tabla 4.16a,b donde se muestran los porcentajes en peso (4.16a) y en átomos (4.16b) de los elementos químicos presentes en el grano y se tiene que el elemento mayoritario es el O con 78,01% y en minoría el Al con 13,43%, Si con 8,56% teniendo así que el grano pertenece a una sillimanita por los elementos químicos encontrados en él y además se puede apreciar en la figura 4.16a el hábito fibroso que es común en este mineral según Klein y Hurlbut (1997).

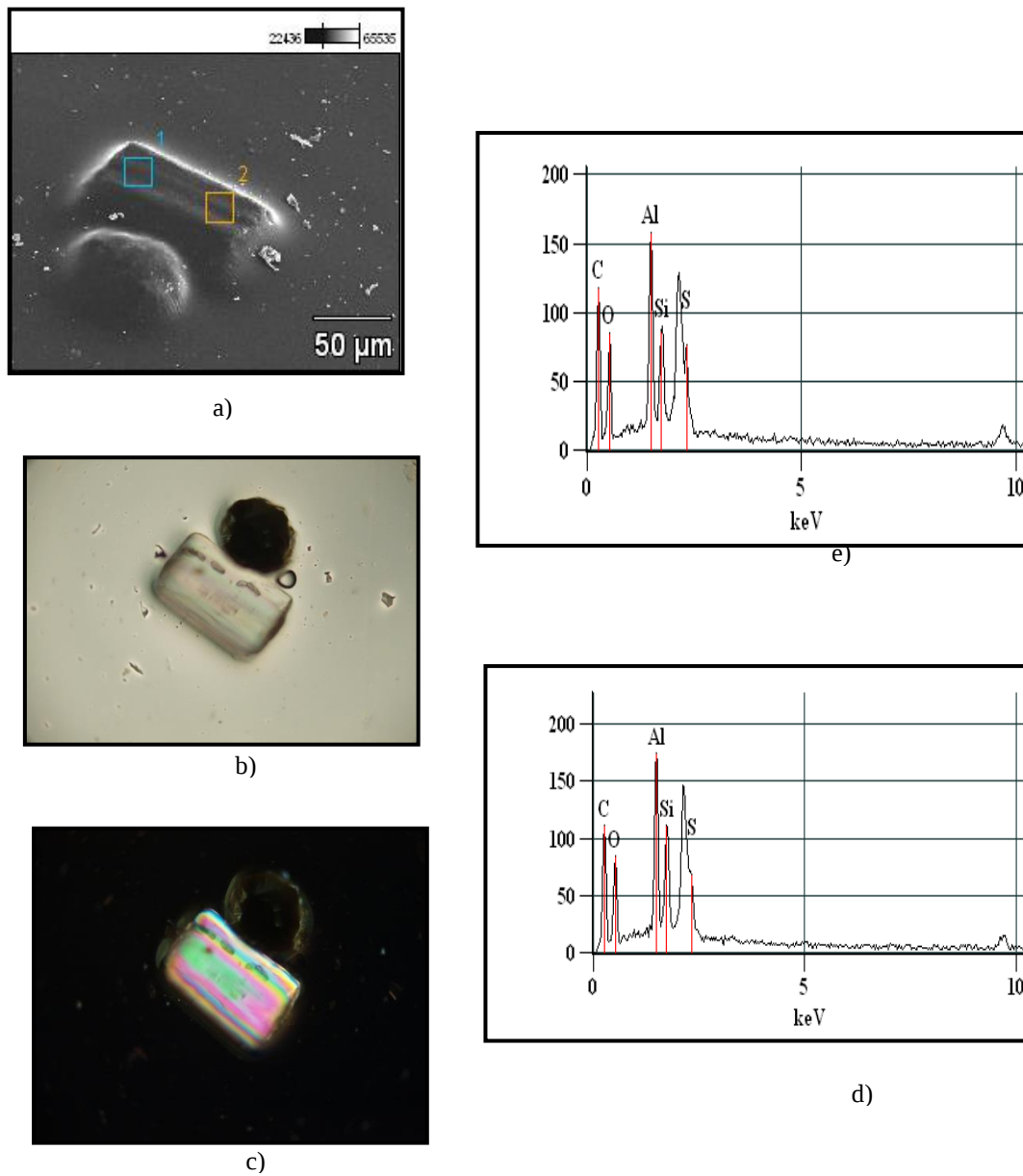


Figura 4.17. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.16. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética de Santos Luzardo.

<i>MUESTRA (%peso)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt1</i>	64.36	21.92	6.05	3.77	3.89
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt2</i>	62.29	22.13	6.73	4.72	4.13

<i>MUESTRA (%átomos)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt1</i>	74.33	19.01	3.11	1.86	1.68
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt2</i>	72.88	19.44	3.51	2.36	1.81

4.3.4.2 MUESTRA (2) MINERALES MAGNÉTICOS

La Figura 4.18a muestra las zonas analizadas por MEB para un grano perteneciente a los sedimentos de la duna de Santos Luzardo. La Figura 4.18d,e representan por medio de histogramas los valores de la composición química arrojada por el MEB para las dos zonas denotadas en rectángulos, se observa que el titanio (Ti) y oxígeno (O) representan los elementos químicos mayoritarios y estos se pueden ver reflejados en la tabla 4.17a,b en la cual se muestran los porcentajes en peso (4.17a) y en átomos (4.17b) de los elementos químicos presentes en el grano, teniendo así que en porcentajes de átomos el O es mayoritario con 91,5% y en minoría Ti 8,5% lo que indica que el cristal pertenece al mineral rutilo.

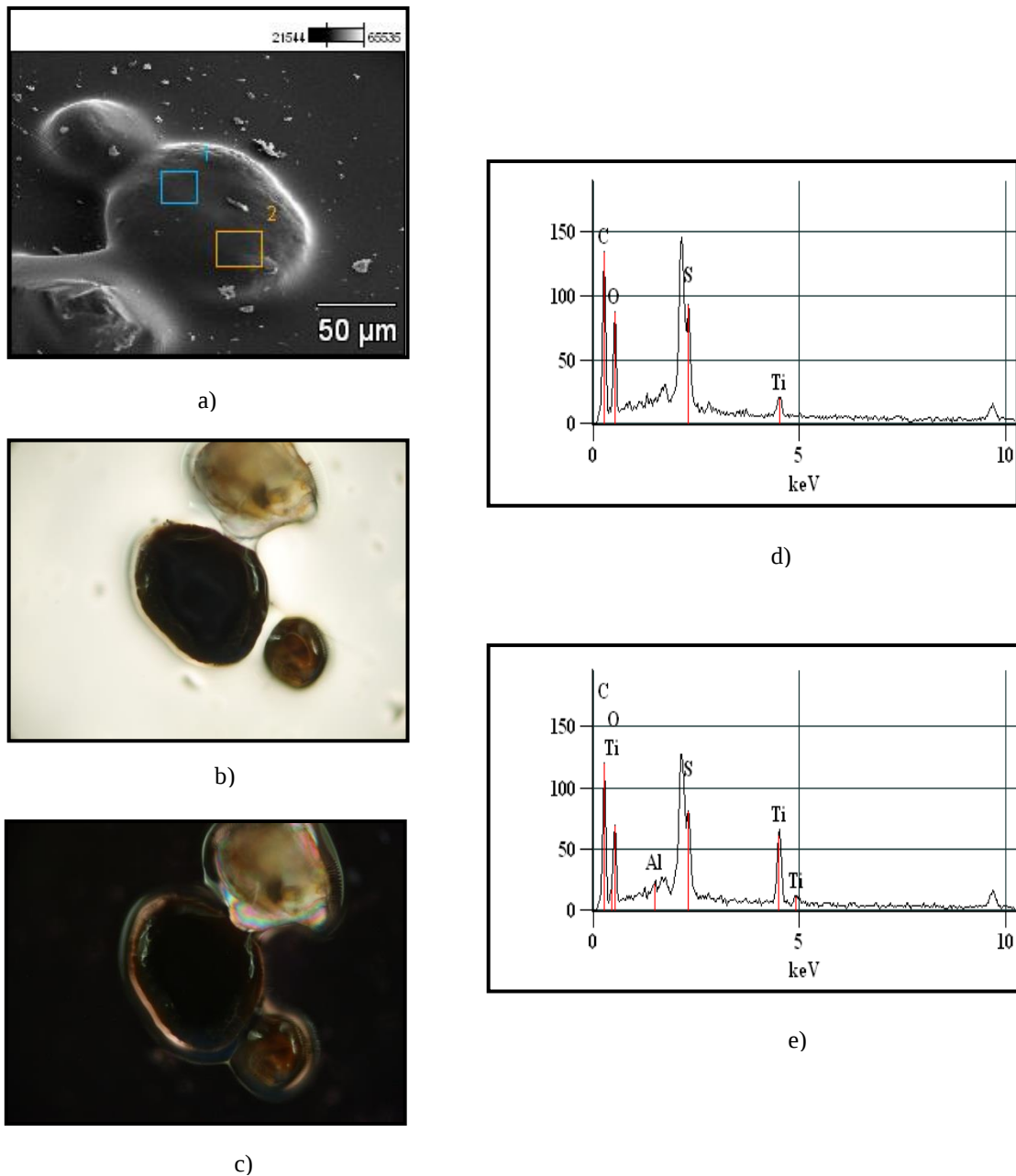


Figura 4.18. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.17. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción magnética de Santos Luzardo.

<i>MUESTRA (%peso)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt1</i>	65.11	26.21		6.18	2.50
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt2</i>	58.18	23.94	0.87	5.91	11.10

<i>MUESTRA (%átomos)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>Al-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt1</i>	74.21	22.43		2.64	0.72
<i>Santos Luzardo Magnéticos_pt2</i>	71.36	22.04	0.47	2.71	3.41

4.3.4.3 MUESTRA (3) MINERALES NO MAGNÉTICOS

La figura 4.19a muestra los granos analizados por el MEB para los sedimentos pertenecientes a la duna de Santos Luzardo. La figura 4.19d,e representa los valores en histogramas de la composición química arrojada por el MEB para las dos zonas estudiadas sobre el grano, se observa que el titanio (Ti) y oxígeno (O) representan los elementos químicos mayoritarios y están representados en la tabla 4.18a,b en la cual se muestran los porcentajes en peso (tabla 4.18a) y en átomos (tabla 4.18b) de los elementos químicos más abundantes en el grano, teniendo así, que el mayor porcentaje de átomos lo tiene el O con 89,3% y en minoría el Ti con 8,8%, y Al con 1,88%, el mineral que contiene estos elementos químicos es el Rutilo.

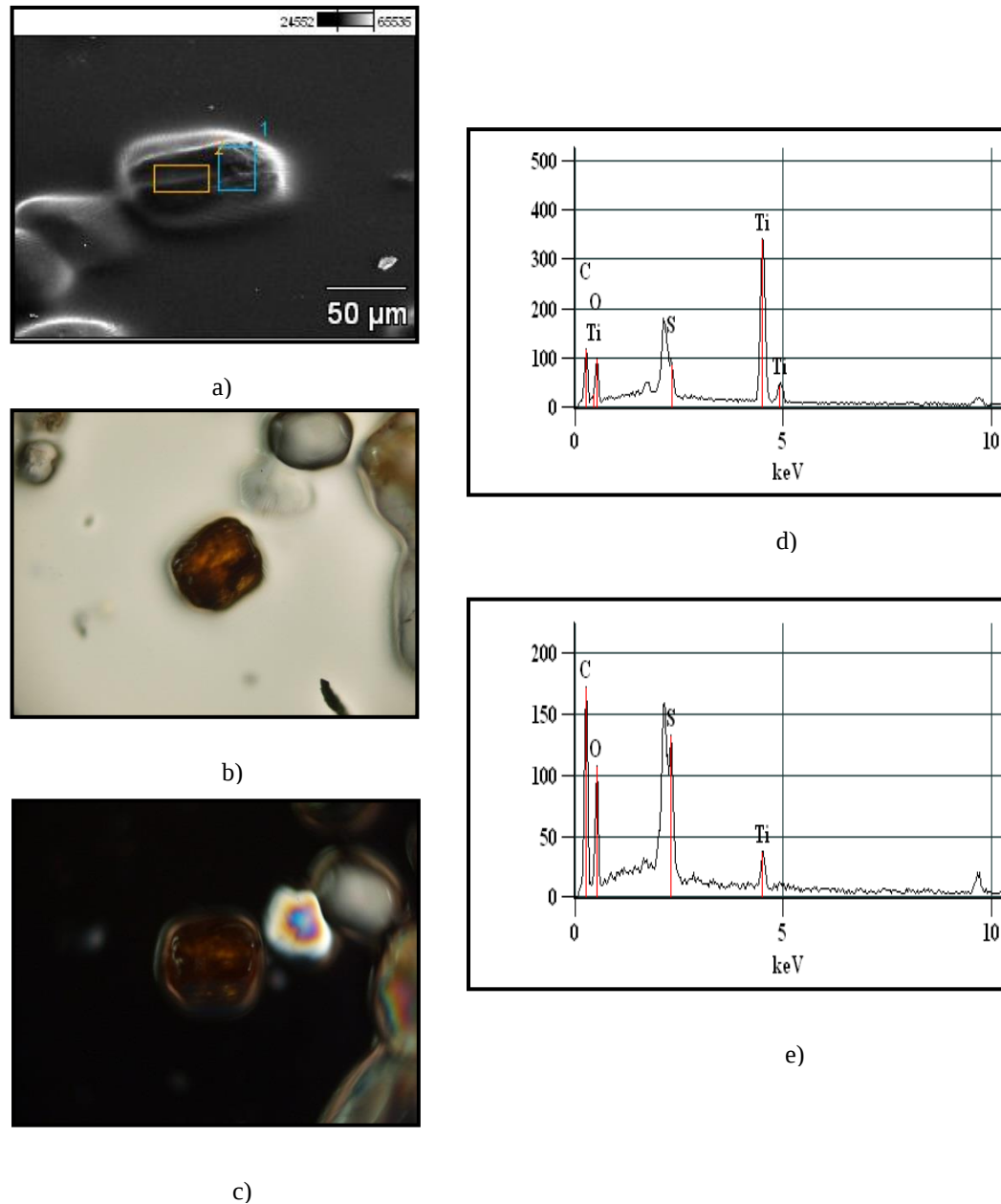


Figura 4.19. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.18. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Santos Luzardo.

<i>MUESTRA (%peso)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt1</i>	57.50	25.98	2.21	14.32
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt2</i>	74.76	21.37	2.83	1.04

<i>MUESTRA (%átomos)</i>	<i>C-K</i>	<i>O-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Ti-K</i>
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt1</i>	37.07	22.31	3.80	36.82
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt2</i>	65.05	24.77	6.57	3.61

4.3.4.4 MUESTRA (4) MINERALES NO MAGNÉTICOS

La Figura 4.20a muestra los granos analizados por MEB para los sedimentos de la duna de Santos Luzardo. La figura 4.20d,e representa los valores de la composición química arrojada por MEB para las dos zonas denotadas y se observa que el Silicio (Si) y oxígeno (O) representan los elementos químicos mayoritarios en los histogramas, en la tabla 4.19a,b se presentan los porcentajes en peso (tabla 4.19a) y en átomos (tabla 4.19b) de los elementos químicos más abundantes en el grano, y se tiene que el O es mayoritario en cantidad de átomos con 53% y el Ti con 47%, estos elementos coinciden con los de la formula química del rutilo.

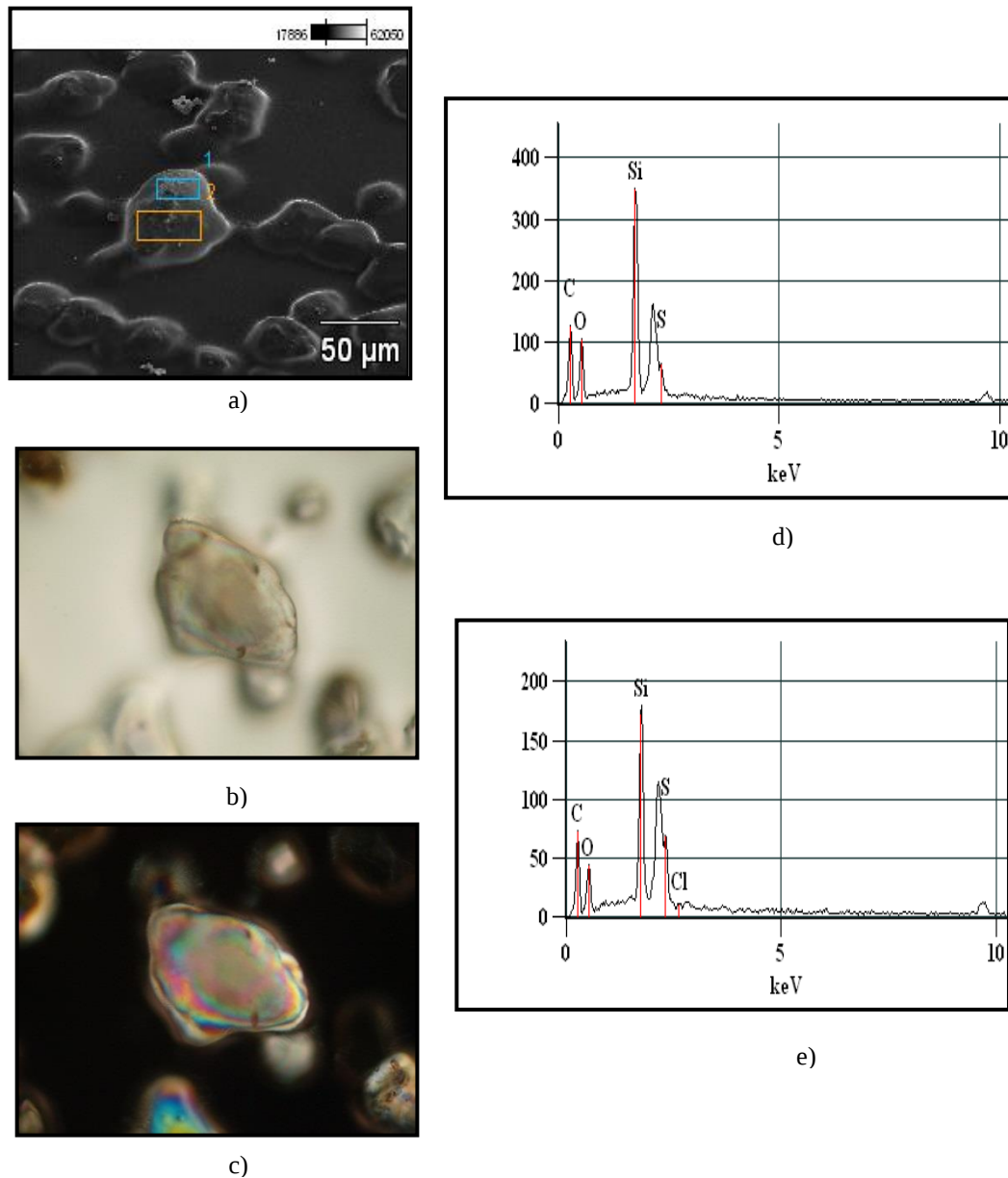


Figura 4.20. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Santos Luzardo no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal.

Tabla 4.19. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Santos Luzardo.

MUESTRA (%peso)	C-K	O-K	Si-K	S-K	Cl-K
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt1</i>	60.89	23.05	12.90	3.16	
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt2</i>	64.10	19.73	10.02	5.68	0.47

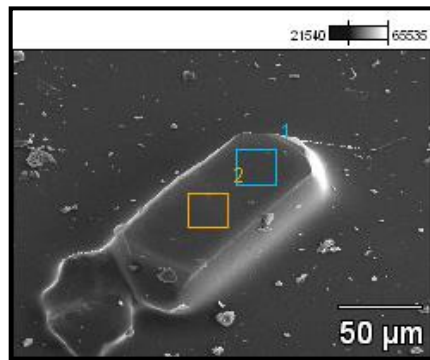
MUESTRA (%átomos)	C-K	O-K	Si-K	S-K	Cl-K
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt1</i>	71.73	20.38	6.50	1.39	
<i>Santos Luzardo No Magnéticos_pt2</i>	74.98	17.33	5.01	2.49	0.19

4.3.5 RÍO CATANIAPO

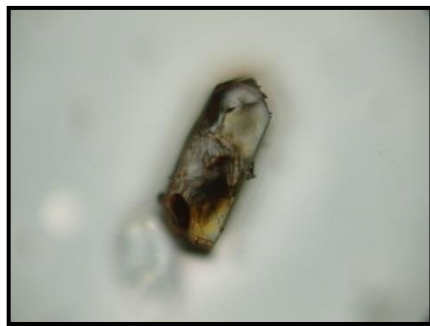
4.3.5.1 MUESTRA (1) MINERALES NO MAGNÉTICOS

La Figura (4.21 a) muestra los granos analizados por microscopía electrónica de barrido para un grano de la fracción no magnética del río Cataniapo. La Figura (4.21 d,e) representa los valores de la composición química arrojada por el microscopio para las dos (2) zonas denotada como 1 y 2 en la Figura (4.21 d,e), se observa que el circonio (Zr), oxígeno (O), silicio (Si) y calcio (Ca) representan los elementos químicos mayoritarios los cuales coinciden con el circón, en la tabla 4.20 se muestran los porcentajes en peso (tabla 4.20a) y en átomos (tabla 4.20b) de los elementos químicos más abundantes en el grano.

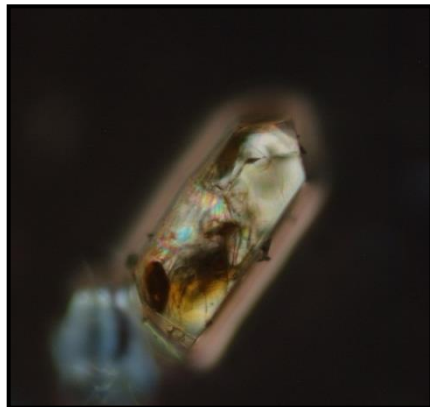
La forma que presenta este grano es completamente prismática tabular lo cual coincide con la descripción de Klein y Hurlbut (1997). Además se puede apreciar en las aristas gran angulosidad, indicios de que el cristal no ha sufrido el suficiente retrabajamiento o transporte para redondearlas, lo que indica cercanía con la roca fuente.



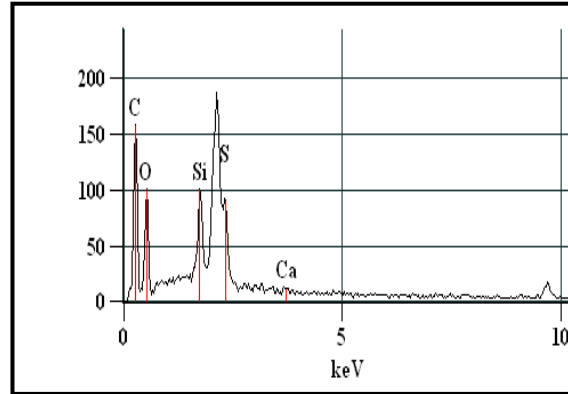
a)



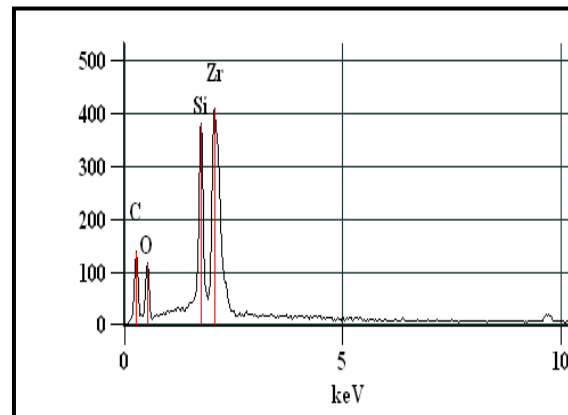
b)



c)



d)



e)

Figura 4.21. Resultados de la microscopía electrónica para un cristal de la muestra Cataniapo no magnéticos. A) zonas del cristal analizado. B) Foto del cristal a nícoles paralelo con el microscopio polarizante Olympus CX31. C) Foto nícoles cruzados. D) Valores porcentuales en cps (conteos por segundo) para la zona 1 del cristal. E) Valores porcentuales en cps para la zona 2 del cristal

Tabla 4.20. Valores porcentuales para las dos zonas del cristal perteneciente a la fracción no magnética de Cataniapo

MUESTRA (%peso)	C-K	O-K	Si-K	S-K	Ca-K	Rb-K
Cataniapo No Magnéticos_pt1	61.98	16.47	1.58	3.41	0.16	16.40
Cataniapo No Magnéticos_pt2	66.19	25.60	2.88	5.33		

MUESTRA (%atomos)	C-K	O-K	Si-K	S-K	Ca-K	Rb-K
Cataniapo No Magnéticos_pt1	78.81	15.72	0.86	1.63	0.06	2.93
Cataniapo No Magnéticos_pt2	74.67	21.68	1.39	2.25		

Tabla 4.21. Muestra los minerales que se obtuvieron a partir de los histogramas y tablas de porcentajes de peso y átomos de los elementos químicos obtenidos a través de la Microscopia Electrónica.

Nombre de la muestra	Numero de Foto-Grano	Nombre del Mineral
Cataniapo No Magnéticos	100	Circón
Meta Magnéticos	2	Esfena
Meta No Magnéticos	65	Rutilo
Orinoco No Magnéticos	25	Topacio
Parguaza Magnéticos	27	Rutilo
Santos Luzardo Magnéticos	56	Sillimanita
Santos Luzardo Magnéticos	57	Rutilo
Santos Luzardo No Magnéticos	10	Rutilo
Santos Luzardo No Magnéticos	45	Cuarzo

4.4 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

4.4.1 ATRIBUTOS PRIMARIOS

4.4.1.1 ELEVACIÓN Y PENDIENTE

La Tabla 4.22 representa el área de cada una de las cuencas estudiadas, la cuenca con mayor área corresponde a la del río Meta con $48.353,92 \text{ km}^2$, la pendiente en esta cuenca es de $2,097 \pm 6,015^\circ$ y tiene una elevación de $275,772 \pm 565,582 \text{ m}$, en segundo lugar se ubica la cuenca de un segmento río Orinoco con un área de $18140,96 \text{ km}^2$, el valor promedio de la pendiente aquí es de $1,087 \pm 1,993^\circ$ y su elevación es de $109,233 \pm 24,159 \text{ m}$, seguida en extensión por la cuenca del río Parguaza con $3826,12 \text{ km}^2$, el valor promedio de pendiente para esta cuenca es de $12,064 \pm 8,553^\circ$ y su elevación promedio es de $595,125 \pm 364,030 \text{ m}$ siendo la cuenca con mayor pendiente y elevación, seguida por la cuenca del río Cataniapo con una área de $1587,87 \text{ km}^2$ el valor promedio de la pendiente aquí es de $8,765 \pm 7,882^\circ$ y su elevación es de $270,796 \pm 193,968$ y por último la duna de Santos Luzardo con una extensión de $279,5 \text{ km}^2$ quien presenta la menor pendiente y elevación de las cuencas estudiadas con valores de pendiente $0,411 \pm 0,365^\circ$ y elevación $51,737 \pm 3,175 \text{ m}$.

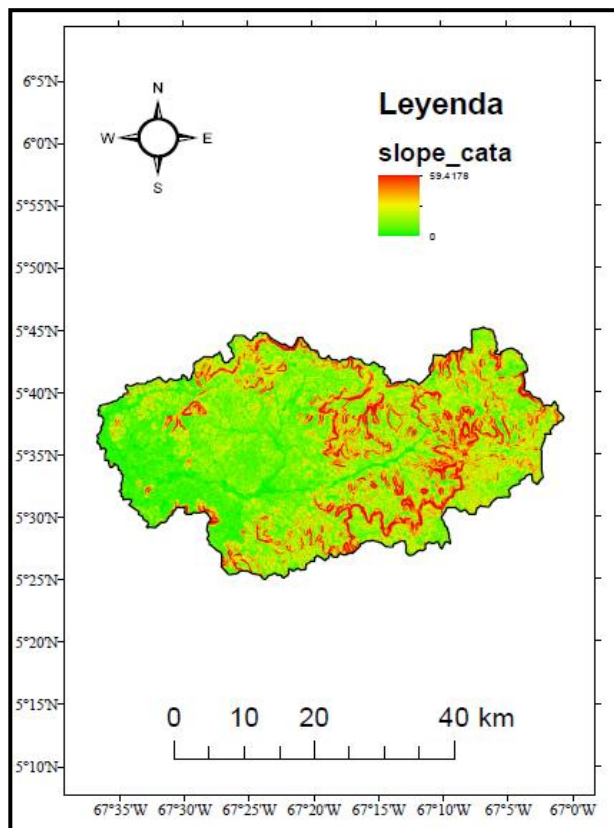
Tabla 4.22. Muestra los datos del área, elevación y pendiente de cada cuenca estudiada

Cuenca	Área (km^2)	Elevación (m)				Pendiente ($^\circ$)			
		min	max	Med.	d.s	min	max	Med.	d.s
Cataniapo	1587,87	60	919	270,797	193,962	0	59,418	8,795	7,882
Meta	48353,92	40	5087	275,772	565,582	0	73,811	2,098	6,015
Parguaza	3826,12	56	1839	595,125	364,031	0	68,202	12,064	8,553
Orinoco	18140,96	47	538	109,233	24,159	0	50,889	1,088	1,994
Santos Luzardo	279,5	43	62	51,738	3,175	0	2,901	0,411	0,365

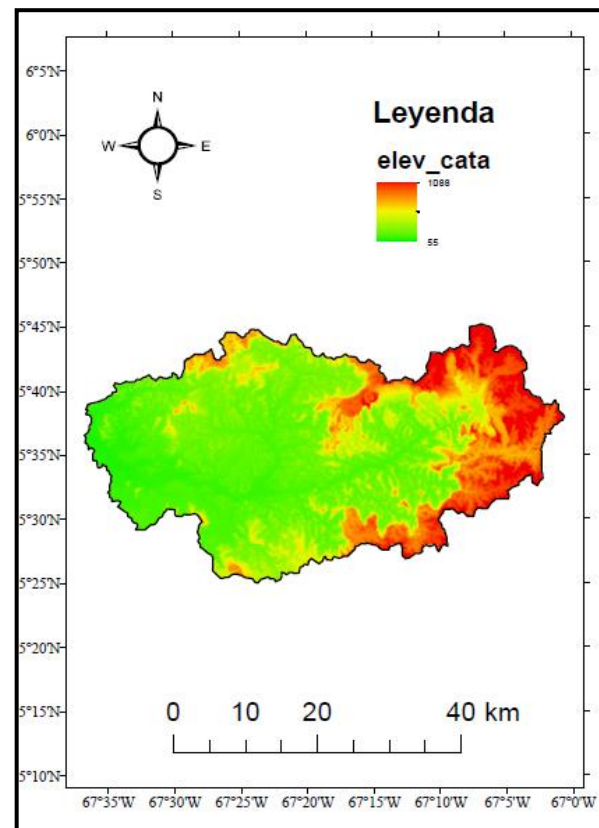
A continuación se muestran los mapas de elevación y pendiente generados por cada cuenca estudiada por medio el software ArcGIS para hacer más fácil la comprensión de los atributos primarios del terreno.

Tabla 4.23. Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Cataniapo.

Cuenca	PENDIENTE				ELEVACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Cataniapo	0	59,417839	8,795359	7,882273	60	919	270,79669	193,9621



(a)

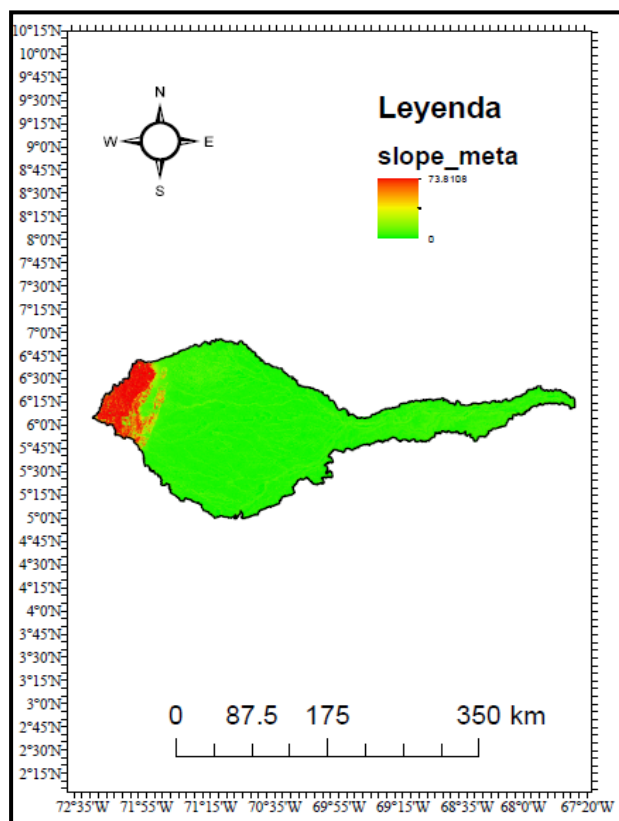


(b)

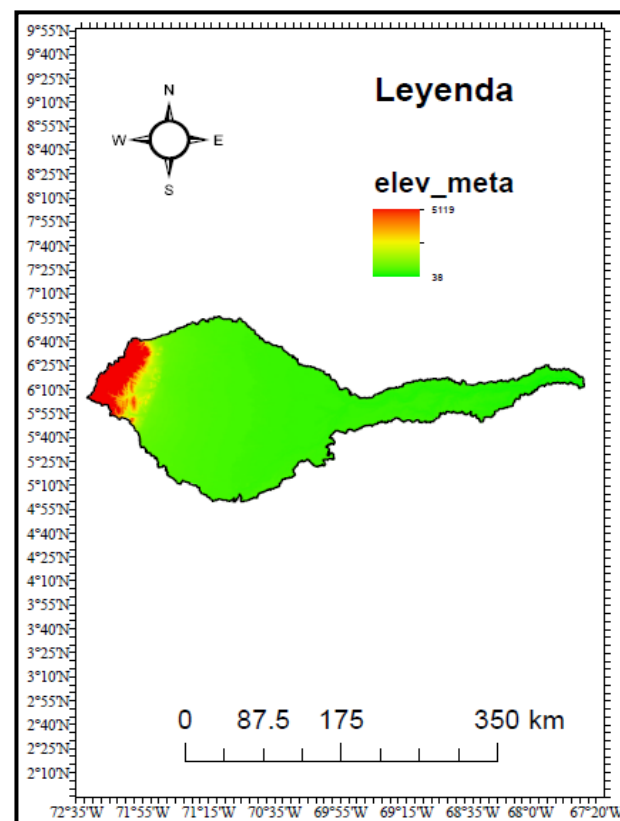
Figura 4.22. Atributos primarios de la cuenca del Río Cataniapo: a) Mapa de Pendiente, b) Mapa de Elevación

Tabla 4.24: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Meta.

Cuenca	PENDIENTE				ELEVACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Meta	0	73,810844	2,097834	6,01542	40	5087	275,77228	565,58167



(a)

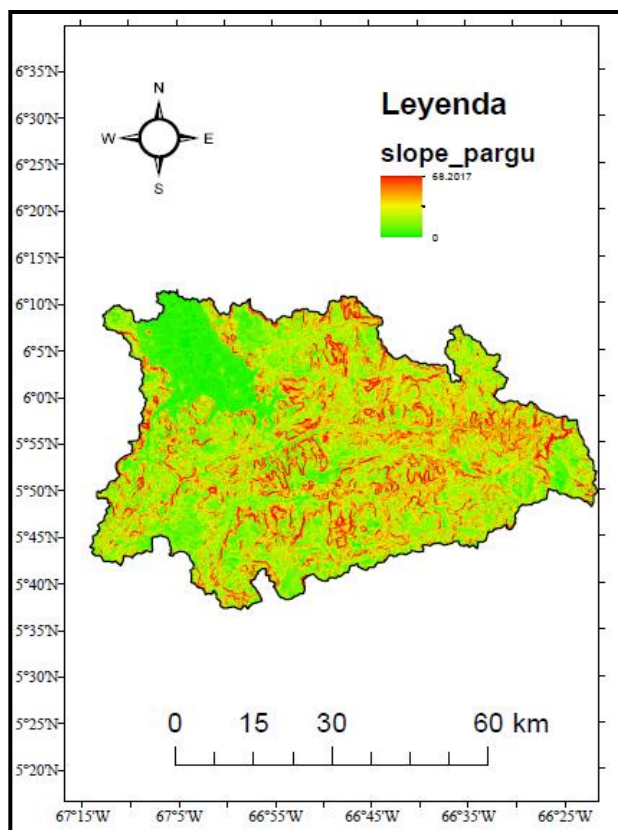


(b)

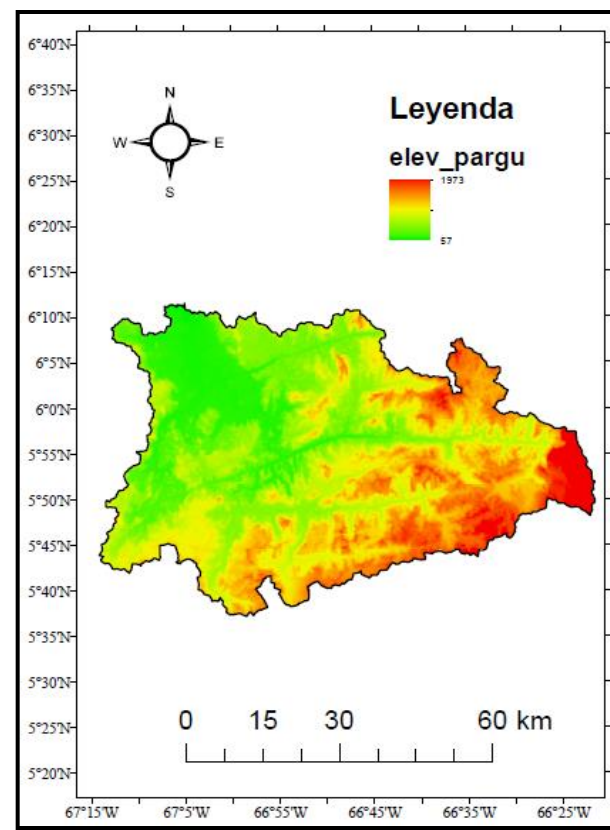
Figura 4.23: Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación

Tabla 4.25: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Parguaza.

Cuenca	PENDIENTE				ELEVACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Parguaza	0	68,201653	12,064165	8,553007	56	1839	595,12543	364,0307



(a)

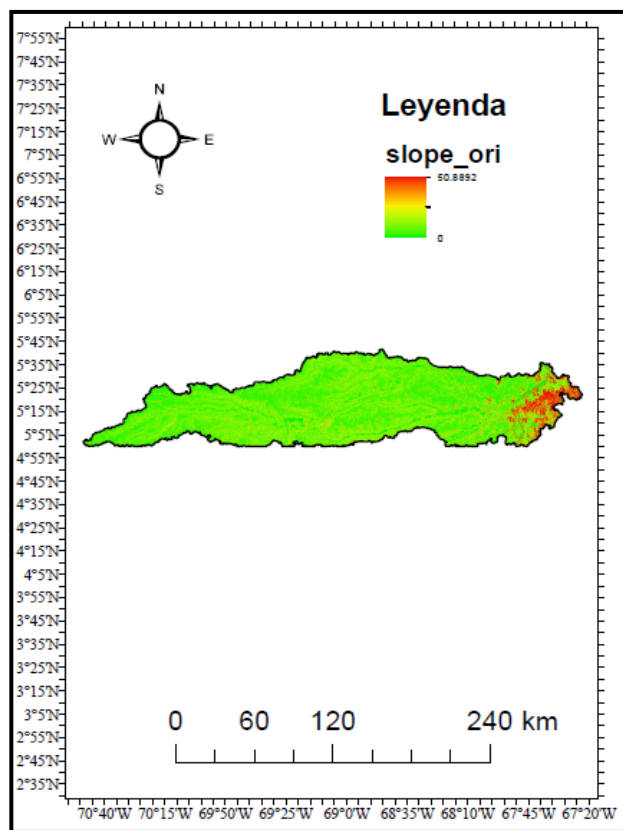


(b)

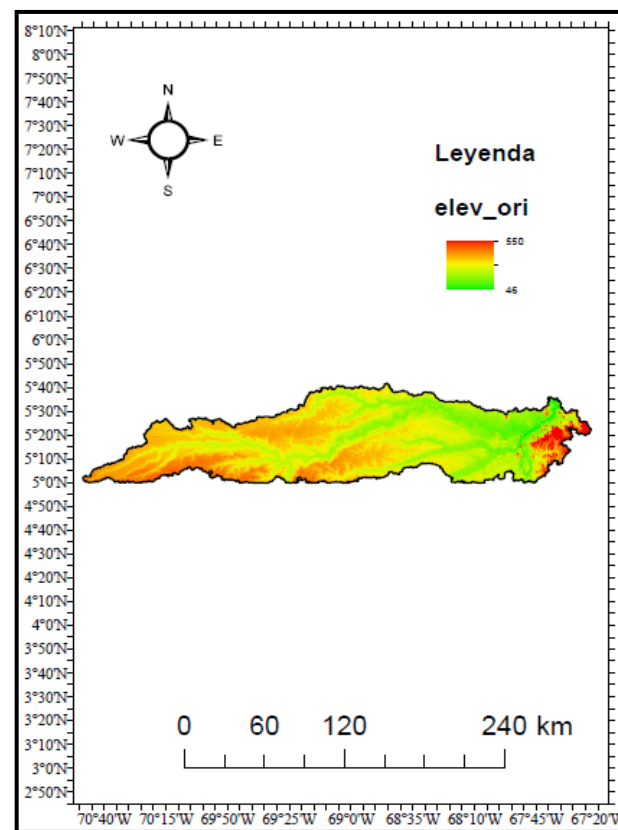
Figura 4.24: Mapa de la cuenca del Río Parguaza: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación

Tabla 4.26: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Orinoco.

Cuenca	PENDIENTE				ELEVACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Orinoco	0	50,889221	1,087784	1,99365	47	538	109,23285	24,159372



(a)

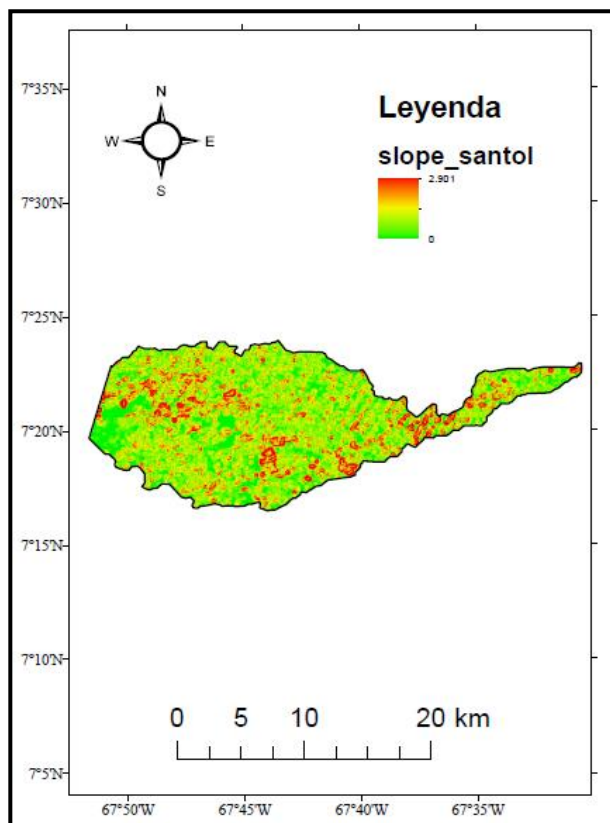


(b)

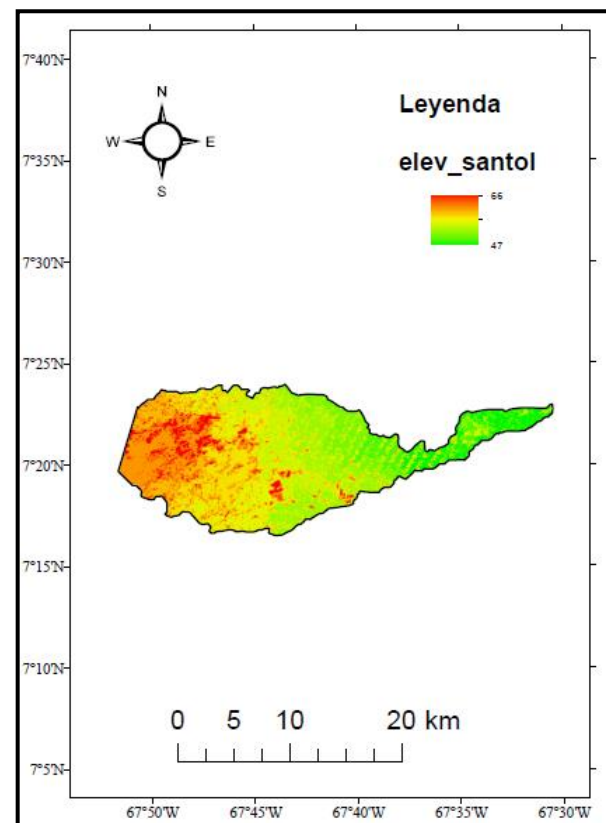
Figura 4.25: Mapa de la cuenca del Río Orinoco: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación

Tabla 4.27: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la duna de Santos Luzardo.

Duna	PENDIENTE				ELEVACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Santos Luzardo	0	2,901003	0,410947	0,364945	43	62	51,737804	3,175483



(a)



(b)

Figura 4.26: Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Pendiente b) Mapa de Elevación

4.4.1.2 RELIEVE Y PRECIPITACIÓN

La Tabla 4.28 resume los valores estadísticos obtenidos de los cálculos de relieve para cada una de las cuencas analizadas, los mayores relieves promedios a 1, 3, 5 y 7 kilómetros son registrados en la cuenca del río Parguaza con $168,53 \pm 111,39$; $332,96 \pm 172,65$; $439,04 \pm 194,03$ y $504,9 \pm 206,33$ metros, respectivamente. Seguida por la cuenca del río Cataniapo con valores de $119,56 \pm 92,14$; $234,4 \pm 124,46$; $317,2 \pm 137,58$ y $375,01 \pm 142,58$ metros. En la cuenca del río Meta se registran relieves de $31,93 \pm 95,24$; $63,71 \pm 182,29$; $95,51 \pm 265,57$ y $122,29 \pm 332,63$ metros seguido del río Orinoco con $14,63 \pm 24,82$; $29,44 \pm 45,57$; $39,38 \pm 58,29$ y $46,79 \pm 67,13$ metros y por último, la cuenca que posee menores valores de relieve es la duna de Santos Luzardo con apenas $5,45 \pm 2,36$; $8,94 \pm 2,51$; $10,86 \pm 2,19$ y $12,23 \pm 2,00$ metros.

Antes de calcular los otros atributos secundarios del terreno conocidos como índices de humedad, capacidad de transporte de sedimentos e índices de erosión, es necesario, mostrar la tasa de precipitación promedio anual obtenida durante el período 1998-2009 registrada por la NASA en su misión TRMM 2B31, y compilados por el Dr. Bodo Bookhagen de la Universidad de Santa Bárbara, California, una de las ventajas de este modelo TRMM, es que ha sido calibrado con estaciones que miden el caudal de agua en diversos sitios de Suramérica excepto en Venezuela. Así la Tabla 4.29 resume los valores de precipitación encontrados para cada una de las cuencas de estudio en este trabajo. En esta Tabla 4.29 se observa que la cuenca del río Parguaza es la que posee mayores valores de precipitación anual promedio de $292,12 \pm 52,63$ metros, seguido por las cuencas del río Cataniapo con $280,04 \pm 42,49$; río Orinoco con $210,62 \pm 46,12$; río Meta $157,52 \pm 39,43$ y la duna de Santos Luzardo con $180,74 \pm 18,36$ metros respectivamente.

A continuación se presentan los mapas de relieve y precipitación a 5km, generados con el programa ArcGIS.10.0 para cada una de las cuencas estudiadas, donde se aprecian de manera más fácil los atributos secundarios de relieve y precipitación.

Tabla 4.28. Valores estadísticos del relieve calculado a radios de 1, 3,5 y 7 kilómetros.

Cuenca	Relieve 1 km de radio				Relieve 3Km de radio				Relieve 5Km de radio				Relieve 7Km de radio			
	min	max	Med.	d.e	min	max	Med.	d.e	min	max	Med.	d.e	min	max	Med.	d.e
Cataniapo	0	601	119,56	92,14	0	620	234,4	124,46	0	789	317,18	137,58	0	852	375,01	142,58
Meta	0	1182	31,93	95,24	0	1716	63,71	182,29	0	2186	95,51	265,57	0	2429	122,29	332,63
Parguaza	0	869	168,53	111,39	0	1131	332,96	172,65	0	1310	439,04	194,03	0	1399	504,9	206,33
Orinoco	0	400	14,63	24,82	0	441	29,44	45,57	0	456	39,38	58,29	0	480	46,79	67,13
Santos Luzardo	0	15	5,45	2,36	0	15	8,94	2,51	0	15	10,86	2,19	0	17	12,23	2

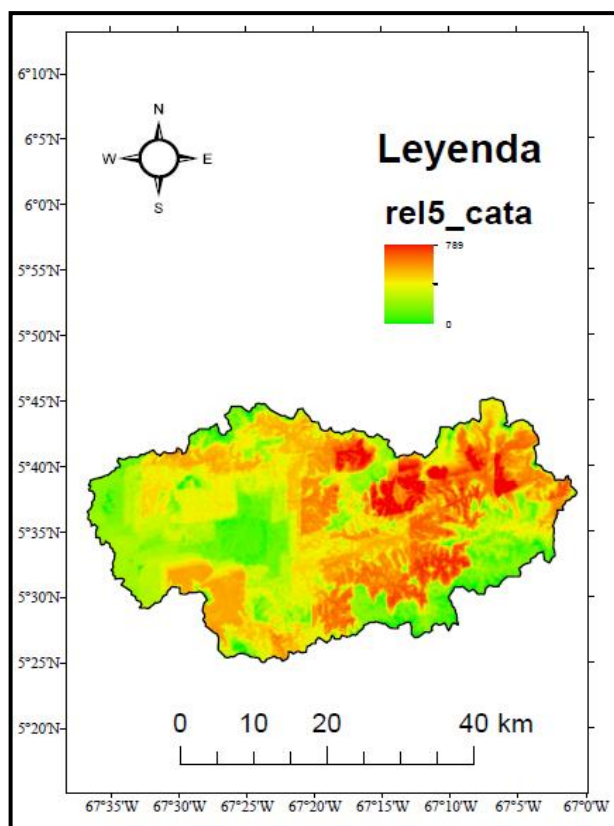
Tabla 4.29. Valores de precipitación anual promedio registrados en cada cuenca según el modelo
TRMM 2B31 para el período 1998-2009.

Cuenca	Relieve 5Km de radio				PRECIPITACION			
	min	max	Med.	d.e	min	max	Med.	d.e
Cataniapo	0	789	317,18	137,58	146,64	375,64	280,04	42,49
Meta	0	2186	95,51	265,57	9,06	449,52	157,52	39,43
Parguaza	0	1310	439,04	194,03	178,99	465,54	292,12	52,63
Orinoco	0	456	39,38	58,29	108,46	373,38	210,62	46,12
Santos Luzardo	0	15	10,86	2,19	42	101,83	67,78	18,36

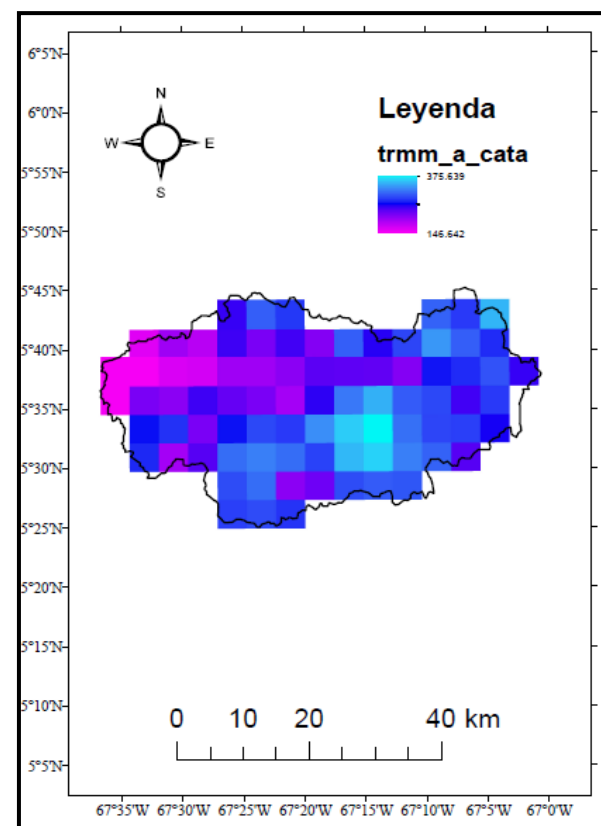
A continuación se presentan los mapas de relieve y precipitación a 5km, generados con el programa ArcGIS.10.0 para cada una de las cuencas estudiadas, donde se aprecian de manera más fácil los atributos secundarios de relieve y precipitación.

Tabla 4.30: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Cataniapo.

Cuenca	RELIEVE				PRECIPITACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Cataniapo	0	789	317,18	137,58	146,64	375,64	280,04	42,49



(a)

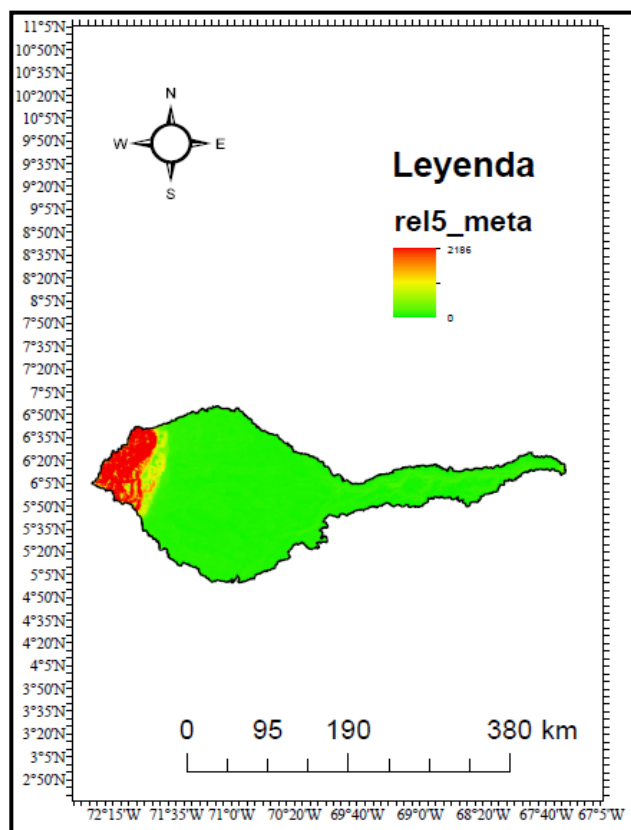


(b)

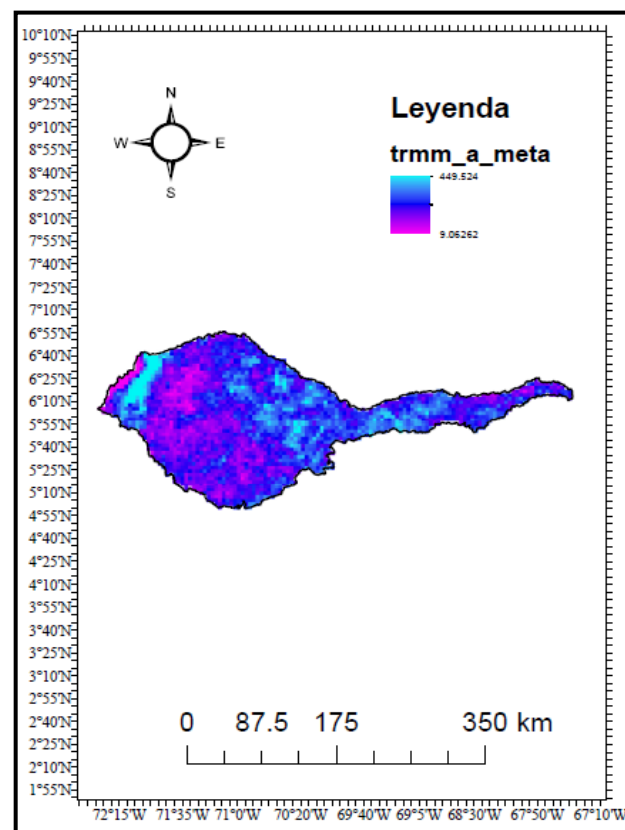
Figura 4.27: Mapa de la cuenca del Río Cataniapo: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación

Tabla 4.31: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Meta.

Cuenca	RELIEVE				PRECIPITACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Meta	0	2186	95,51	265,57	9,06	449,52	157,52	39,43



(a)

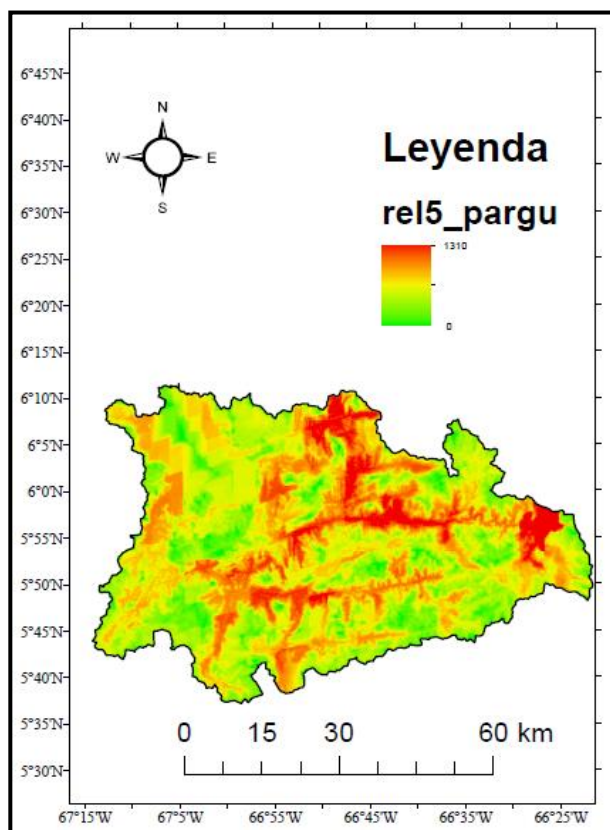


(b)

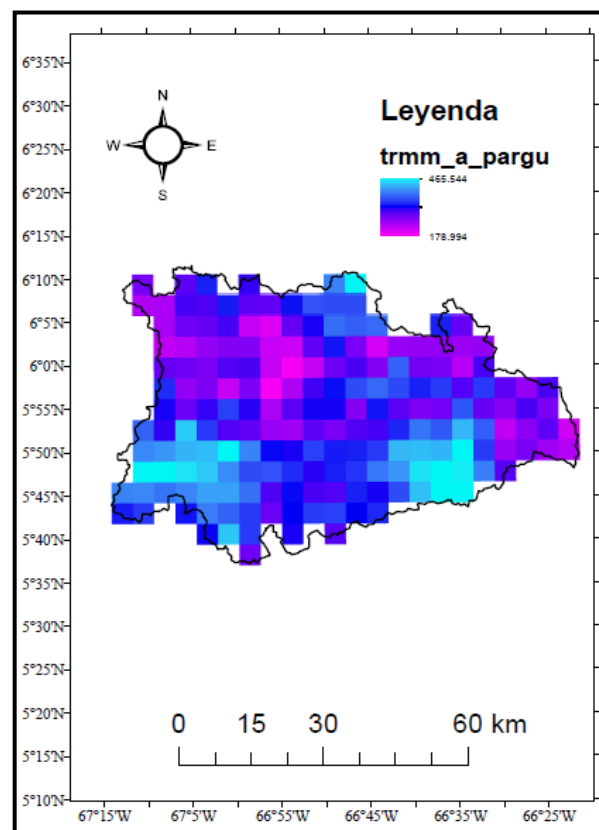
Figura 4.28: Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación

Tabla 4.32: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Parguaza.

Cuenca	RELIEVE				PRECIPITACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Parguaza	0	1310	439,04	194,03	178,99	465,54	292,12	52,63



(a)

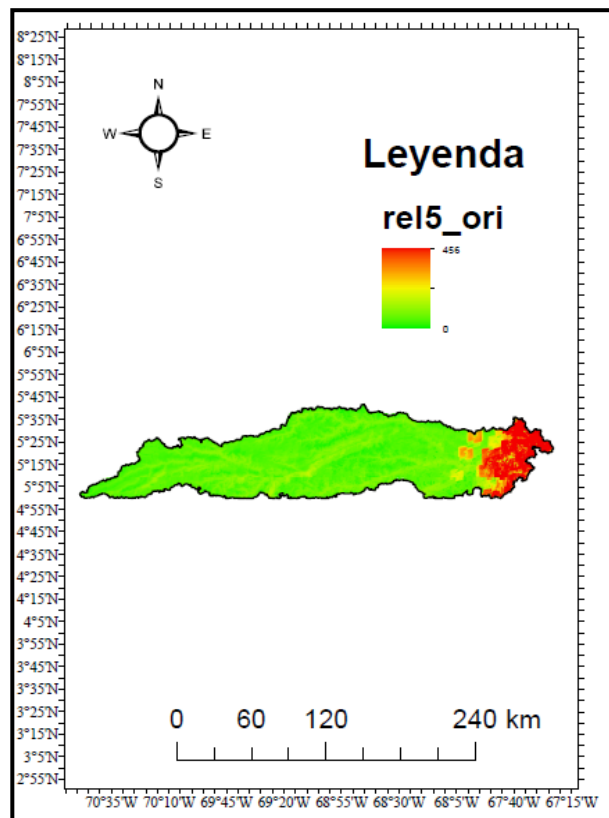


(b)

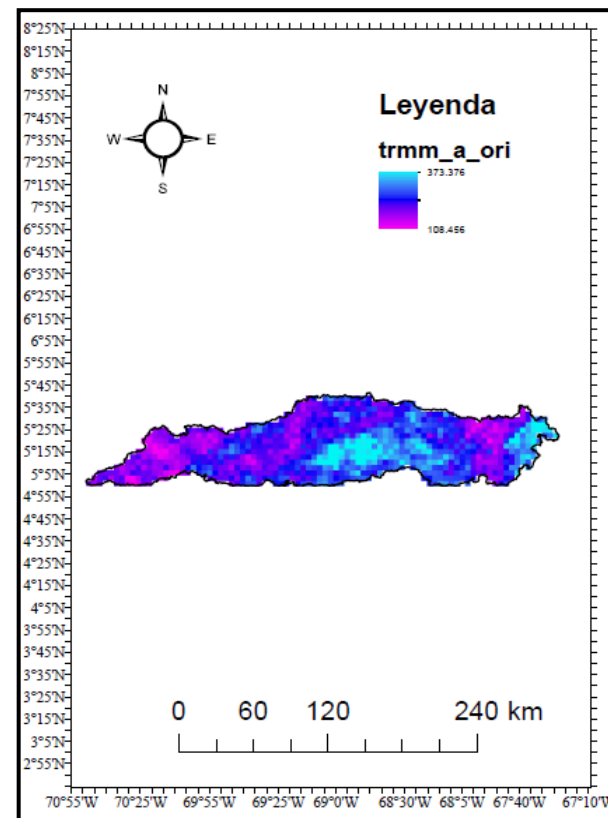
Figura 4.29: Mapa de la cuenca del Río Parguaza: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación

Tabla 4.33: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la cuenca del Río Orinoco.

Cuenca	RELIEVE				PRECIPITACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Orinoco	0	456	39,38	58,29	108,46	373,38	210,62	46,12



(a)

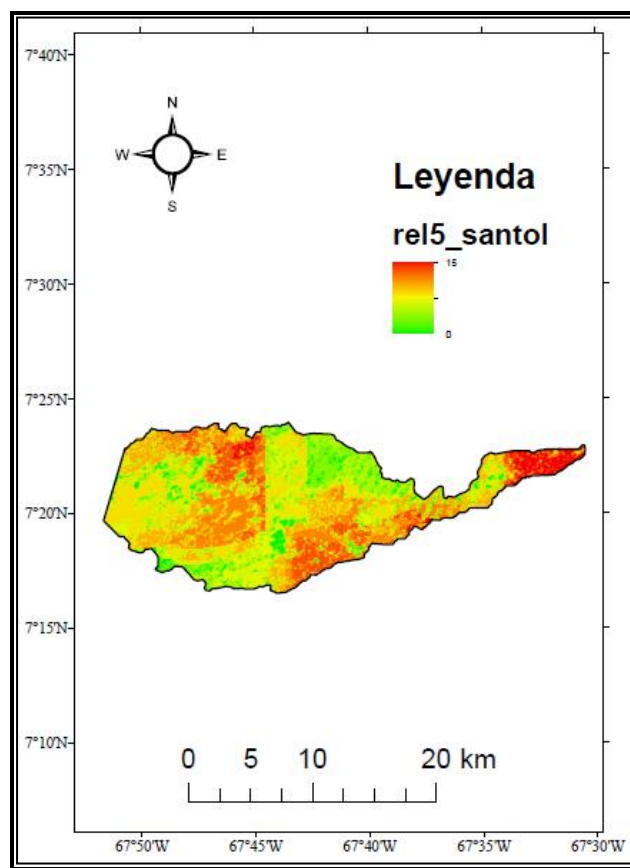


(b)

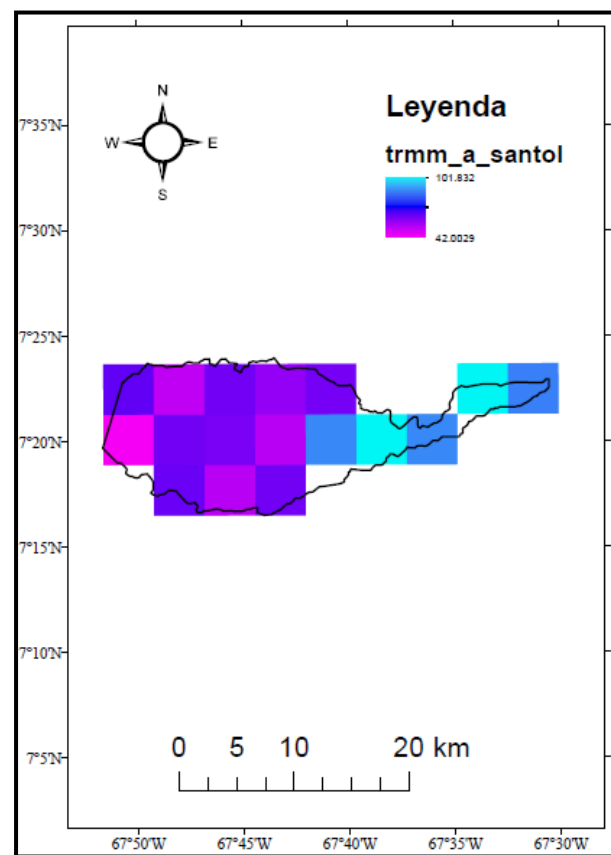
Figura 4.30: Mapa de la cuenca del Río Orinoco: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación

Tabla 4.34: Valores de los atributos del terreno de primer orden para la Duna de Santos Luzardo

Duna	RELIEVE				PRECIPITACION			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Santos Luzardo	0	15	10,86	2,19	42	101,83	67,78	18,36



(a)



(b)

Figura 4.31: Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Relieve b) Mapa de Precipitación

4.4.2 ATRIBUTOS SECUNDARIOS DEL TERRENO

4.4.2.1 INDICE DE HUMEDAD (WI)

Los índices de humedad son calculados usando la expresión: $WI = \ln(A/\tan S)$, donde A es el área de drenaje y S es la pendiente, este valor no tiene unidades, es decir, es adimensional. Cuando no se considera la precipitación, se dice que esta es uniforme y se denota este atributo como WI. Los valores de precipitación mostrados anteriormente fueron empleados para calcular los índices de humedad con precipitación (WIP). Así la Tabla 4.35, muestra los valores de índice de humedad (WI) obtenidos para cada una de las cuencas analizadas, los valores son muy parecidos entre sí, mientras que cuando es tomada en cuenta el patrón de precipitaciones los índices aumentan sus valores siendo las cuencas de Parguaza con $10804,68 \pm 634,99$ y Cataniapo con $10780,34 \pm 15389,13$ las que mayores valores presentan y la duna de Santos Luzardo con $12903,06 \pm 906,74$ quien posee menor valor de índice de humedad con precipitación.

Tabla 4.35. 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			
	min	max	Med.	d.e	min	max	Med.	d.e
Cataniapo	8930,4	12294,87	10780,34	501,9	11345,13	18053,23	15012,53	948,61
Meta	327,84	15728,58	10499,97	1066,42	1201,03	23379,76	13530,36	1774,71
Parguaza	7572,76	13404,83	10804,68	634,99	9653,96	20653,37	15389,7	1195,59
Orinoco	2441,15	12802,72	10531,16	807,06	3241,53	18385,62	13587,38	1265,91
Santos L.	6015,17	12032,53	10291,6	835,46	7171,52	14861,26	12903,06	906,74

A continuación se presenta el histograma realizado con los datos de la media de los índices de humedad (WI) e índice de humedad con precipitación (WIP) (Tabla 4.36) y se muestran los mapas generados con el programa ArcGIS.10.0 para cada una de las cuencas estudiadas, donde se aprecia de manera más comprensible los efectos que generan los índices de humedad sobre las cuencas.

Tabla 4.36: Se representan los valores de la media del índice de humedad (WI) e índice de humedad con precipitación (WIP) calculados por cada cuenca.

Cuenca	WI	WIP
Cataniapo	10780,34	15012,53
Meta	10499,97	13530,36
Parguaza	10804,68	15389,7
Orinoco	10531,16	13587,38
Santos Luzardo	10291,6	12903,06

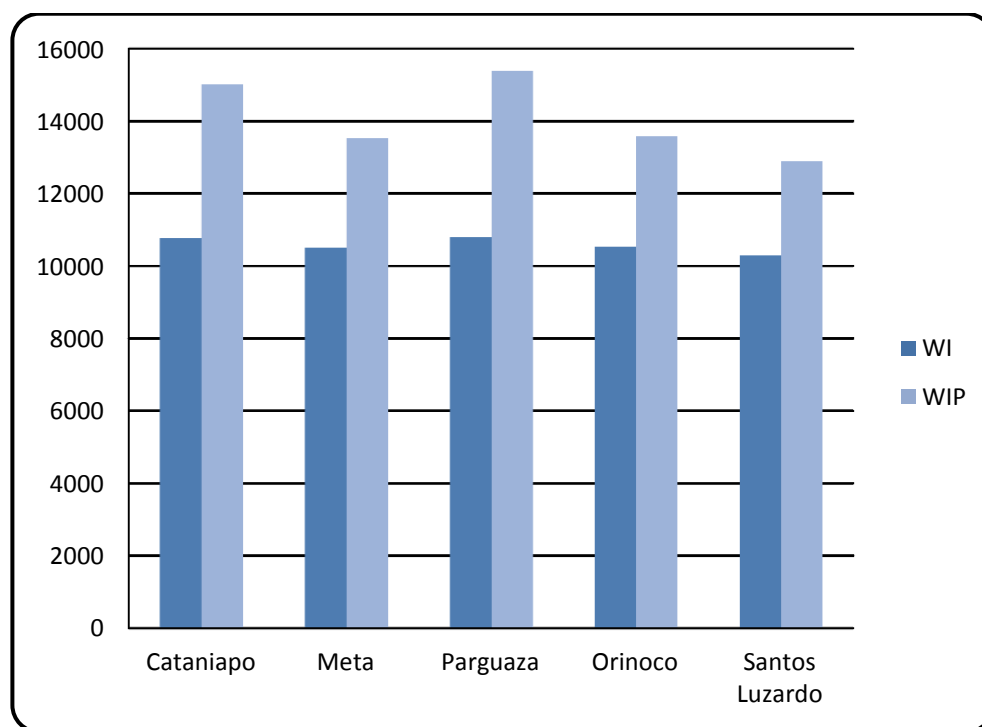
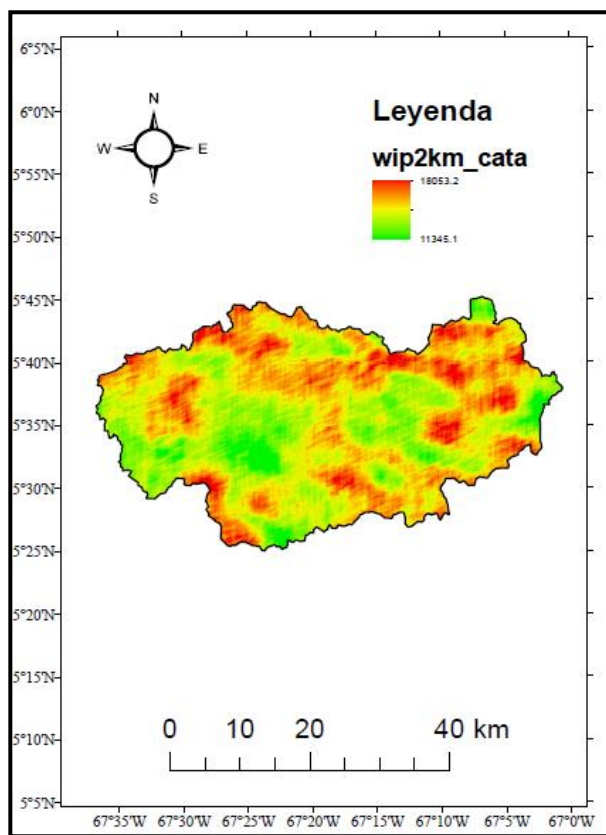


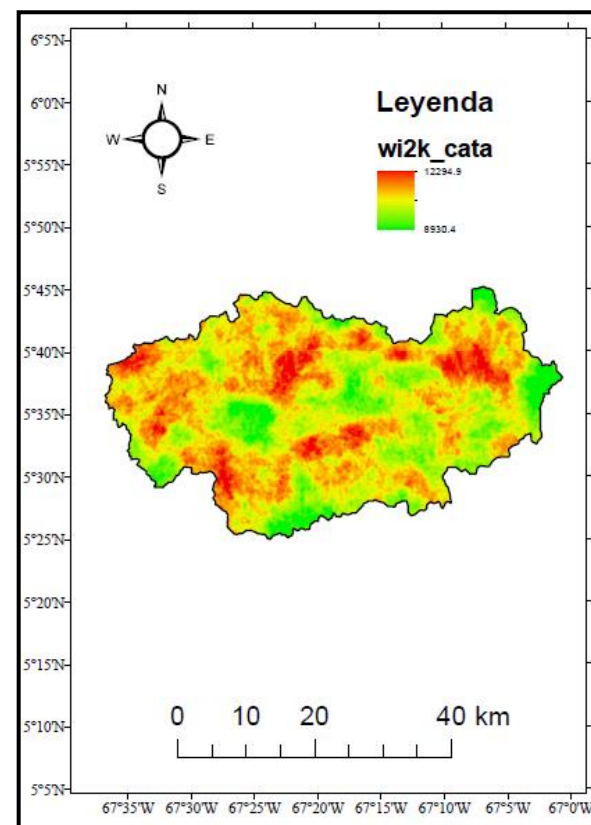
Figura 4.32. Comparación de los diferentes índices de erosión para cada una de las cuencas consideradas en este estudio.

Tabla 4.37. Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Cataniapo.

Cuenca	WI				WIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Cataniapo	8930,4	12294,87	10780,34	501,9	11345,13	18053,23	15012,53	948,61



(a)

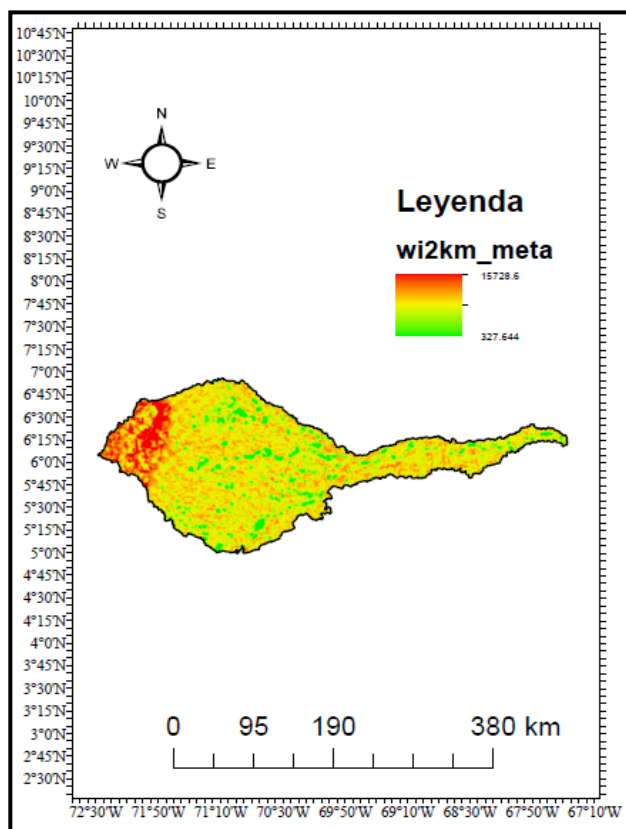


(b)

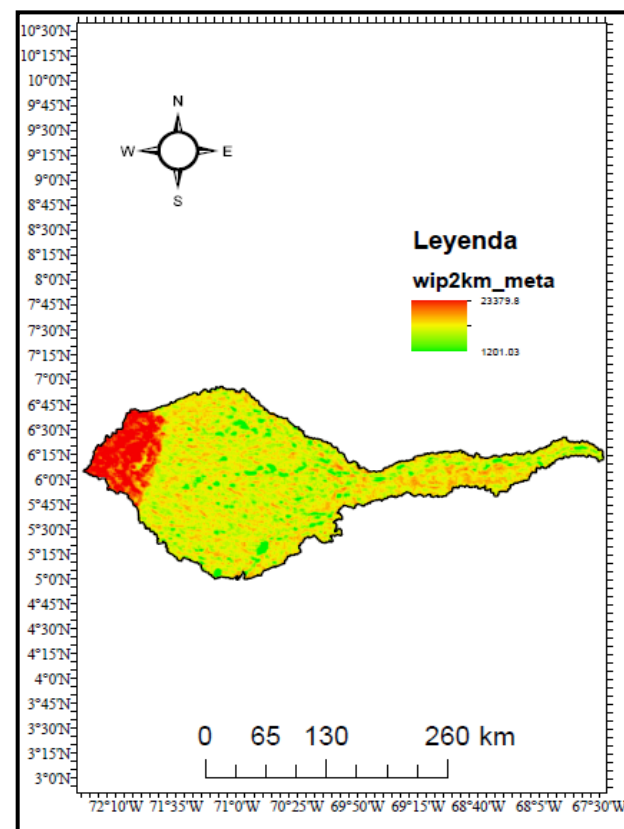
Figura 4.33: Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación

Tabla 4.38: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Meta.

Cuenca	WI				WIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Meta	327,84	15728,58	10499,97	1066,42	1201,03	23379,76	13530,36	1774,71



(a)

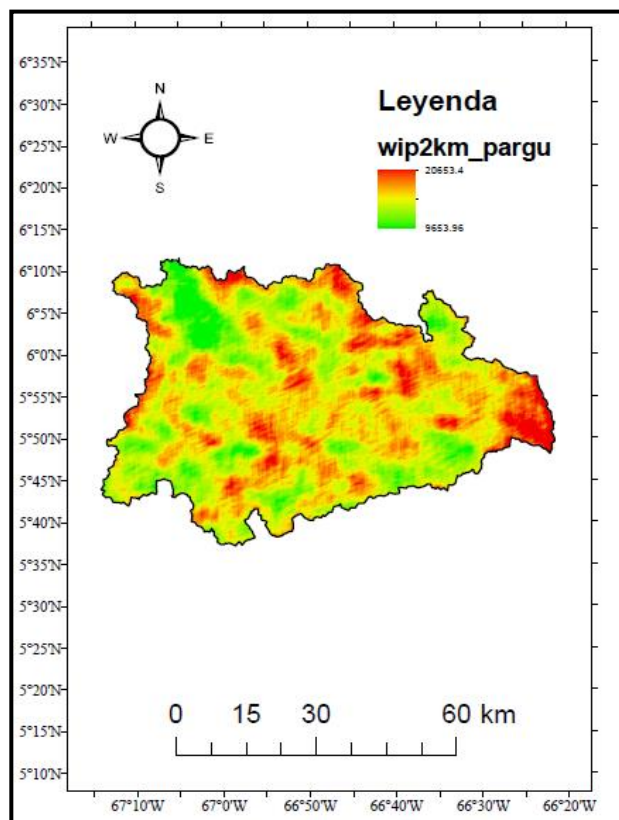


(b)

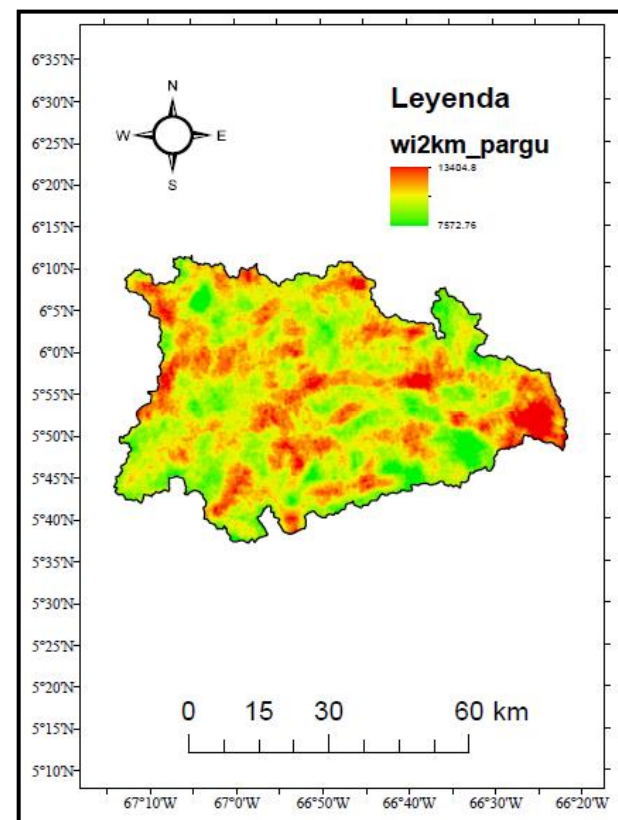
Figura 4.34: Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación

Tabla 4.39: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Parguaza.

Cuenca	WI				WIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Parguaza	7572,76	13404,83	10804,68	634,99	9653,96	20653,37	15389,7	1195,59



(a)

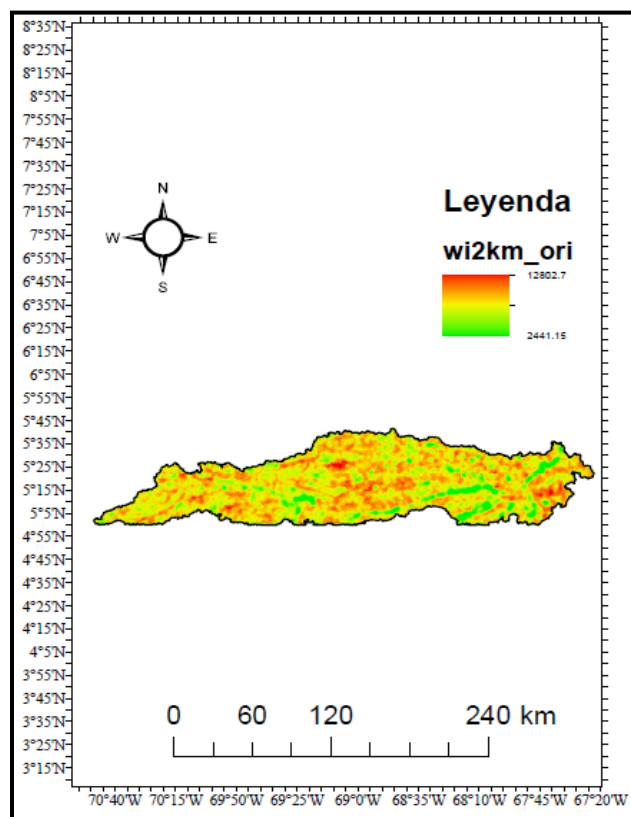


(b)

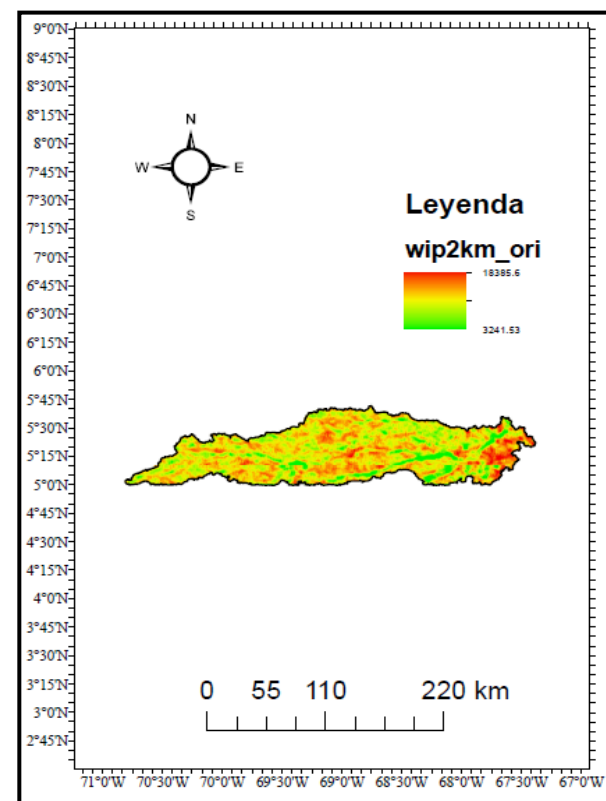
Figura 4.35: Mapa de la cuenca del Río Parguaza: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación

Tabla 4.40: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Orinoco.

Cuenca	WI				WIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Orinoco	2441,15	12802,72	10531,16	807,06	3241,53	18385,62	13587,38	1265,91



(a)

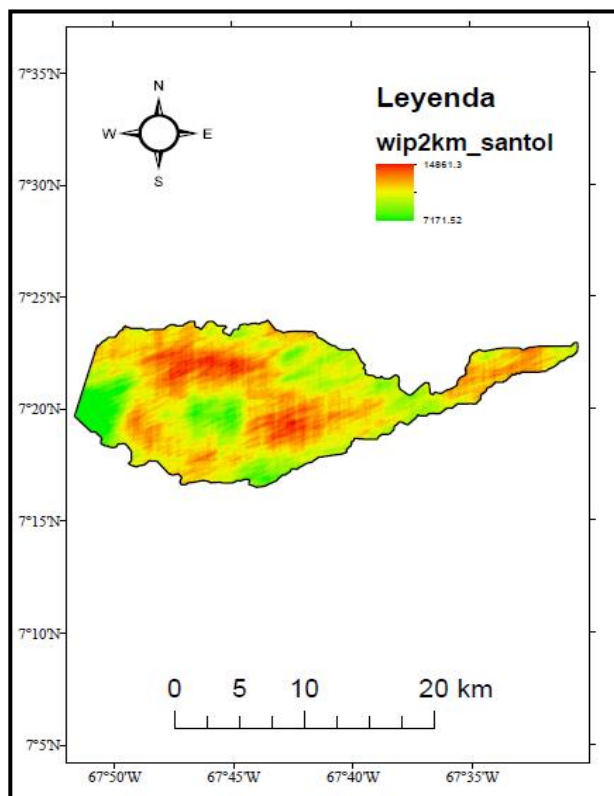


(b)

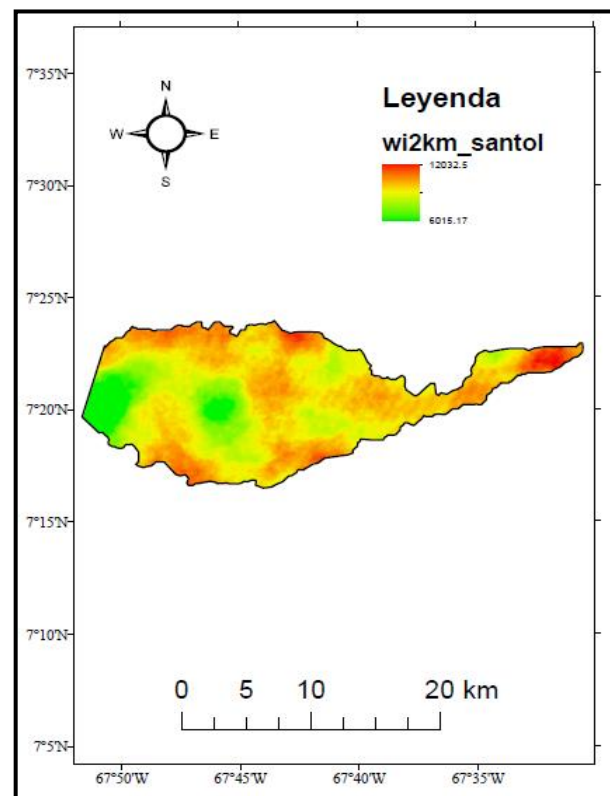
Figura 4.36: Mapa de la cuenca del Río Orinoco: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación

Tabla 4.41: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo.

Duna	WI				WIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Santos Luzardo	6015,17	12032,53	10291,6	835,46	7171,52	14861,26	12903,06	906,74



(a)



(b)

Figura 4.37: Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Índice de Humedad b) Mapa de Índice de Humedad con Precipitación

4.4.2.2 CAPACIDAD DE FLUJO DE SEDIMENTOS

La capacidad de transporte de sedimentos es calculado según la expresión:

$$STI = 2 \times \left(\frac{A_s}{22,13} \right) \times \left(\frac{\text{sen}(S)}{0,0896} \right)$$

Donde A_s es el área de drenaje y S es la pendiente del terreno. La Tabla 4.42 resume los valores encontrados en cada una de las cuencas asumiendo precipitación uniforme y precipitación variable. Las cuencas que registran mayor transporte de sedimentos son las cuencas del río Meta con $414.495,3 \pm 2.047,9$; río Orinoco $267.791,99 \pm 8.811,0$, río Parguaza $185.487,59 \pm 3.022.322$; la duna de Santos Luzardo $77.796,91 \pm 1.291.053$ y por último el río Cataniapo con valores de $56.313,69 \pm 814.843$. Cuando el patrón de precipitaciones es tomado en cuenta estos valores se hacen negativos, siendo la cuenca del río Cataniapo la que registra una mayor capacidad de transporte de sedimentos de $1.107.876 \pm 1.792.813$, esto se debe a que presenta mayor números de tributarios, asociado a fractura y fallas inactivas presentes en la zona.

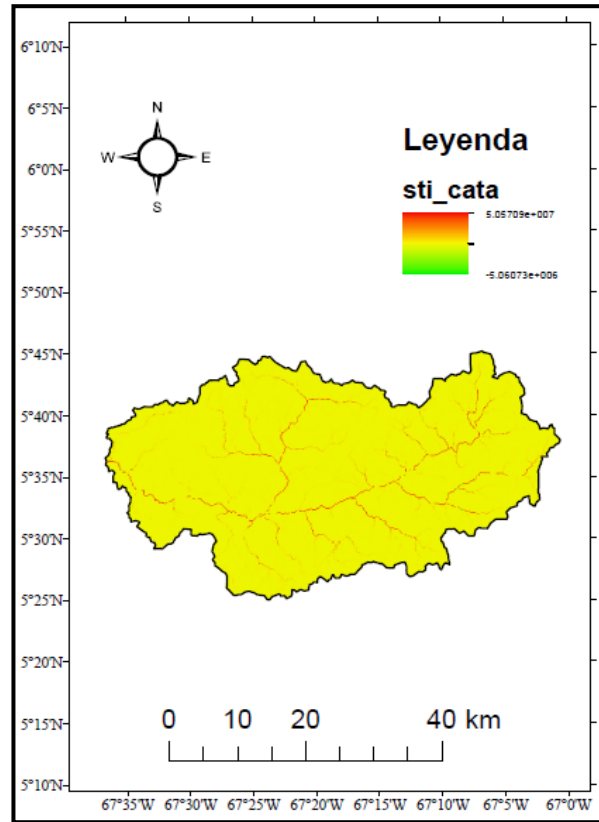
Tabla 4.42. Capacidad de transporte de sedimentos calculada para cada una de las cuencas con precipitación uniforme (STI) y con precipitación variable (STIP) según los TRMM.

Cuenca	STI				STIP			
	min	max	Med.	d.e	min	max	Med.	d.e
Cataniapo	-5060728	5,1E+07	56313,69	814843	-97039472	97038152	1107876	1792813
Meta	-5,9E+07	3,7E+09	414495,3	2047970	-97039480	97039480	-200441,66	6971941
Parguaza	-1,2E+07	2,1E+08	185487,59	3022322	-97039480	97039400	-2582317,36	2212826
Orinoco	-2245710	1,4E+09	267791,99	8811032	-97039192	96455072	-102153,18	5291920
Santos Luzardo	0	6,3E+07	77796,91	1291053	-30977384	22970862	-91191,99	1731984

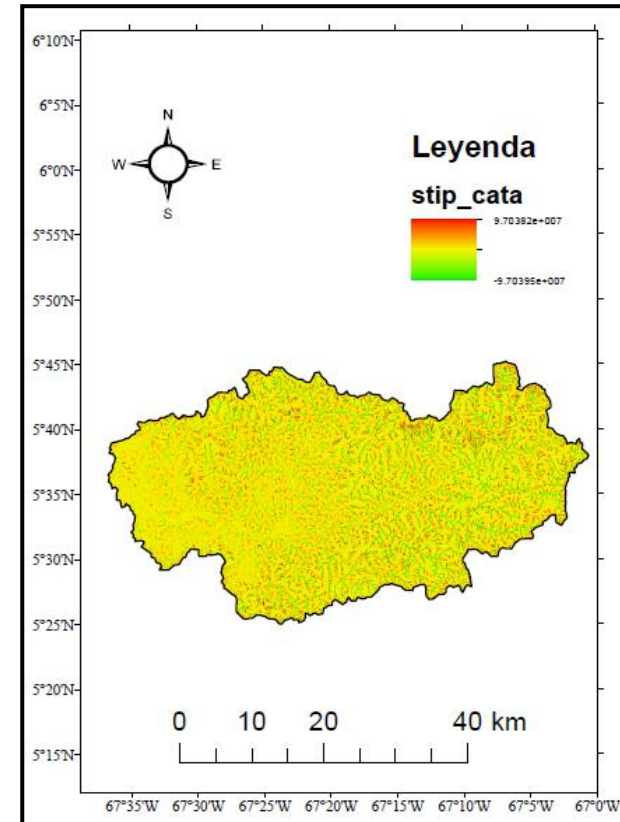
A continuación se presentan los mapas generados en ArcGIS 10.0 a partir de los cálculos de índices de capacidad de transporte de sedimentos (STI) e índice de capacidad de transporte de sedimento (STIP) para cada una de las cuencas estudiadas, donde se aprecia de manera más comprensible los efectos que generan los índices de capacidad de sedimentación sobre las cuencas.

Tabla 4.43: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Cataniapo.

Cuenca	STI				STIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Cataniapo	-5060727,5	50570916	56313,69	814843	-97039472	97038152	1107876	1792813



(a)

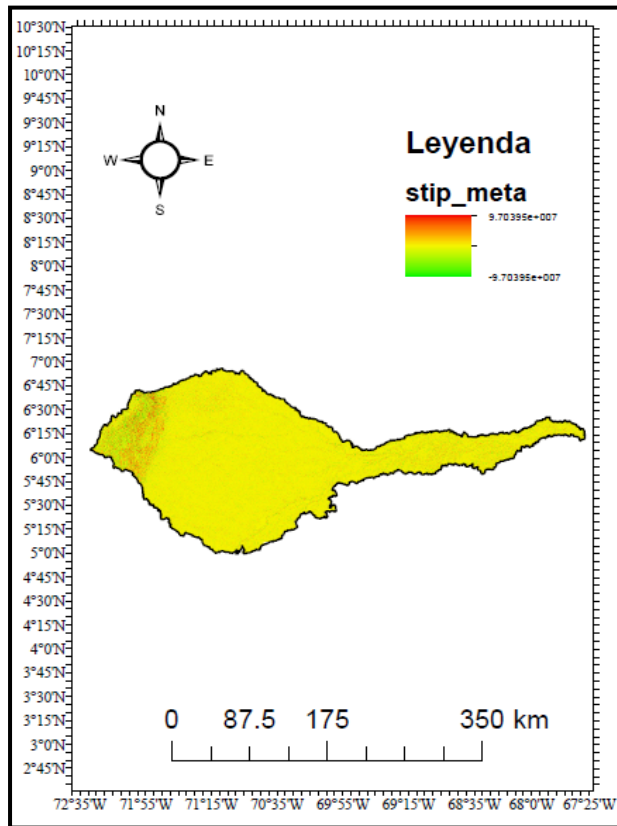


(b)

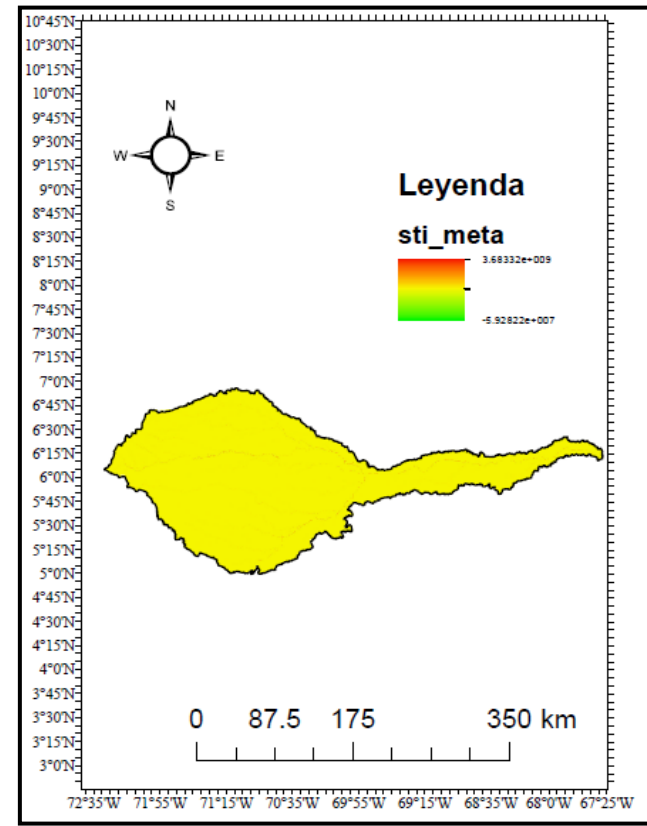
Figura 4.38: Mapa de la cuenca del Río Cataniapo: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación

Tabla 4.43: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Meta.

Cuenca	STI				STIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Meta	-59282204	3683318016	414495,3	2047970	-97039480	97039480	-200441,66	6971941



(a)

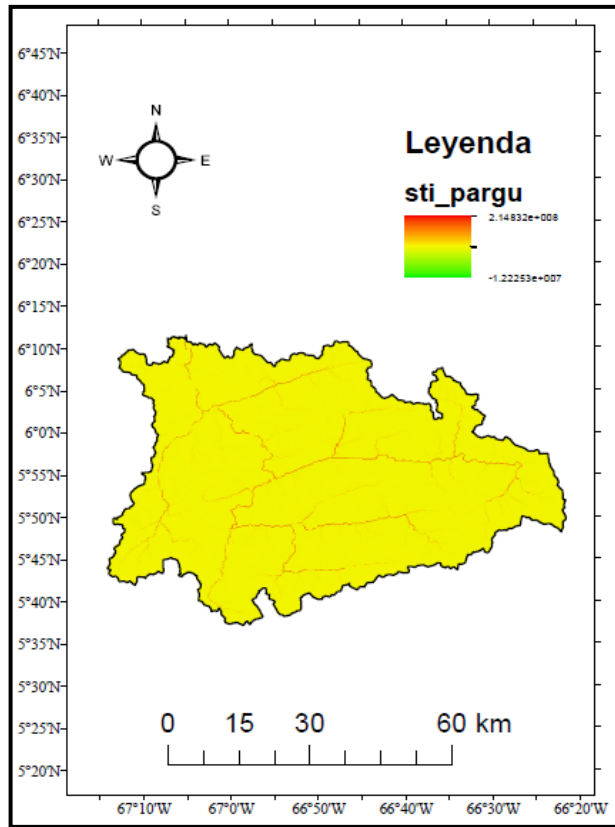


(b)

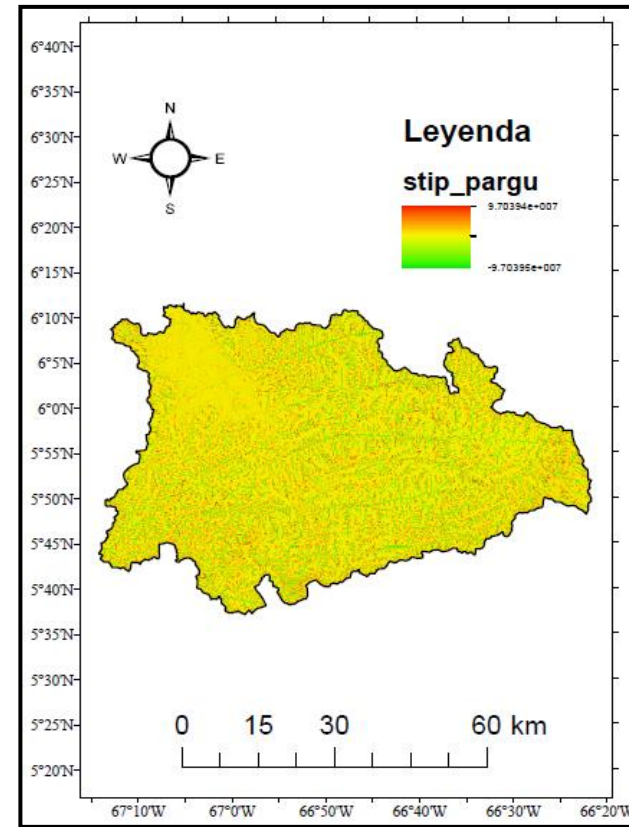
Figura 4.39. Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación

Tabla 4.44: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Parguaza.

Cuenca	STI				STIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Parguaza	-12225253	214831616	185487,59	3022322	-97039480	97039400	-2582317,36	2212826



(a)

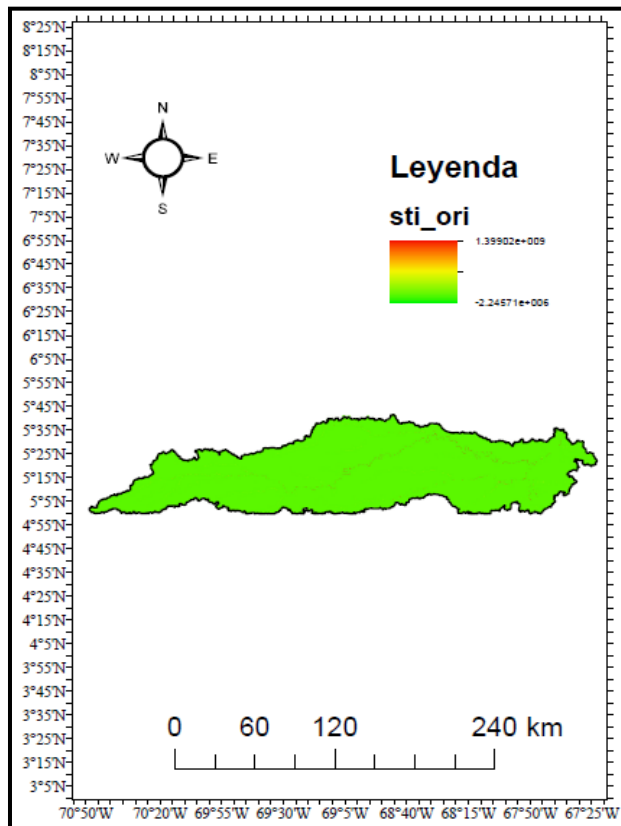


(b)

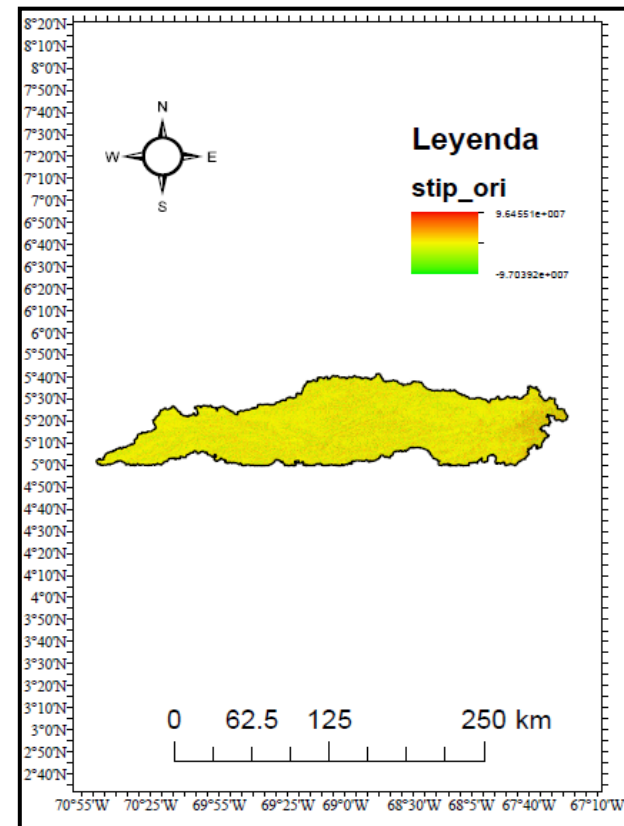
Figura 4.40: Mapa de la cuenca del Río Parguaza: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación

Tabla 4.45: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Orinoco.

Cuenca	STI				STIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Orinoco	-2245709,75	1399021696	267791,99	8811032	-97039192	96455072	-102153,18	5291920



(a)

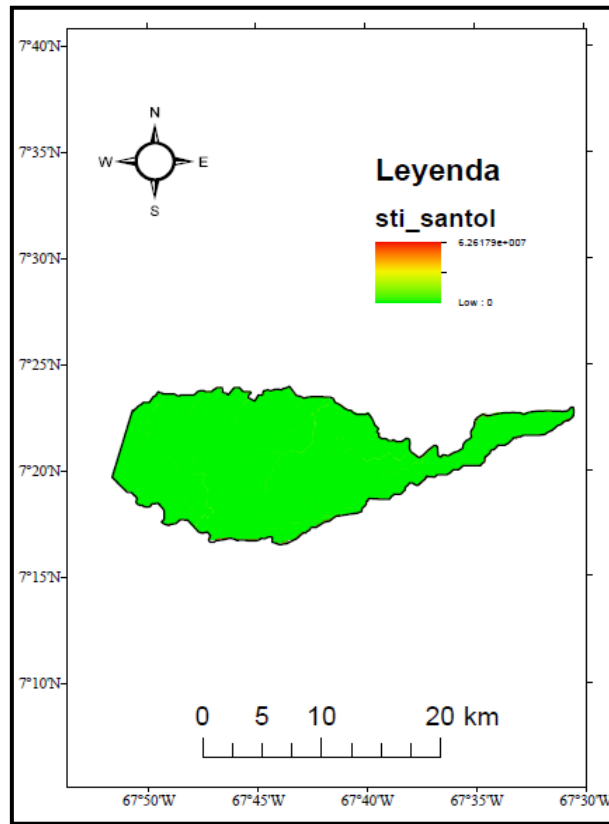


(b)

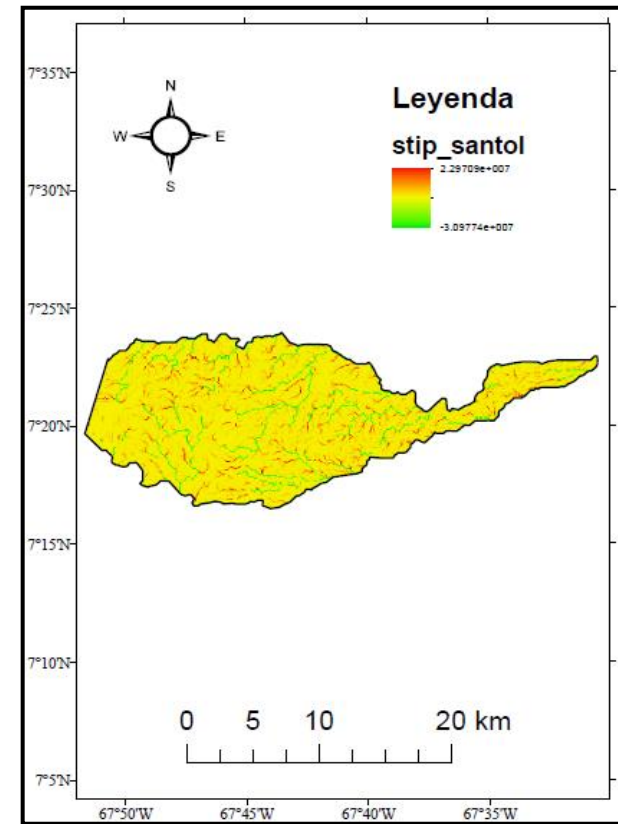
Figura 4.41: Mapa de la cuenca del Río Orinoco: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación

Tabla 4.46: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo

Duna	STI				STIP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Santos Luzardo	0	62617912	77796,91	1291053	-30977384	22970862	-91191,99	1731984



(a)



(b)

Figura 4.42: Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento b) Mapa de Índice de Flujo de Sedimento con Precipitación

4.4.2.3 PODER DE FLUJO TOTAL (TSP), PODER DE FLUJO UNITARIO (USP), PODER DE FLUJO DE CIZALLA (SSP)

La Tabla 4.47 resume los valores de índices de erosión total, como son poder de flujo total (TSP), poder de flujo unitario (USP) y poder de flujo de cizalla (SSP) para precipitación uniforme y para valores de índices de erosión con precipitación variable, poder de flujo con precipitación (TSPP), poder de flujo unitario con precipitación (USPP) y poder de flujo total con precipitación (TSPP) tomando en cuenta el modelo de precipitaciones TRMM anteriormente mencionado. Las unidades para estos índices de erosión son unidades de energía por unidad de tiempo, es decir, Joules/segundos.

Los índices de erosión anteriormente presentados son mostrados en forma de mapas en las Figuras (4.44a, hasta 4.60a) Nótese que en la parte derecha de cada una de estas Figuras (4.44b, hasta 4.60b) que los índices de erosión aumentan cuando se incorpora el valor de precipitación. Los valores obtenidos de TSP para cada cuenca ordenados de mayor a menor erosión son: $432.497,63 \pm 21.358.828$; $273.681 \pm 9.197.602$; $239.844,16 \pm 3.834.425$; $77.326,06 \pm 1.285.652$ y $67.386,57 \pm 895.681,9$ para los ríos Meta, Orinoco, Parguaza, la duna de Santos Luzardo y el río Cataniapo respectivamente. Los valores de USP uniforme para las cuencas de los ríos Parguaza, Cataniapo, Meta, Orinoco y por último, la duna de Santos Luzardo arrojan valores como son $44,12 \pm 150,80$; $25,62 \pm 70,62$; $11,45 \pm 128,06$; $6,59 \pm 93,71$ y $3,07 \pm 26,53$ siendo este último valor correspondiente a la duna de Santos Luzardo. Con respecto al índice SSP la cuenca de los ríos Parguaza, Cataniapo presentan valores promedios más altos $9,02 \pm 13,99$ y $6,33 \pm 9,18$ mientras que las cuencas de los ríos Meta, Orinoco y la duna de Santos Luzardo disminuyen un orden de magnitud ubicándose entre $2,38 \pm 9,23$ y $1,04 \pm 3,70$.

Cuando se comparan los valores, la cuenca del río Parguaza es la que posee mayor índice TSPP con precipitación variable: $8.283.653,47 \pm 9.039.985$, las cuencas de los ríos Cataniapo y Meta poseen valores intermedios entre $5.101.058,53 \pm$

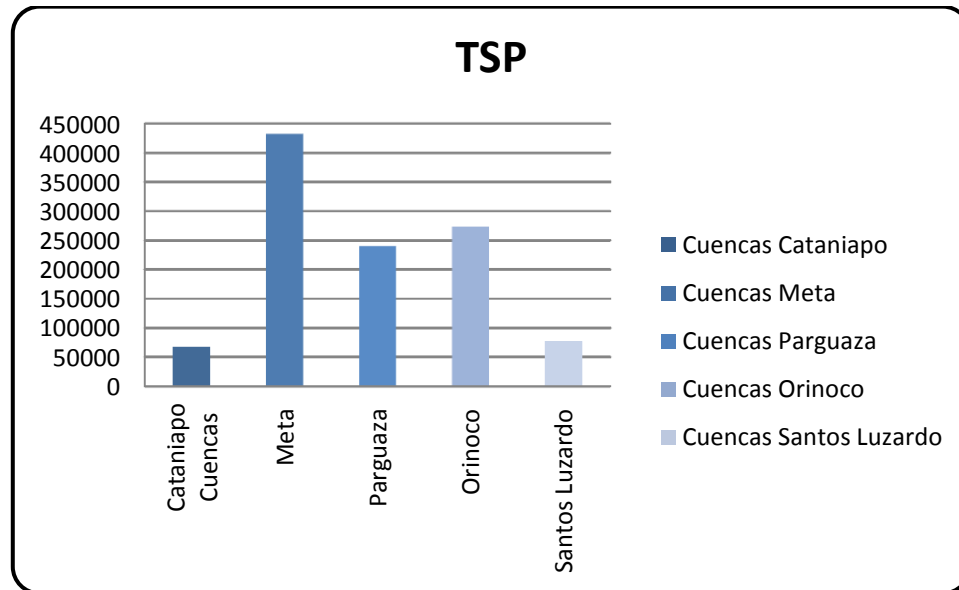
6.070.479 y $1.035.828,73 \pm 3.805.886$, el río Orinoco posee los menores valores de TSPP siendo de $21.427,03 \pm 9.922.420$. Esta misma relación se mantiene para los índices de erosión USPP con precipitación variable, siendo el río Parguaza el que mayor tasa de erosión con precipitación tiene: seguido por los ríos Cataniapo y Meta con valores muy similares, mientras que la cuenca de la duna de Santos Luzardo presenta el menor valor de erosión USPP. Cuando el índice de erosión SSPP con precipitación es calculado estas relaciones se aproximan, para las cuencas de Parguaza, Cataniapo mientras que la cuenca del río Meta y Orinoco presentan valores intermedios y la cuenca de la duna de Santos Luzardo presenta los menores valores SSP.

Tabla 4.47. Valores de índice de erosión para cada una de las cuencas con precipitación uniforme y con precipitación variable según los TRMM. TSP se refiere a Poder de flujo total; USP es el Poder de flujo unitario y SSP es el Poder de flujo de cizalla.

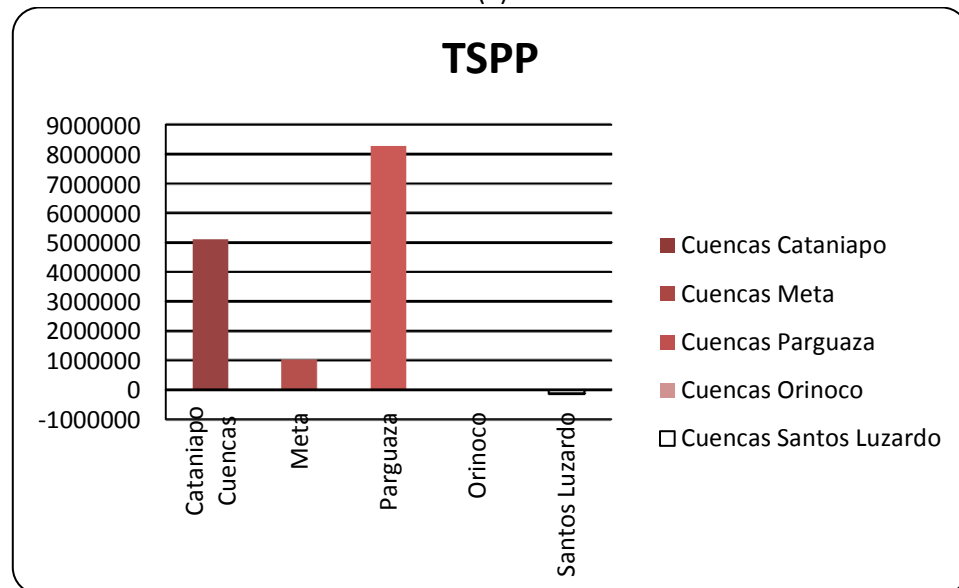
Cuenca			TSP			TSPP		
	min	max	mean	d.e	min	max	mean	d.e
Cataniapo	0	61147144	67386,578	895681,88	-3099788288	129745408	5101058,53	6070479
Meta	0	5058414100	432497,63	21358828	-3995482624	2561149184	1035828,73	3805886
Parguaza	0	293227140	239844,16	3834424,5	-3441121792	1591037184	8283653,47	9039985
Orinoco	0	1665685100	273681	9197602	-1043108928	645742336	21427,03	9922420
Santos Luzardo	0	62571136	77326,063	1285651,8	-62517616	33075490	-133004,58	3010778
Cuenca			USP			USPP		
	min	max	mean	d.e	min	max	mean	d.e
Cataniapo	0	5186,0142	25,62171	70,629311	0	38103,02	1020,41	1688,25
Meta	0	24756,672	11,450224	128,06596	0	60800,73	241,22	1093,14
Parguaza	0	7882,9292	44,119743	150,80975	0	45456,18	1562,01	2188,29
Orinoco	0	12391,16	6,594861	93,711868	0	14532,85	99,41	278,95
Santos Luzardo	0	1182,651	3,075749	26,531919	0	906,91	22,41	46,18
Cuenca			SSP			SSPP		
	min	max	mean	d.e	min	max	mean	d.e
Cataniapo	0	299,60965	6,335635	9,188972	0	1132,33	76,67	94,32
Meta	0	849,43109	2,385641	9,239634	0	1546,22	20,4	57,16
Parguaza	0	396,08807	9,020145	13,996779	0	1273,68	105,68	115,74
Orinoco	0	535,4776	1,723041	6,951819	0	595,53	14,41	24,52
Santos Luzardo	0	111,83328	1,045201	3,704577	0	93,69	5,49	8,37

Tabla 4.48: Representa la media del poder de flujo de total por cuenca (TSP) y con precipitación (TSPP).

Atributos del terreno de primer orden	Cuencas				
	Cataniapo	Meta	Parguaza	Orinoco	Santos Luzardo
TSP	5101058,53	1035828,73	8283653,47	21427,03	-133004,58
TSP	67386,578	432497,63	239844,16	273681	77326,063



(a)

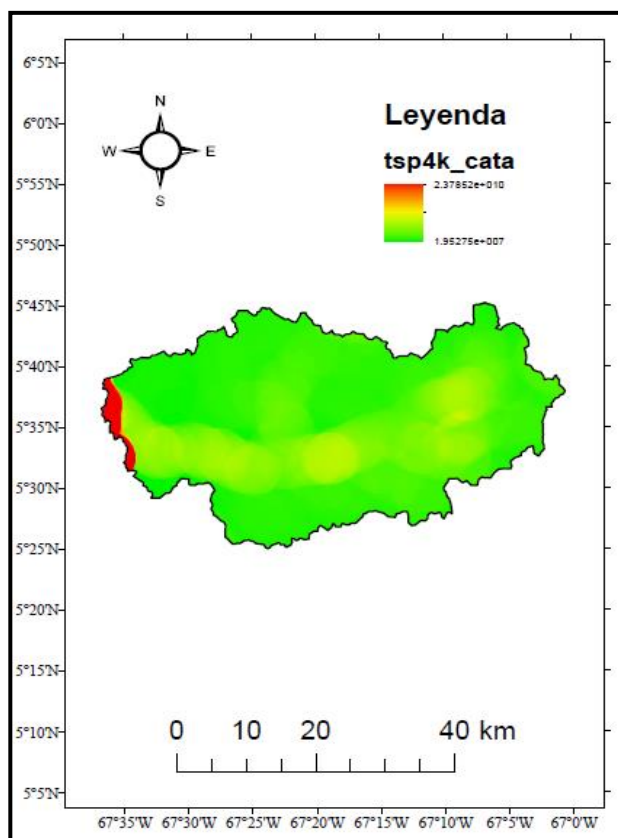


(b)

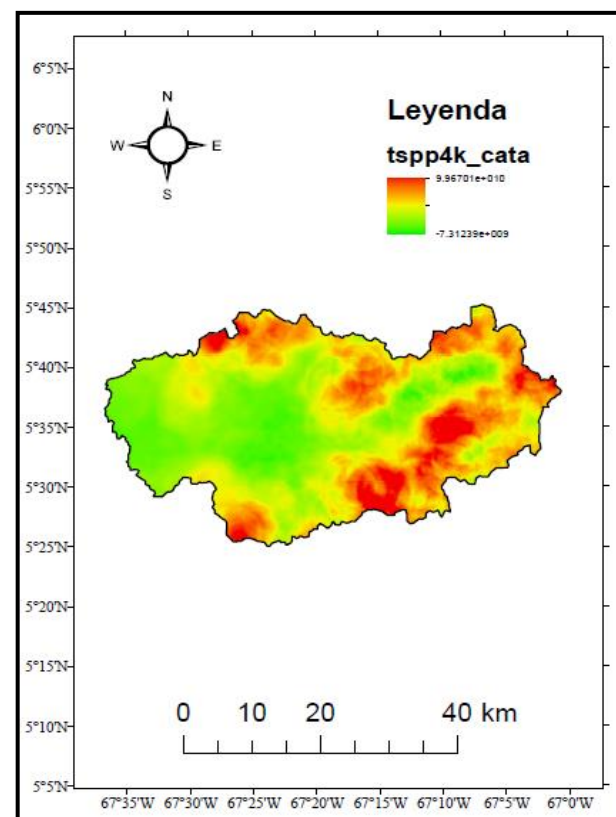
Figura 4.43: Histogramas que representan la media del poder de flujo total (TSP) e poder de flujo total con precipitación (TSPP) para cada cuenca estudiada.

Tabla 4.49: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Cataniapo.

Cuenca	TSP				TSSP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Cataniapo	0	61147144	67386,578	895681,88	-3099788288	129745408	5101058,53	6070479



(a)

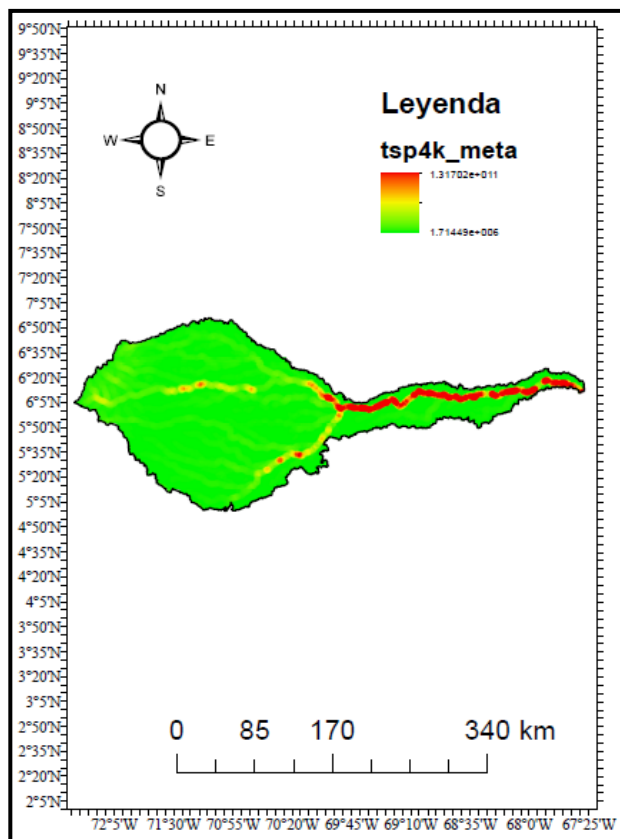


(b)

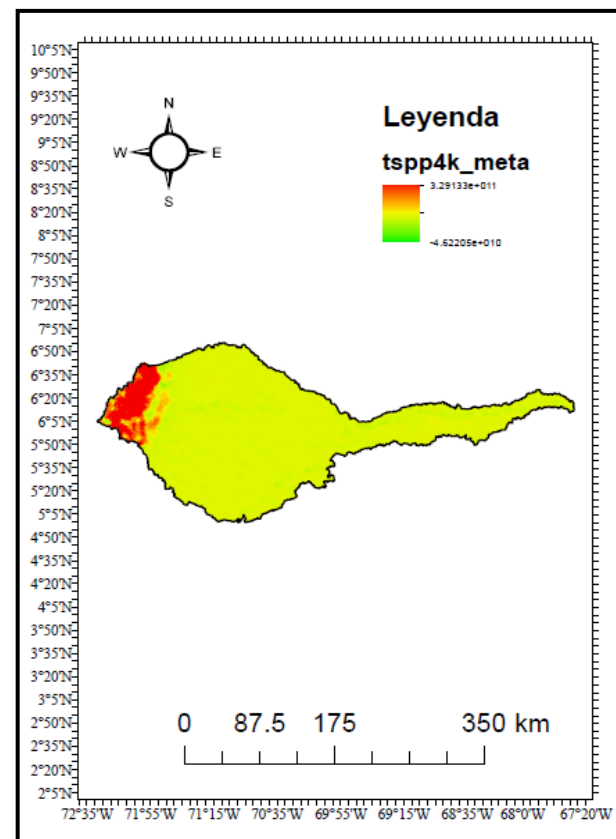
Figura 4.44: Mapa de la cuenca del Río Cataniapo: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación

Tabla 4.50: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Meta

Cuenca	TSP				TSSP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Meta	0	5058414100	432497,63	21358828	-3995482624	2561149184	1035828,73	3805886



(a)

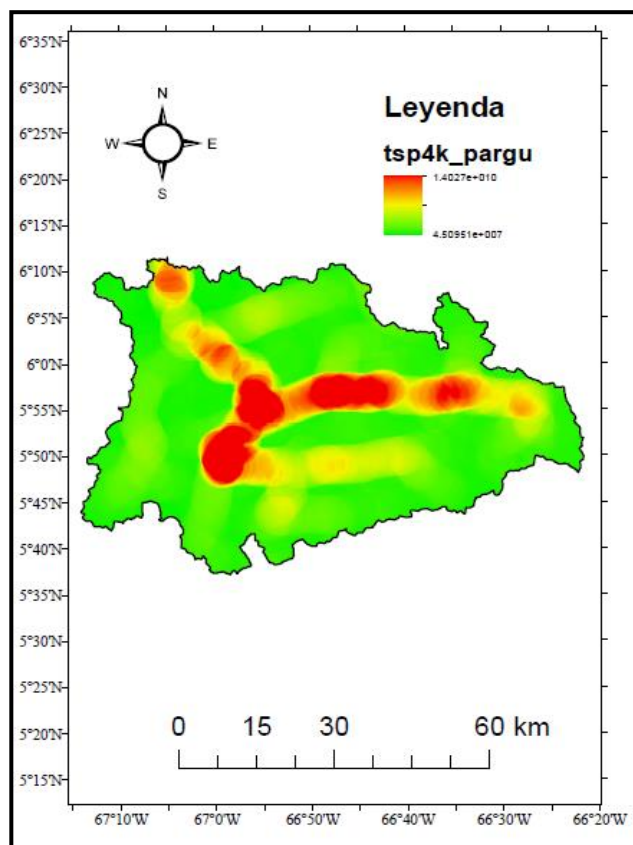


(b)

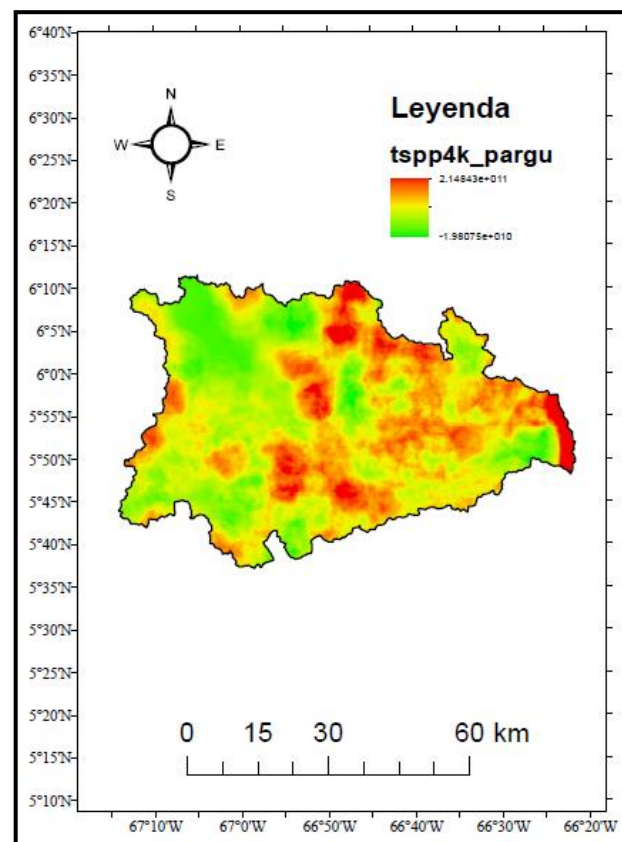
Figura 4.45: Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación

Tabla 4.51: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Parguaza.

Cuenca	TSP				TSSP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Parguaza	0	293227140	239844,16	3834424,5	-3441121792	1591037184	8283653,47	9039985



(a)

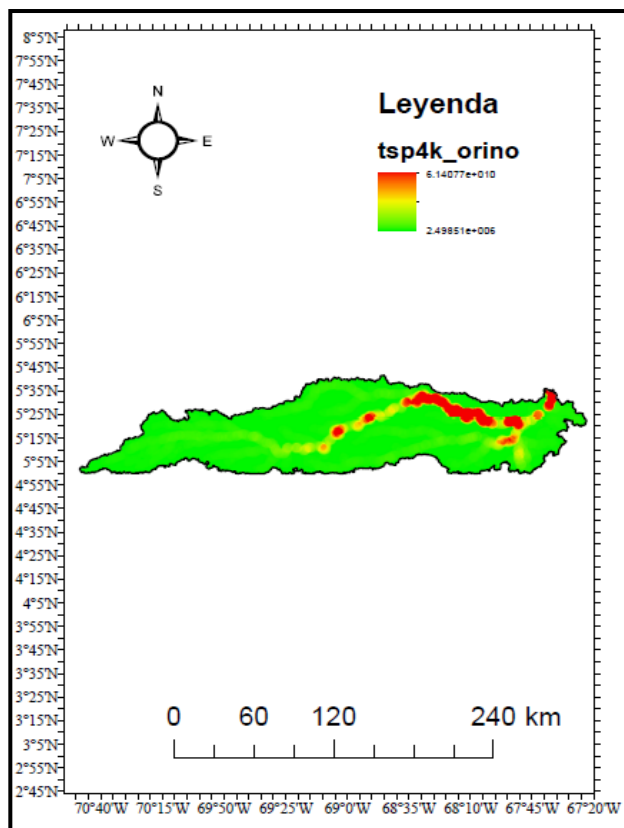


(b)

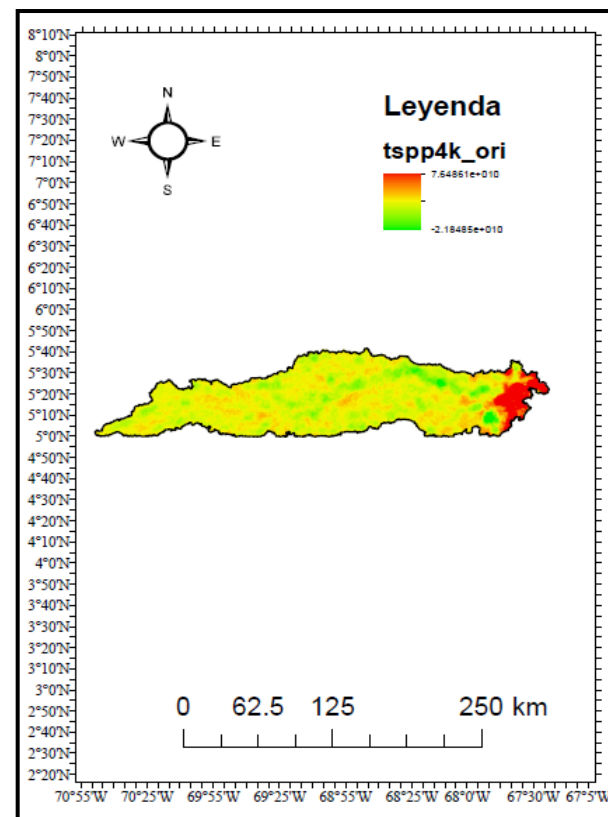
Figura 4.46: Mapa de la cuenca del Río Parguaza: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación

Tabla 4.52: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Orinoco.

Cuenca	TSP				TSSP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Orinoco	0	1665685100	273681	9197602	-1043108928	645742336	21427,03	9922420



(a)

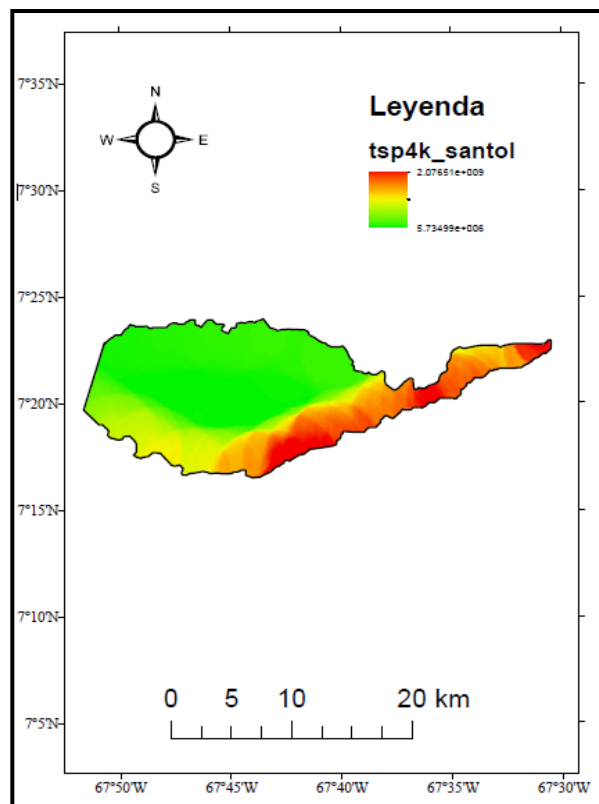


(b)

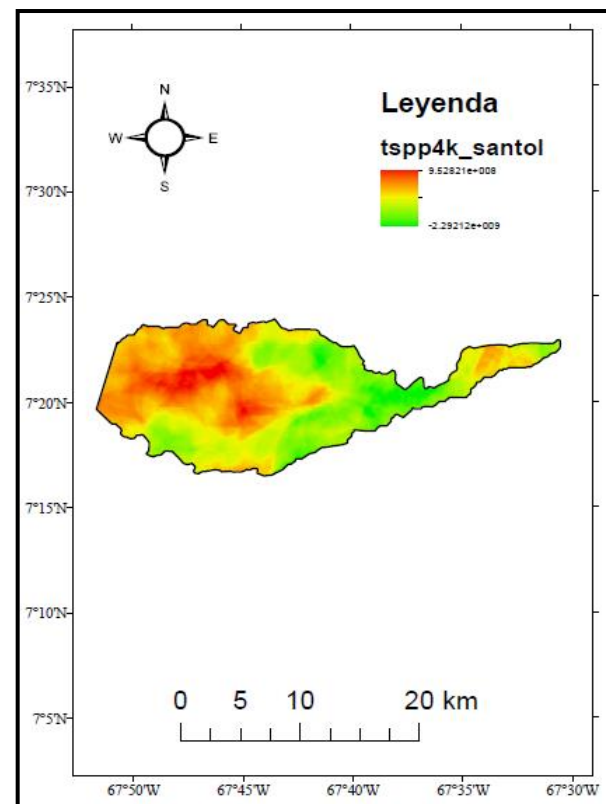
Figura 4.47: Mapa de la cuenca del Río Orinoco: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación

Tabla 4.53: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo.

Duna	TSP				TSSP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Santos Luzardo	0	62571136	77326,063	1285651,8	-62517616	33075490	-133004,58	3010778



(a)

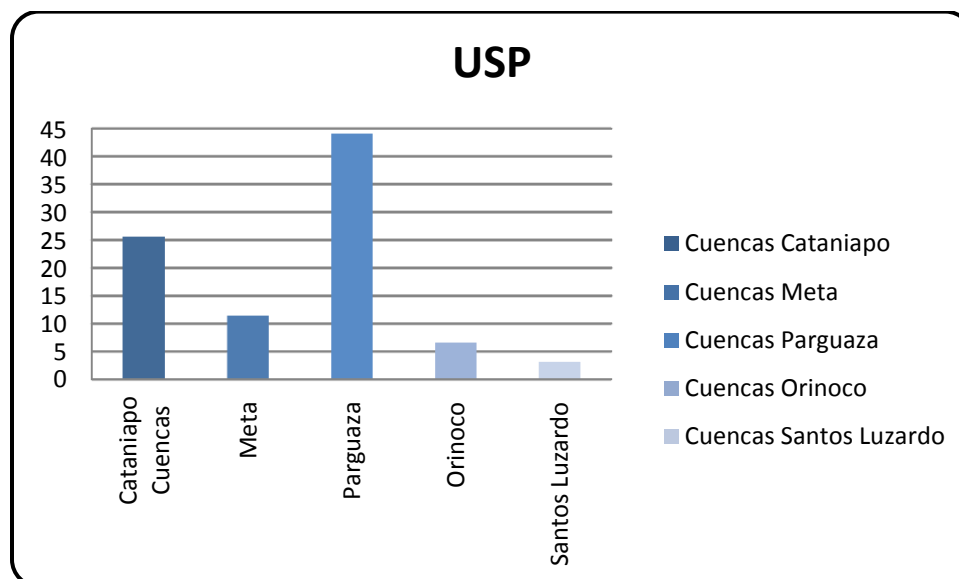


(b)

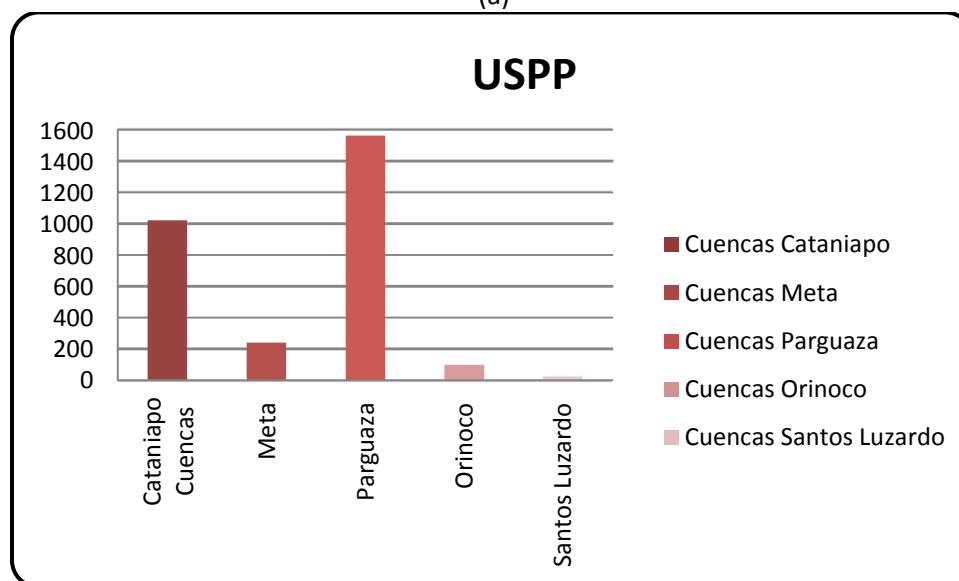
Figura 4.48: Mapa de la cuenca de Santos Luzardo: a) Mapa de Poder de Flujo Total b) Mapa de Poder de Flujo Total con Precipitación

Tabla 4.54: Representa la media del poder de flujo Unitario por cuenca (USP) y con precipitación (USPP).

Atributos del terreno de primer orden	Cuencas				
	Cataniapo	Meta	Parguaza	Orinoco	Santos Luzardo
USP	25,62171	11,450224	44,119743	6,594861	3,075749
USPP	1020,41	241,22	1562,01	99,41	22,41



(a)

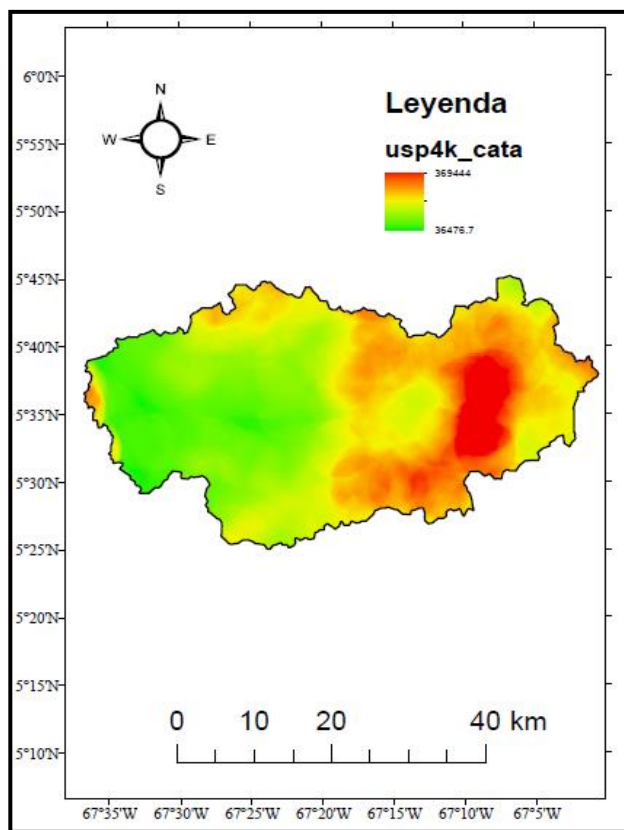


(b)

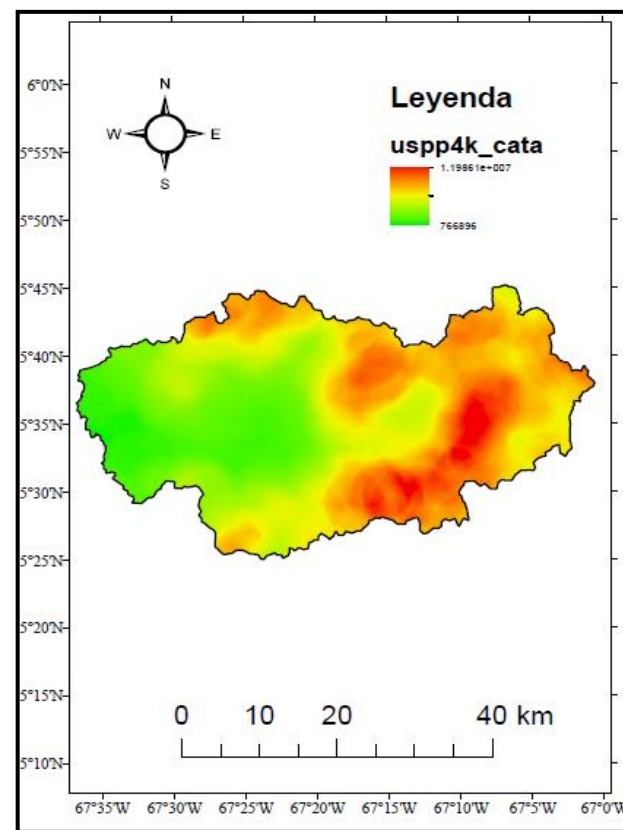
Figura 4.49.: Histogramas que representan la media del poder de flujo Unitario (USP) e poder de flujo Unitario con precipitación (USPP) para cada cuenca estudiada.

Tabla 4.55: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Cataniapo.

Cuenca	USP				USPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Cataniapo	0	5186,0142	25,62171	70,629311	0	38103,02	1020,41	1688,25



(a)

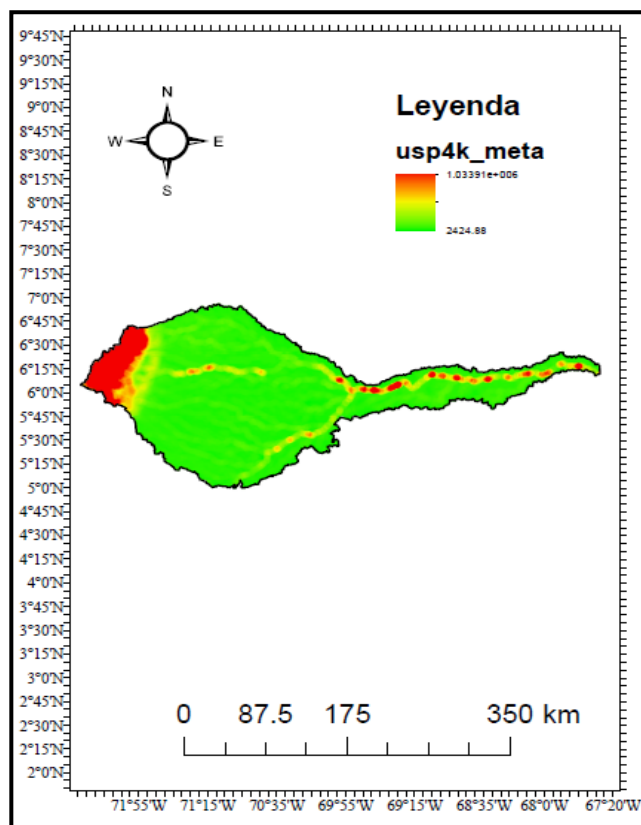


(b)

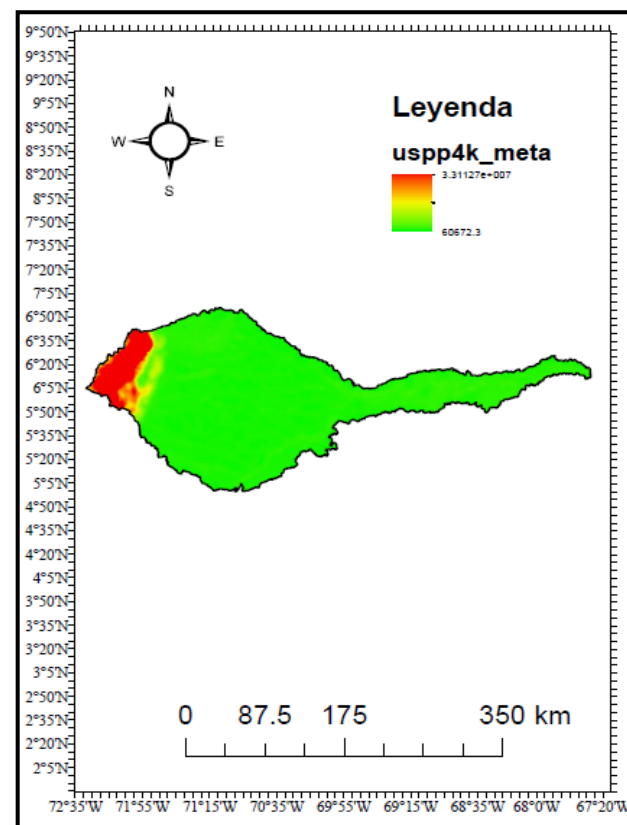
Figura 4.50.: Mapa de la cuenca del Río Cataniapo: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación

Tabla 4.56: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Meta.

Cuenca	USP				USPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Meta	0	24756,672	11,450224	128,06596	0	60800,73	241,22	1093,14



(a)

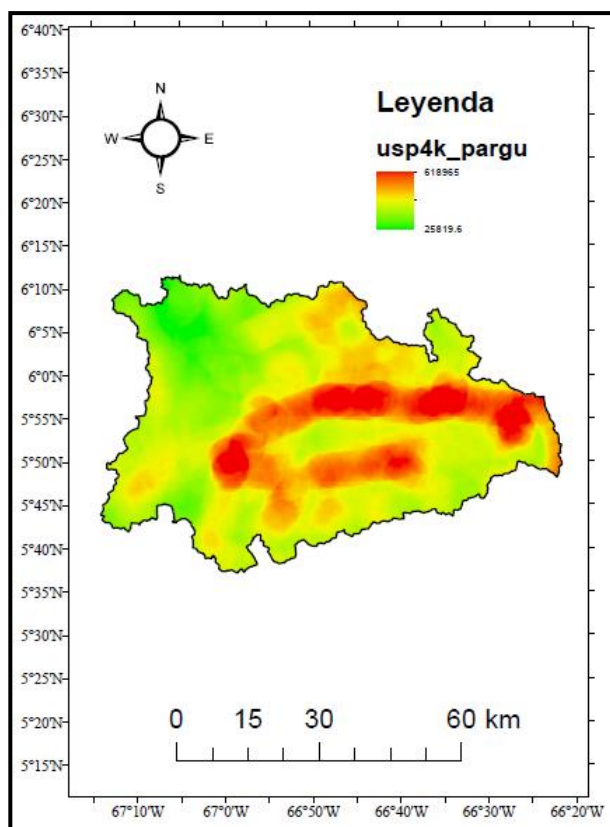


(b)

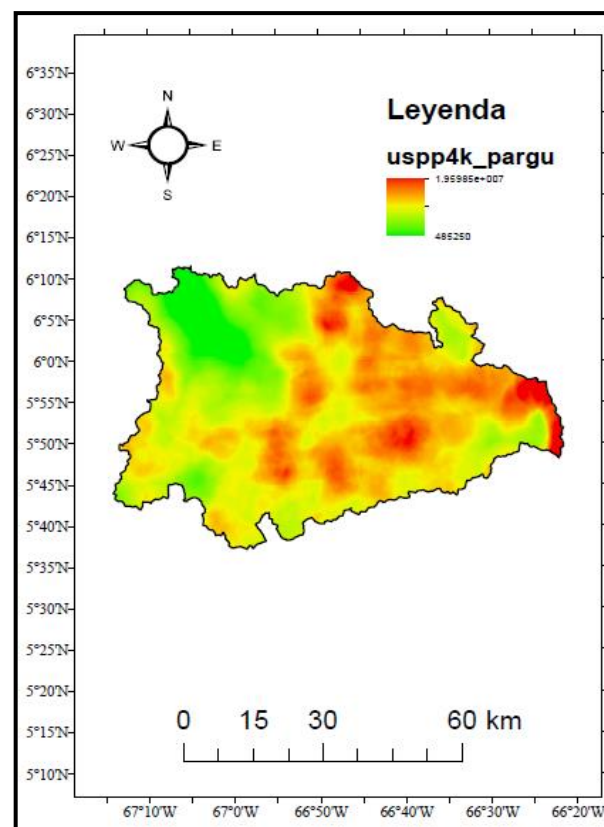
Figura 4.51: Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación

Tabla 4.57: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Parguaza.

Cuenca	USP				USPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Parguaza	0	7882,9292	44,119743	150,80975	0	45456,18	1562,01	2188,29



(a)

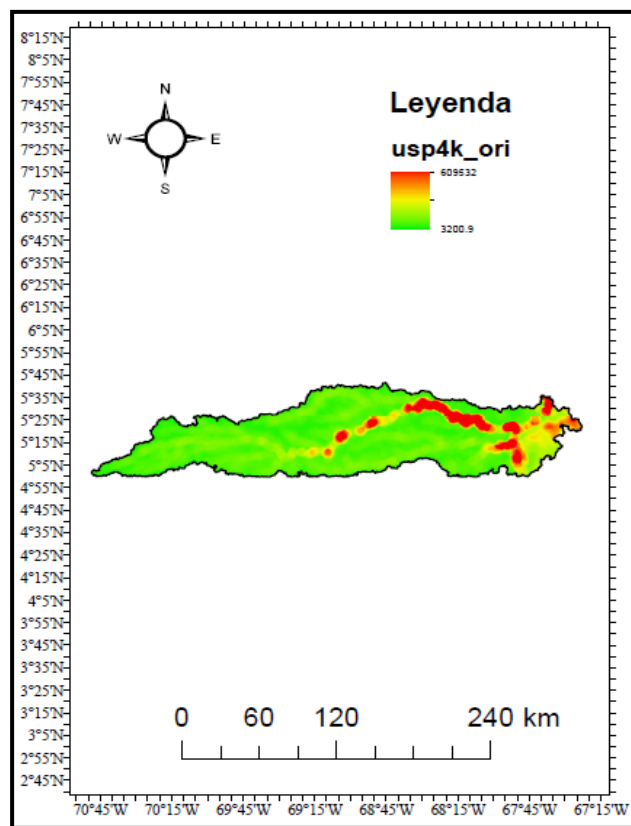


(b)

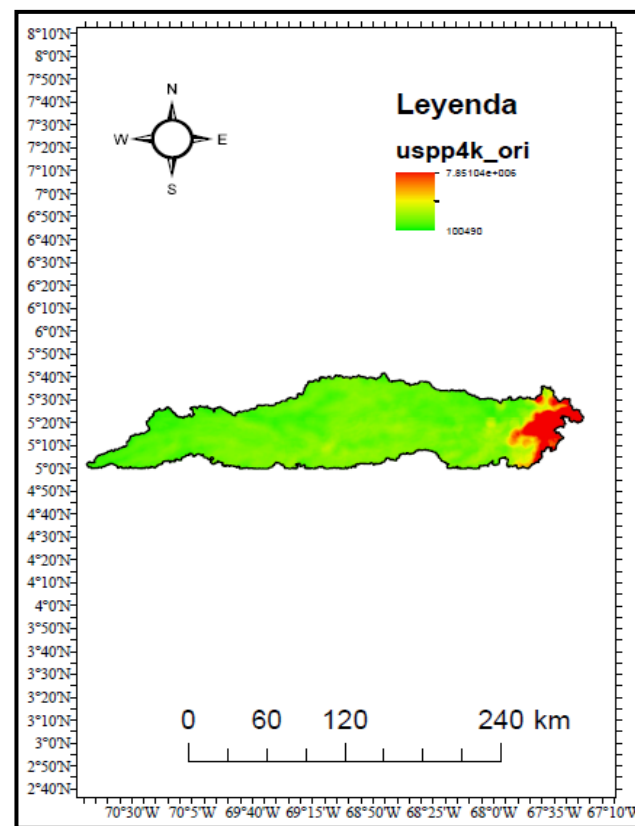
Figura 4.52: Mapa de la cuenca del Río Parguaza: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con precipitación

Tabla 4.58: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Orinoco.

Cuenca	USP				USPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Orinoco	0	12391,16	6,594861	93,711868	0	14532,85	99,41	278,95



(a)

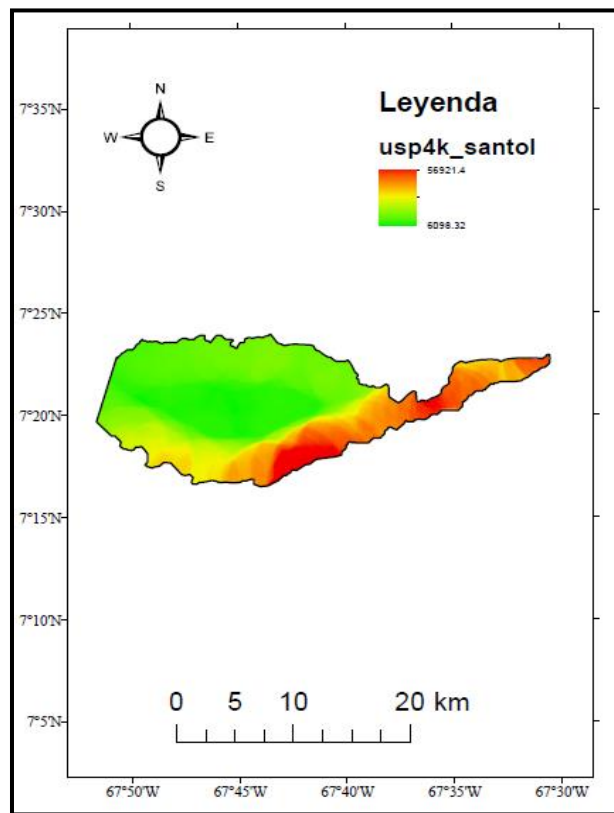


(b)

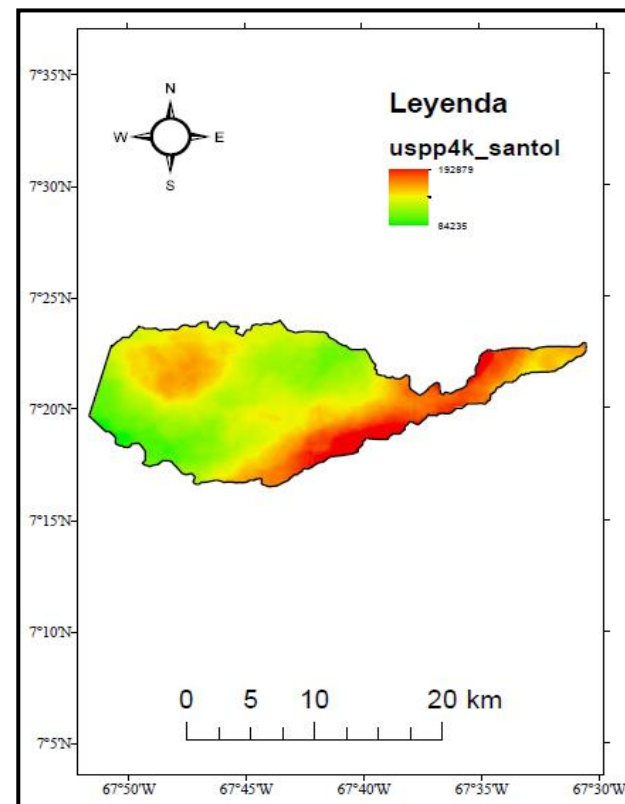
Figura 4.53: Mapa de la cuenca del Río Orinoco: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación

Tabla 4.59: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo.

Duna	USP				USPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Santos Luzardo	0	1182,651	3,075749	26,531919	0	906,91	22,41	46,18



(a)

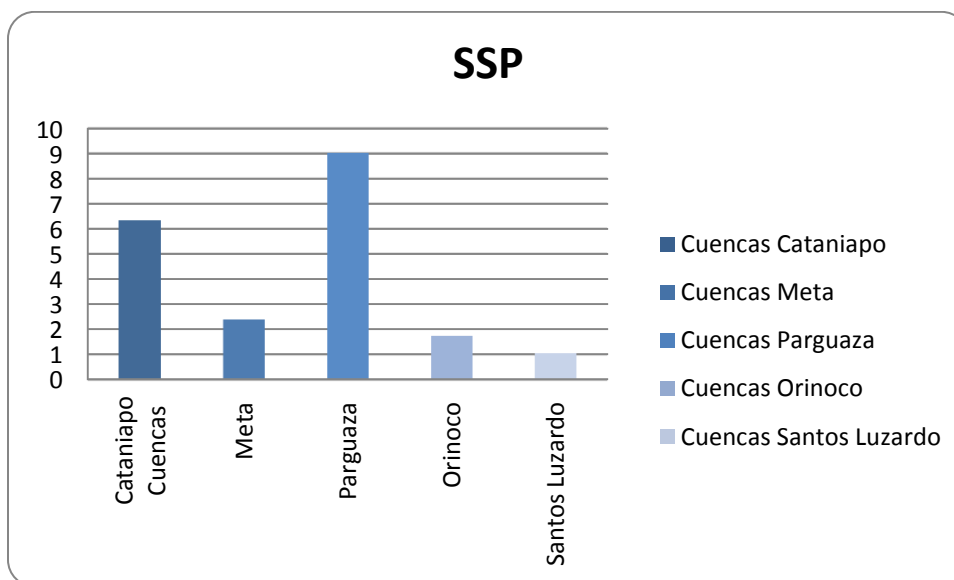


(b)

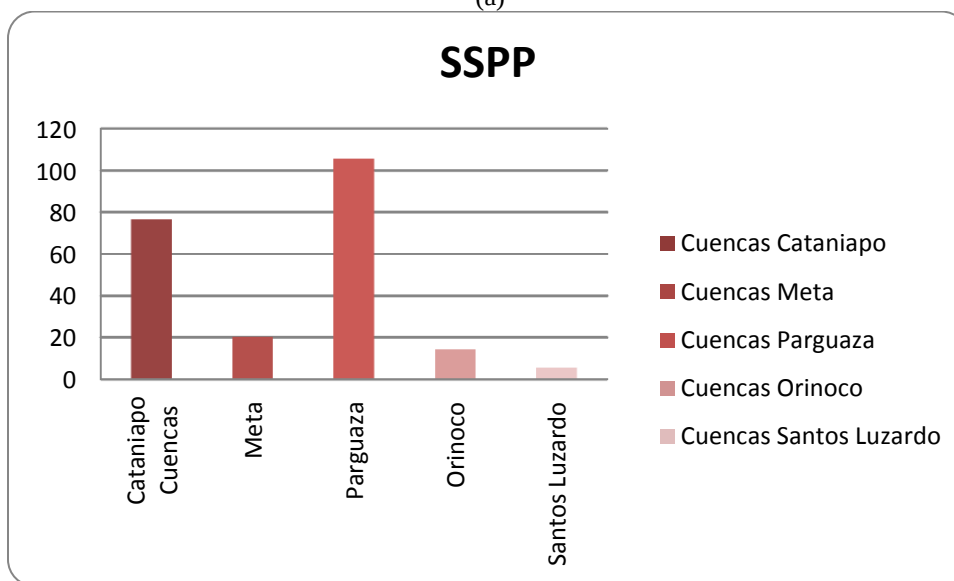
Figura 4.54: Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Poder de Flujo Unitario b) Mapa de Poder de Flujo Unitario con Precipitación

Tabla 4.60: Representa la media del poder de flujo de cizalla por cuenca (SSP) y con precipitación (SSPP).

Atributos del terreno de primer orden	Cuencas				
	Cataniapo	Meta	Parguaza	Orinoco	Santos Luzardo
SSP	6,335635	2,385641	9,020145	1,723041	1,045201
SSPP	76,67	20,4	105,68	14,41	5,49



(a)

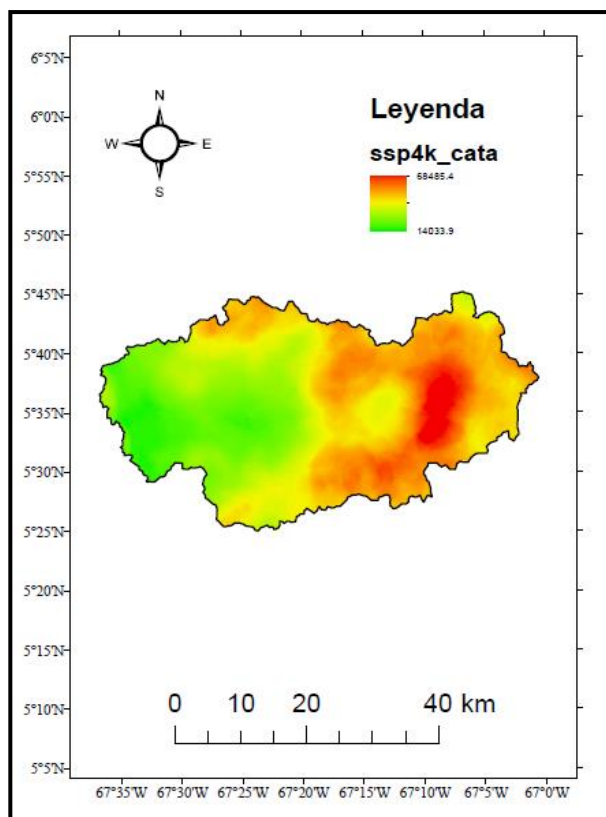


(b)

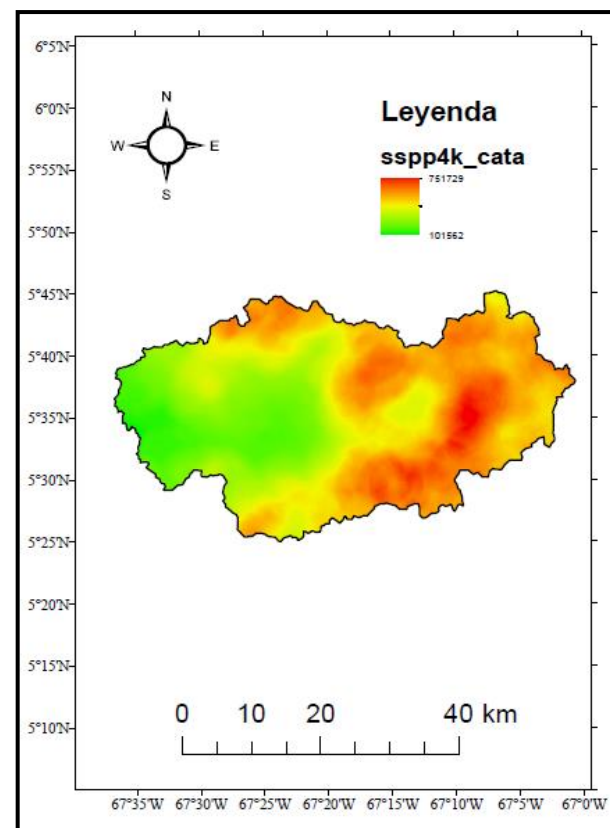
Figura 4.55: Histogramas que representan la media del poder de flujo total (SSP) e poder de flujo total con precipitación (SSPP) para cada cuenca estudiada.

Tabla 4.61: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Cataniapo.

Cuenca	SSP				SSPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Cataniapo	0	299,60965	6,335635	9,188972	0	1132,33	76,67	94,32



(a)

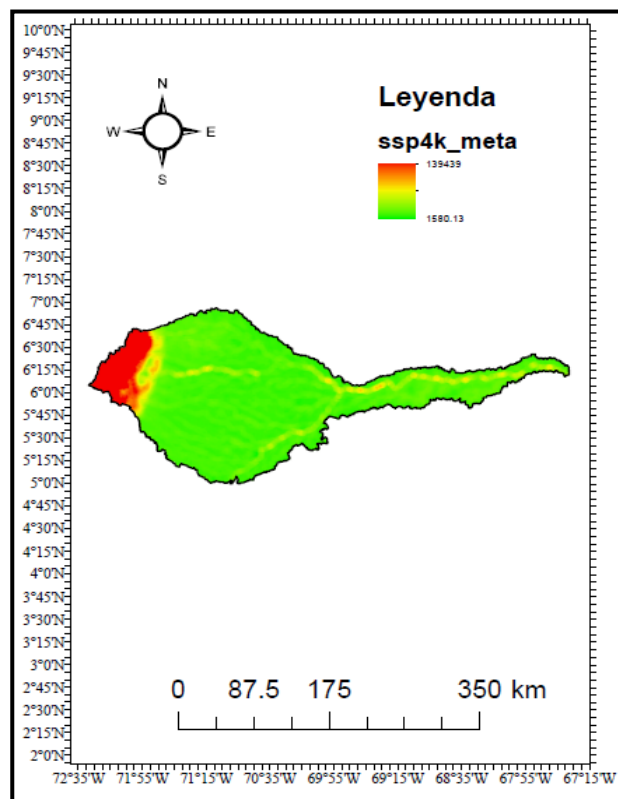


(b)

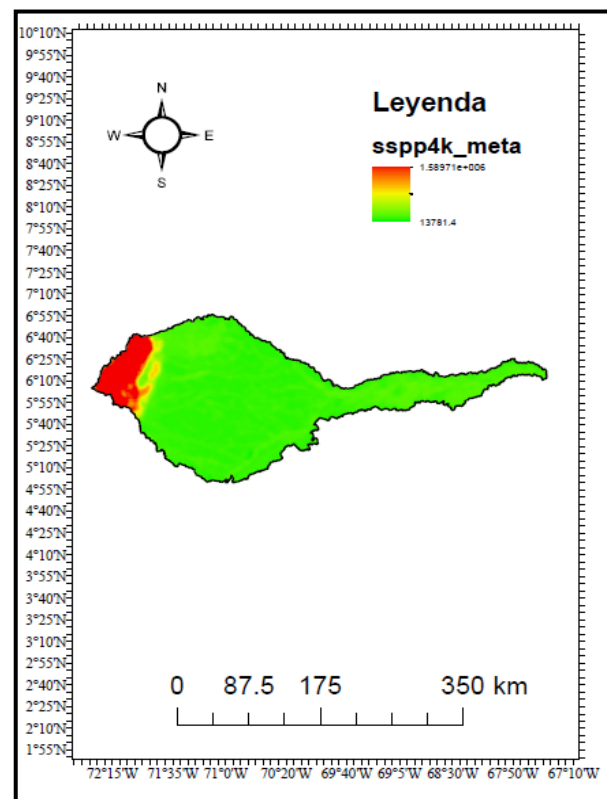
Figura 4.56: Mapa de la cuenca del Río Cataniapo: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación

Tabla 4.62: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Meta.

Cuenca	SSP				SSPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Meta	0	849,43109	2,385641	9,239634	0	1546,22	20,4	57,16



(a)

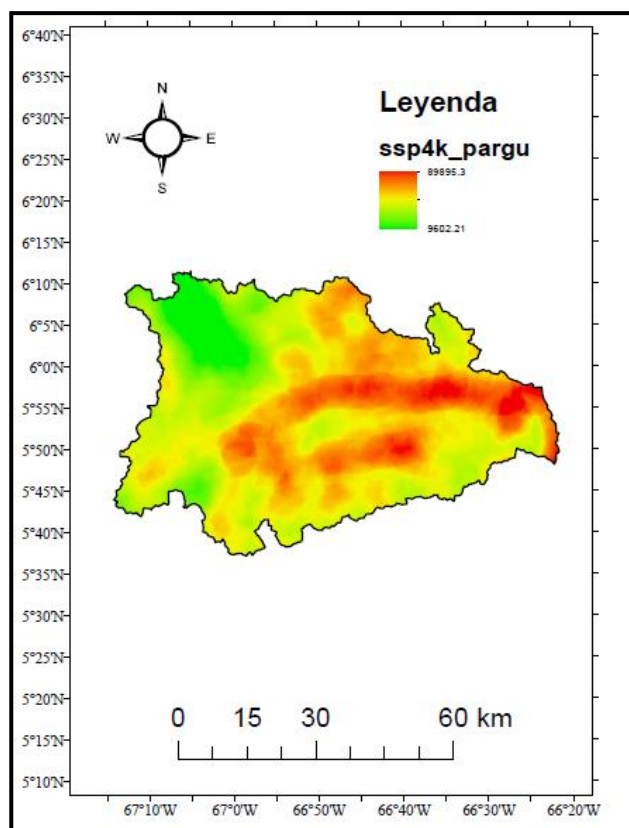


(b)

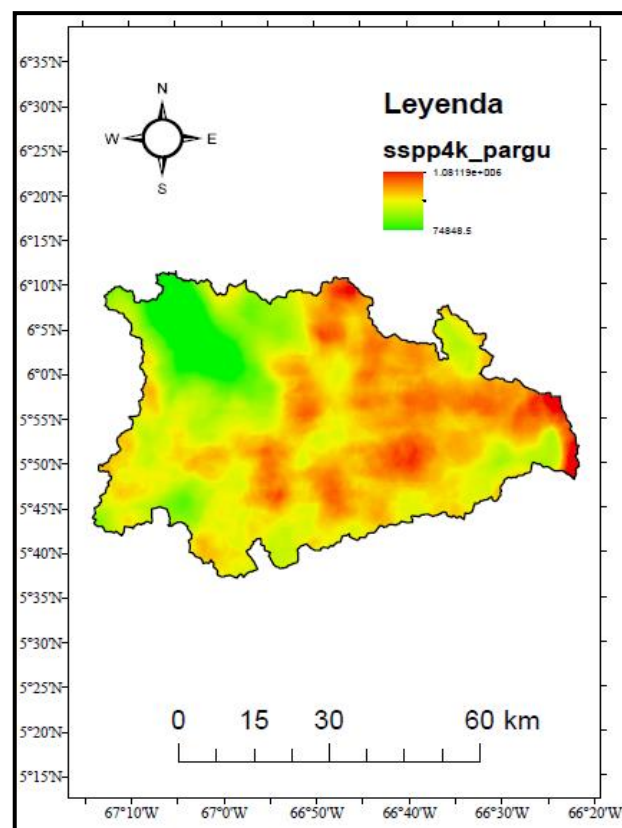
Figura 4.57: Mapa de la cuenca del Río Meta: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación

Tabla 4.63: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Parguaza.

Cuenca	SSP				SSPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Parguaza	0	396,08807	9,020145	13,996779	0	1273,68	105,68	115,74



(a)

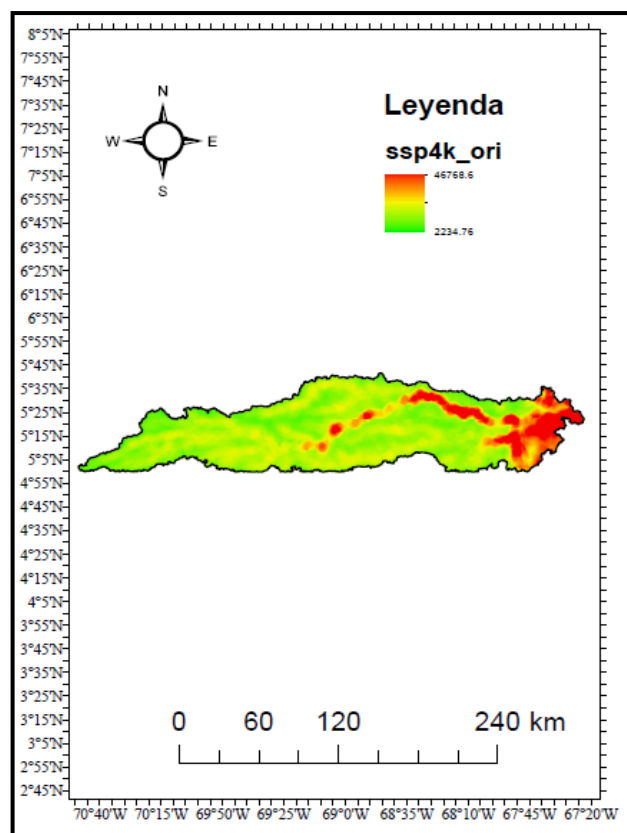


(b)

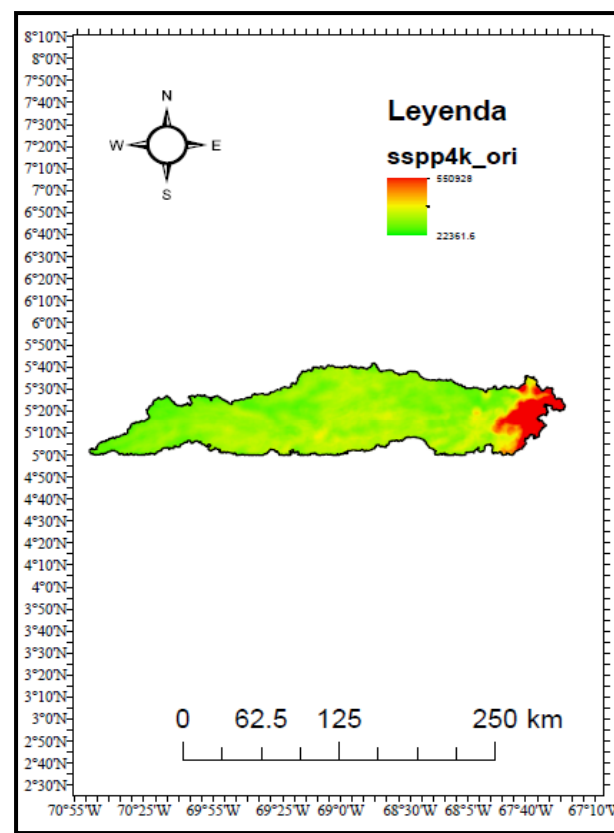
Figura 4.58: Mapa de la cuenca del Río Parguaza: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación

. **Tabla 4.64:** Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la cuenca del Río Orinoco

Cuenca	SSP				SSPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Orinoco	0	535,4776	1,723041	6,951819	0	595,53	14,41	24,52



(a)

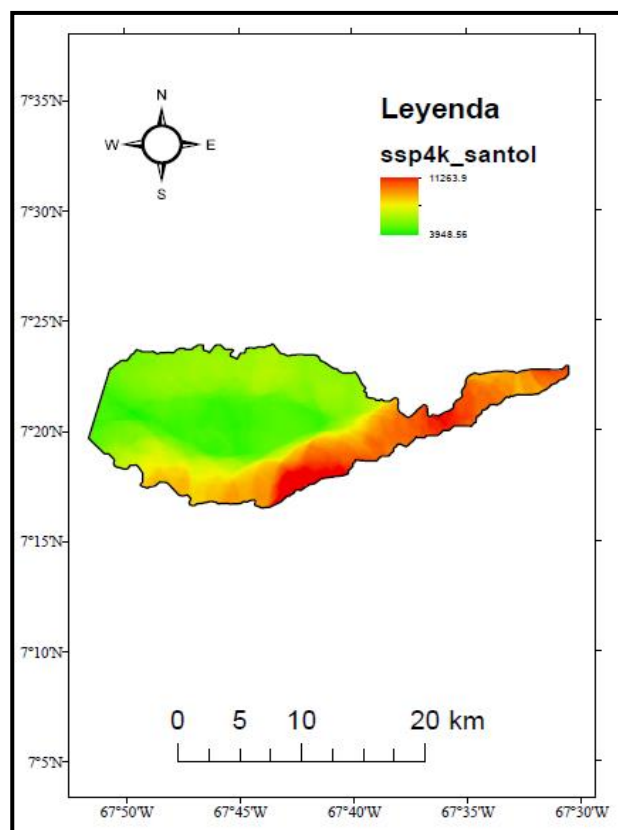


(b)

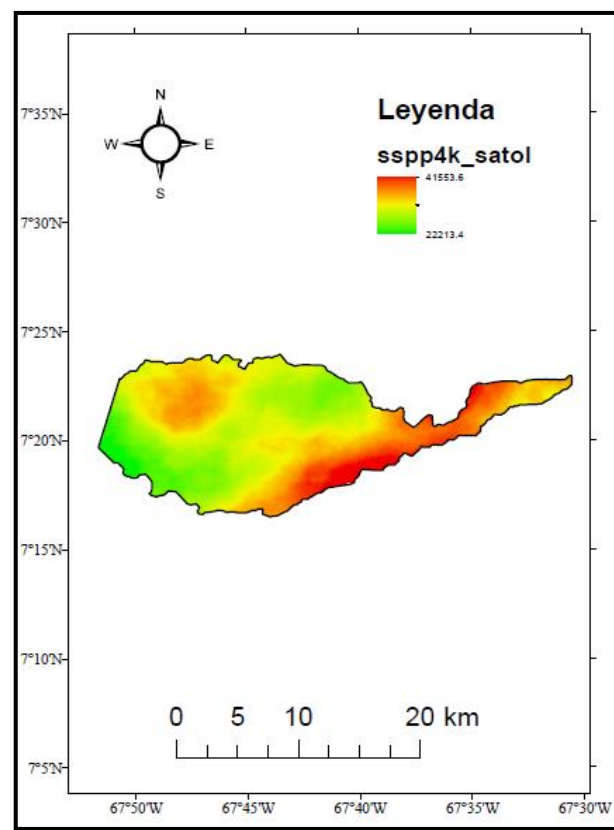
Figura 4.59: Mapa de la cuenca del Río Orinoco: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación

Tabla 4.65: Valores de los atributos del terreno de segundo orden para la duna de Santos Luzardo.

Duna	SSP				SSPP			
	min.	Max.	med.	d.e	min.	Max.	med.	d.e
Santos Luzardo	0	111,83328	1,045201	3,704577	0	93,69	5,49	8,37



(a)



(b)

Figura 4.60: Mapa de la duna de Santos Luzardo: a) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla b) Mapa de Poder de Flujo de Cizalla con Precipitación

CAPITULO V

5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explicarán los resultados descritos anteriormente en el capítulo IV, con lo cual se busca relacionar los datos de atributos primarios y secundarios obtenidos a partir de los análisis digitales de datos cuantitativos y cualitativos por cuenca así como los resultados morfo-texturales de los granos, para así poder establecer la relación entre clima y la tectónica en la zona de estudio.

5.5.2 ANÁLISIS DIGITAL DEL TERRENO

La Tabla 4.28 muestra los atributos primarios para cada una de las cuencas en estudio, de ellas la que ocupa mayor espacio areal es la cuenca del río Meta con $48.353,92 \text{ km}^2$, seguida de la cuenca del río Orinoco, por motivos operacionales se tomó un segmento del río Orinoco, la cual abarca un área de $18.140,96 \text{ km}^2$, siendo ésta la que se extiende entre las salientes entre el río Cataniapo y el río Parguaza ubicado al Suroeste del Estado Bolívar. La cuenca del río Parguaza adyacente a la misma, se ubica en el tercer lugar por su tamaño cuya área es de $3826,12 \text{ km}^2$, en cuarto lugar se tiene la cuenca del río Cataniapo con $1587,87 \text{ km}^2$ y por último la cuenca de la duna de Santos Luzardo quien presenta menor espacio areal con $279,5 \text{ km}^2$.

La cuenca del río Parguaza posee la mayor pendiente $12,064 \pm 8,553^\circ$, además de presentar la mayor elevación con $595,125 \pm 364,031 \text{ m}$ de altura. Mientras que la cuenca del río Cataniapo y Meta tiene pendientes de $8,795 \pm 7,88^\circ$, y $2,098 \pm 6,015^\circ$, cuya elevación es similar para la cuenca del río Meta y Cataniapo son de $275,772 \pm 565,582 \text{ m}$ y $270,797 \pm 193,962 \text{ m}$, con una diferencia de unos 5 metros de elevación. En cuanto a la cuenca del río Orinoco y la duna de Santos Luzardo presentan los valores más bajo de pendiente y elevación, comparado con los datos anteriores, de

esta manera se comprueba la configuración geomorfológica del terreno. Es decir las cuencas del río Parguaza y Cataniapo se ubican hacia las zonas más altas y conforman parte de la vertiente noroeste del Macizo Guayanés. Posteriormente se encuentra la cuenca del río Meta al este de la cuenca del río Orinoco, cuya elevación es similar a la cuenca del río Cataniapo con variación al menos cinco metros, lo cual va a conformar las antes mencionadas tres sub-cuencas de la cuenca del río Orinoco quien se encuentra en la parte de menos elevación junto a la cuenca de la duna de Santos Luzardo.

En la Tabla 4.47 se encuentran a mayor detalle los valores de índice de erosión para cada cuenca, presentando la cuenca del río Parguaza los mayores valores de Poder de Flujo Unitario (USP) y Poder de Flujo de Cizalla (SSP), mientras que la cuenca que tiene el mayor Poder de Flujo Total (TSP) es la cuenca del río Meta, resulta lógico por ser esta cuenca la que posee mayor extensión areal de la zona de estudio, pues forma parte de la gran depresión Orinoquense y de la gradería de los llanos Colombianos, además de ser la que recibe mayor aporte de sedimentos tanto de la República de Colombia como de Venezuela ya que el río Meta funge como zona limítrofe entre ambas, por lo que el flujo total se deriva en niveles más altos para esta zona, en sentido opuesto la duna de Santos Luzardo tiene los valores más bajos tanto de USP como de SSP, esto se debe a la configuración de la cuenca, por ser la más pequeña en cuanto a área con unos 279 km², aunado que presenta un ambiente desértico dominado por corrientes erosivas eólica, en este caso el poder de erosión de las corrientes de aire es proporcional al área de la cuenca, se cumple que a mayor distancia mayor es el flujo de las partículas, a menor distancia menor es la capacidad de transporte de las partículas, aparte de esto en orden de importancia influye el impacto de las ráfagas de viento por encima del nivel promedio, quien pudiese aumentar el poder erosivo, de tal forma resultando la cuenca quien presenta los valores más bajos.

Los valores obtenidos para el Poder de Flujo de Cizalla (SSP) revelan que los más altos corresponden a las cuencas de Parguaza y Cataniapo ya que se encuentran

en la zona de mayor relieve, formando parte de la complejidad tectónica del Escudo Guayanés, dando evidencia así de que es la zona con mayor actividad producto de un complejo de sistema de fallas menores y dos fallas principales cercanas a la zona como son la falla de Suapure y la falla de Cabruta, produciendo compresiones y distensiones que han afectado esta área a lo largo del tiempo geológico.

En la Tabla 4.36 se aprecia los valores de índices de humedad (WI) en los modelos de erosión quienes arrojan valores similares para las cuencas de los ríos Cataniapo, Meta, Parguaza, Orinoco y la duna de Santos Luzardo, obteniendo el valor más alto la cuenca del río Parguaza con $10.804,68 \pm 634,99$ y el más bajo corresponde a la cuenca de la duna de Santos Luzardo $10.291,6 \pm 835,46$, con diferencia muy cercanas, este resultado se debe a que la mayor cantidad de escorrentía se acumulan en estas zonas, ya que recibe aportes de diferentes tributarios que se encuentran a mayor altura, para luego verter hacia el río Orinoco que es el drenaje principal ubicado en la zona de menor elevación, estos datos corroboran que la mayor humedad se concentra al sur del país.

La capacidad de transporte de sedimentos que presenta la cuenca del río Meta es mayor, ya que su relieve es menor en comparación con las zonas aledañas y las pendientes son muy bajas, actuando como recolector de cuencas cercanas. Las cuencas con valores de humedad similar a las anteriores, pero con baja capacidad de transporte se refieren a la cuenca del río Cataniapo y al área considerada para la duna de Santos Luzardo. Esto se debe a que la cuenca del río Cataniapo posee una de las mayores pendientes, lo cual impide un menor arrastre de flujo de sedimentos, mientras que la cuenca de la duna de Santos Luzardo, se debe a su alta capacidad permeable lo cual impide el transporte de sedimentos por corrientes fluviales.

5.5.3 ANÁLISIS MORFO - TEXTURAL

Mediante la observación de las características morfo-texturales de los minerales pesados de cada muestra, se buscaba definir el nombre mineral de cada grano estudiado además de observar sus parámetros visuales como lo son redondez y esfericidad basadas en la Tabla de Kumbrein (1941).

Se realizó un estudio de los minerales pesados obtenidos por cada cuenca mediante un microscopio petrográfico en el cual se tomó una población entre 80 y 100 granos por muestra, unido a la microscopia electrónica de barrido se llegó a definir los minerales pesados que se obtuvieron por río teniendo en cuenta que las muestras fueron separadas en fracciones magnéticas y no magnéticas para cada río.

Los resultados mineralógicos obtenidos en esta etapa quedan distribuidos de la siguiente forma: muestra magnética para río Cataniapo, circón (96%), rutilo (2%), óxidos (2%) (Figura 4.2 a) mientras que para la fracción no magnética se obtuvo circón (54%), cuarzo (30%), topacio (11%), rutilo (3%) y apatito (2%) (Figura 4.2 b). Río Meta fracción magnética se obtuvo óxidos (62%), circón (15%), rutilo (13%), cuarzo (10%) (Figura 4.4a), para la fracción no magnética se obtuvo, circón (68%), óxidos (18%), rutilo (6%), apatito (4%), cuarzo (3%), topacio (1%) (Figura 4.4 b). Los sedimentos del río Parguaza están constituidos mineralógicamente en su mayoría por circones en la fracción magnética con 83%, y en mínimas cantidades rutilo (10%), óxidos (4%), cuarzo (1%), apatito (1%), topacio (1%) (Figura 4.6a) y en la fracción no magnética circones (86%), cuarzo (6%), apatito (6%), rutilo (2%) (Figura 4.6b). Río Orinoco en la fracción magnética se tiene circón (56%), óxidos (22%), apatitos (10%), rutilo (5%), cuarzo (5%), topacio (2%) (ver Figura 4.8a), mientras que para la fracción no magnética se tiene circón (39%), topacio (26%), óxidos (22%), rutilo (9%), cuarzo (3%), apatito (1%) (ver Figura 4.8b). Río Santos Luzardo fracción magnética se obtuvo, óxidos (44%), cuarzo (22%), circón (18%), rutilo (9%), topacio (5%), apatito (1%), sillimanita (1%) (Figura 4.10a), y en la

fracción no magnética, circón (34%), cuarzo (27%), óxidos (27%), topacio (8%), rutilo (4%) (Figura 4.10b).

Teniendo en cuenta la cantidad de circones encontrados en cada una de las cuencas es el mineral más abundante, seguido por los óxidos que presentan altos contenidos de titanio, sin embargo, el topacio y el rutilo se repiten en varias cuencas, a excepción del apatito que representa una minoría y la sillimanita que sólo se encontró un cristal en la duna de Santos Luzardo.

5.5.4 ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES DE MINERALES PESADOS

En esta sección se analizan los resultados obtenidos a partir del software ImageJ con el cual se obtuvieron todos los datos de parámetros de redondez y esfericidad calculados por el computador para luego ser comparados con los datos visuales obtenidos a partir de la Tabla de Kumbrein (1941) con esto se buscó tener mayor fiabilidad en los datos de estos parámetros encontrados.

Al visualizar la esfericidad en las fracciones magnéticas de las cuencas estudiadas se aprecian valores muy semejantes entre 0,7 y 0,75 sin embargo la duna de Santos Luzardo (0,768) (Tabla 4.11) con una diferencia mínima es la que presenta mayor esfericidad en sus granos seguido por los ríos Parguaza (0,75) (Tabla 4.11), Cataniapo (0,737) (Tabla 4.11), Orinoco (0,736) (Tabla 4.11) mientras que los granos del Río Meta presenta el valor promedio más bajo (0,723) (Tabla 4.11), tomando en cuenta un promedio general de esfericidad para las fracciones magnéticas es de 0,742 se tiene que los granos presentan una alta esfericidad, mientras que en redondez el mayor valor lo presenta la duna de Santos Luzardo con 0,787 (Tabla 4.11) corroborando así que la erosión eólica juega un rol de mayor importancia sobre la hidráulica en el retrabajo de los granos estudiados, seguida por los ríos Meta (0,776) (Tabla 4.11), Orinoco (0,681) (Tabla 4.11), Parguaza (0,616) (Tabla 4.11), mientras que la cuenca con menor redondez fue Cataniapo con un valor de 0,608 (Tabla 4.11) lo cual equivale a granos sub-angulosos a sub-redondeados esto

es producto de que la mayoría de los minerales encontrados aquí fueron circones con un 96% de los granos (Figura 4.11) en esta fracción, los circones presentan una dureza de 7,5 por lo que es más difícil generar redondez en sus aristas. La redondez promedio general para esta fracción es de 0,693 que representa granos sub-redondeados.

En el caso de las fracciones no magnéticas se tiene que el mayor valor de esfericidad lo presentan los granos del Río Meta con 0,805 (Tabla 4.11) que equivale a granos con alta esfericidad seguido por el río Orinoco (0,763) (Tabla 4.11), la duna Santos Luzardo (0,743) (Tabla 4.11), el río Cataniapo (0,742) (Tabla 4.11), mientras que el Río Parguaza presenta la menor esfericidad con 0,716 (Tabla 4.11) en esta fracción, para la redondez se tiene que los mayores los presenta nuevamente la duna de Santos Luzardo con 0,763, corroborando lo dicho anteriormente, seguido por el Río Orinoco (0,743) (Tabla 4.11) y Meta (0,736) (Tabla 4.11) cuyos valores de redondez en sus granos son similares, Cataniapo (0,681) (Tabla 4.11), mientras que el menor valor de redondez en esta fracción lo presenta el Río Parguaza con 0,631 (Tabla 4.11) teniendo que la esfericidad promedio general para las fracciones no magnéticas es de 0,75 (alta esfericidad) y la redondez es de 0,70 (sub-redondeados).

Generalizando lo anteriormente expuesto se tiene que la esfericidad en ambas fracciones está por encima de la redondez lo que indica que las propiedades físicas como la dureza juegan un papel de gran importancia en los valores obtenidos, esto es debido a que la mayoría de los minerales encontrados en las muestras fueron circones el cual es el mineral que mayor dureza presenta entre los minerales obtenidos en este estudio indicando entonces, que es la forma y estructura de los cristales lo que predomina por encima del transporte.

5.5.5 INTEGRACIÓN DE LOS DIFERENTES RESULTADOS

Con la finalidad de integrar los diferentes resultados obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación se construye una matriz global de valores promedios mostrada en la Tabla 5.1. A partir de esta tabla se realiza un análisis de coeficientes de correlación tipo Pearson (Conover, 1980), así se obtiene las siguientes relaciones de dependencia: precipitación versus relieve calculado a diferentes radios (1,3,5 y 7 km), la correlación r es invariante, indicando que la correlación no cambia al aumentar el radio con que se calcula el relieve. Se aprecia en esta tabla una anticorrelación alta de -0,97 entre la redondez de los granos y el patrón de precipitaciones. La correlación entre los diferentes relieves e índices de erosión es significativa. En esta tabla los valores en cursiva representan correlación natural, es decir la dependencia lineal entre los parámetros comparados.

La Figura 5.1 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 ($r = \sqrt{R^2}$) es independiente del radio con que fue calculado el relieve.

La Figura 5.2 ilustra la correlación existente entre los diferentes índices de erosión uniformes normalizados y el relieve calculado a 1 km de radio para cada una de las cuencas.

Por último, en la Figura 5.3 se muestra la correlación negativa 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.

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

Cuenca	Prec.	Rel. 1km	Rel. 3km	Rel. 5 km	Rel. 7km	TSP	USP	SSP	TSPprec	USPprec	SSPprec	Red. (circones)	Esf. (circones)
Cataniapo	3080,44	119,56	234,40	317,18	375,01	67386,58	25,62	6,34	5101058,53	1020,41	76,67	0,61	0,74
Meta	1732,72	31,93	63,71	95,51	122,29	432497,63	11,45	2,39	1035828,73	241,22	20,40	0,70	0,77
Parguaza	3213,32	168,53	332,96	439,04	504,90	239844,16	44,12	9,02	8283653,47	1562,01	105,68	0,61	0,72
Orinoco	2316,82	14,63	29,44	39,38	46,79	273681,00	6,59	1,72	21427,03	99,41	14,41	0,70	0,74
Santos Luzardo	745,58	5,45	8,94	10,86	12,23	77326,06	3,08	1,05	-133004,58	22,41	5,49	0,72	0,75

*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

	Prec.	Rel. 1km	Rel. 3km	Rel. 5 km	Rel. 7km	TSP	USP	SSP	TSPprec	USPprec	SSPprec	Red. (circones)	Esf. (circones)
Prec.	1												
Rel. 1km	0,85	1											
Rel. 3km	0,85	1,00	1										
Rel. 5 km	0,85	1,00	1,00	1									
Rel. 7km	0,85	1,00	1,00	1,00	1								
TSP	0,00	-0,17	-0,16	-0,15	-0,14	1							
USP	0,82	0,99	0,99	0,99	0,98	-0,05	1						
SSP	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	-0,14	0,99	1					
TSPprec	0,82	1,00	1,00	1,00	0,99	-0,15	0,99	1,00	1				
USPprec	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	-0,16	0,99	1,00	1,00	1			
SSPprec	0,86	1,00	1,00	1,00	1,00	-0,18	0,98	1,00	1,00	1,00	1		
Red. (circones)	-0,90	-0,97	-0,97	-0,97	-0,97	0,27	-0,92	-0,96	-0,94	-0,95	-0,97	1	
Esf. (circones)	-0,71	-0,74	-0,74	-0,72	-0,71	0,47	-0,73	-0,75	-0,74	-0,75	-0,76	0,74	1

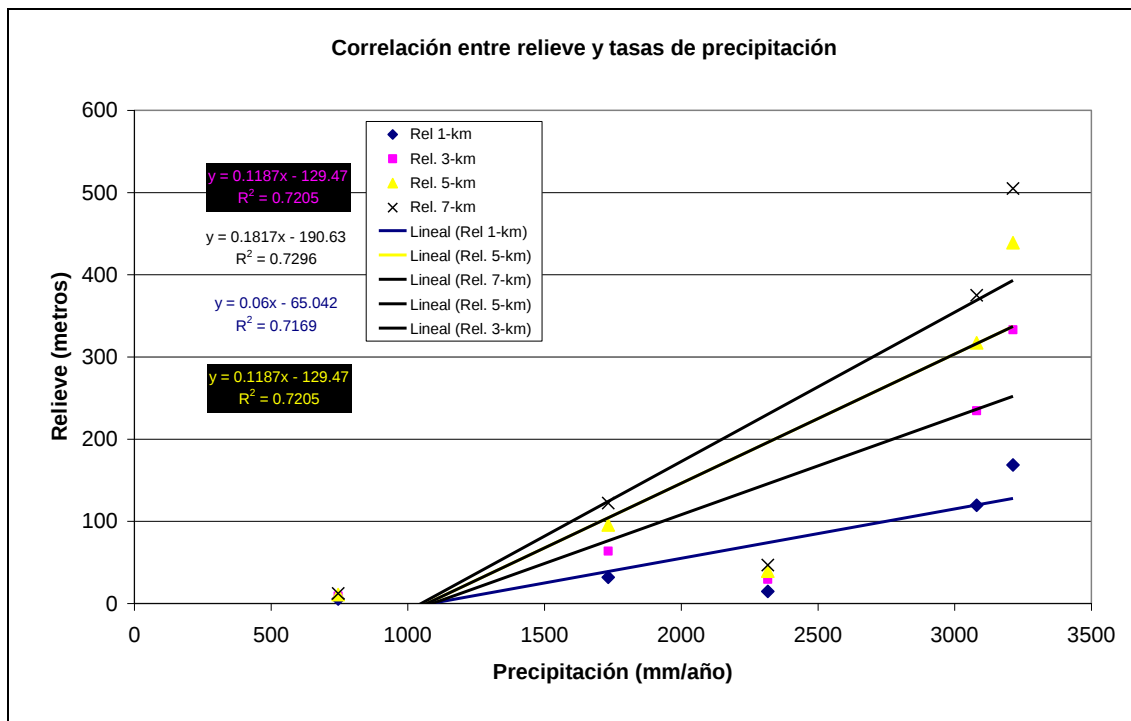


Figura 5.1. Relación entre precipitación y relieve calculado a diferentes radios.

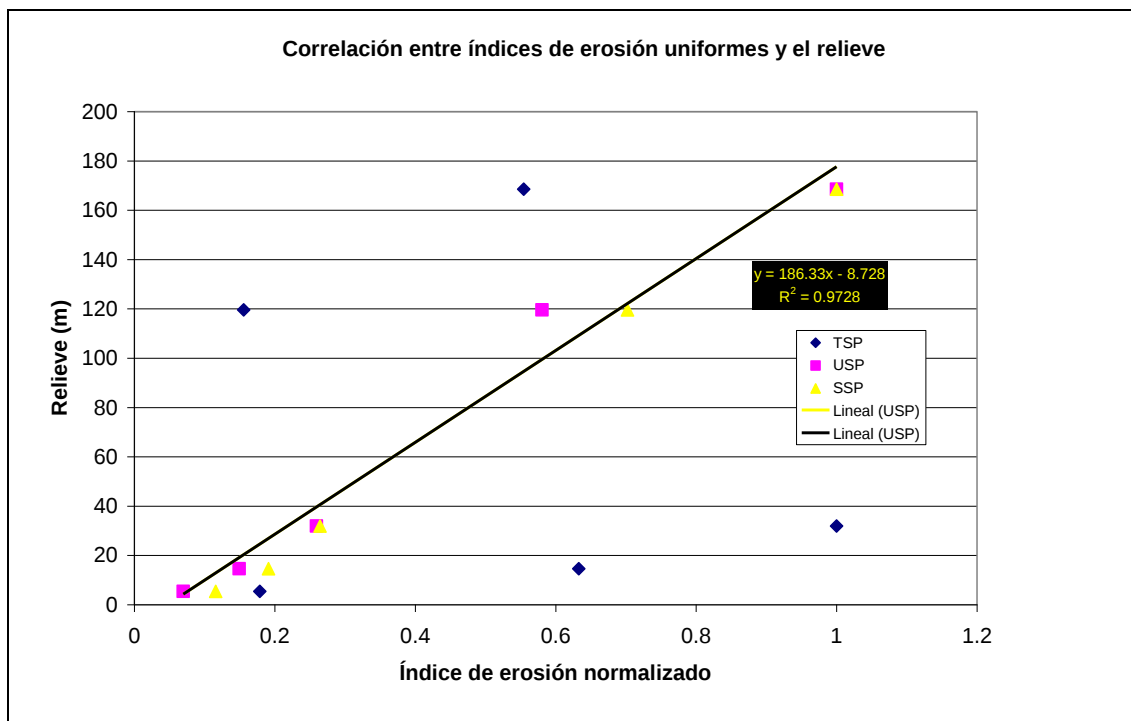


Figura 5.2. Relación entre índices de erosión uniformes normalizados y relieve a 1 km de radio.

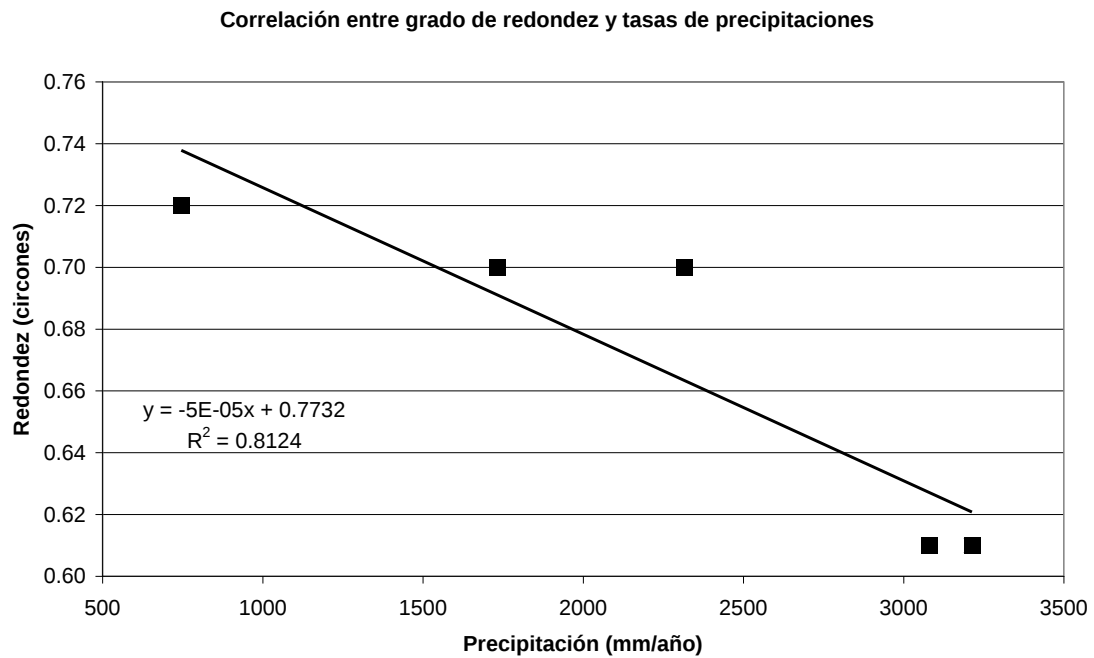


Figura 5.3. Relación entre precipitación y redondez para el área de estudio

Adicionalmente, aunque no era parte de los objetivos de este Trabajo Especial de Grado, pudo fecharse por el método de trazas de fisión en apatito las muestras pertenecientes a las cuencas de los ríos Cataniapo, Meta y Parguaza. Las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 resumen el histograma de frecuencias de edades encontradas en cada una de las muestras, junto con la función de densidad de probabilidad compuesta, y la separación de las poblaciones, o deconvolución de esa curva compuesta usando el método binomial de Brandon (1992). Las tres muestras son muy diferentes en términos de edades.

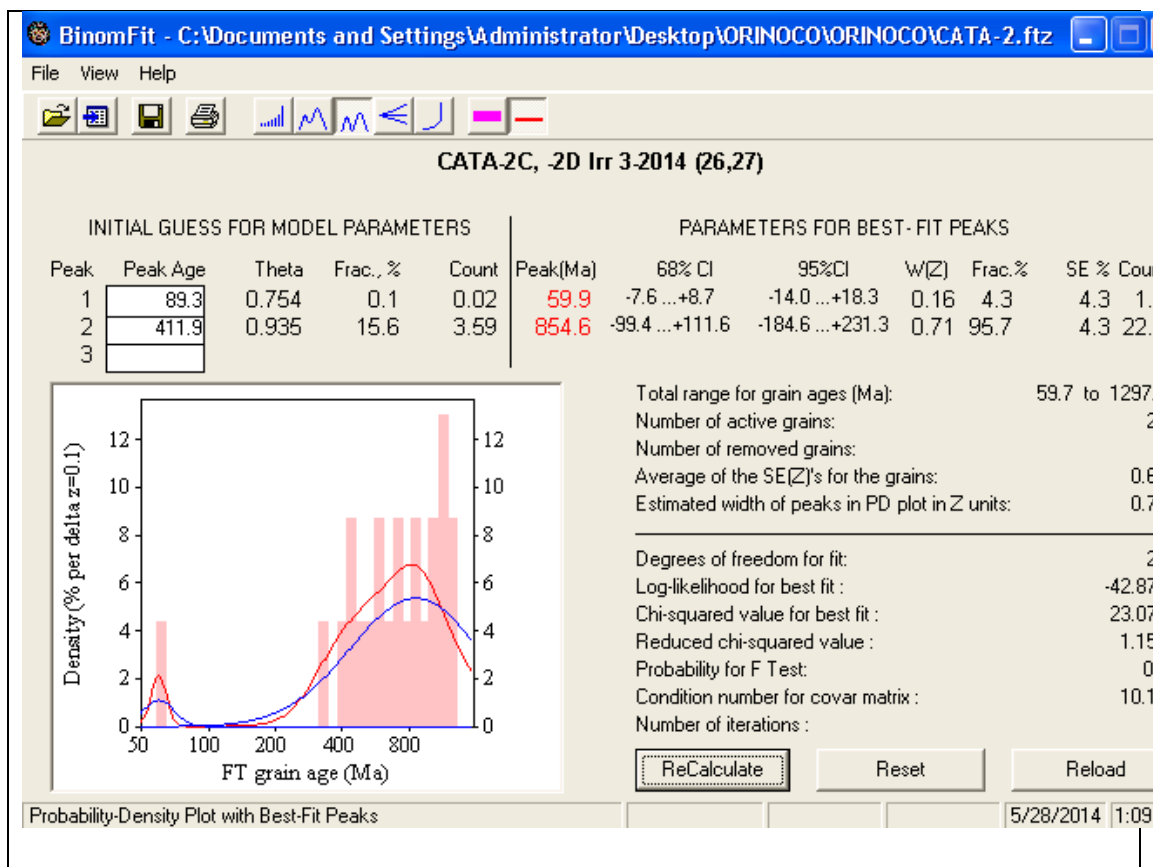


Figura 5.4. Resultados de la datación por trazas de fisión de la muestra del río Cataniapo.

La Figura 5.4 representa la salida del programa Binomfit utilizado para separar poblaciones de edades de la muestra del río Cataniapo, en el histograma mostrado en esta figura se observa que fueron encontradas dos poblaciones que representan los picos ("peaks") de edades, una población formada por un grano con una edad de $59,9 \pm 8$ Ma (Paleoceno-Eoceno), y otra población conformada por una mayor cantidad de granos (22) con una edad de 854.6 ± 100 Ma (Precámbrico: Neoproterozoico).

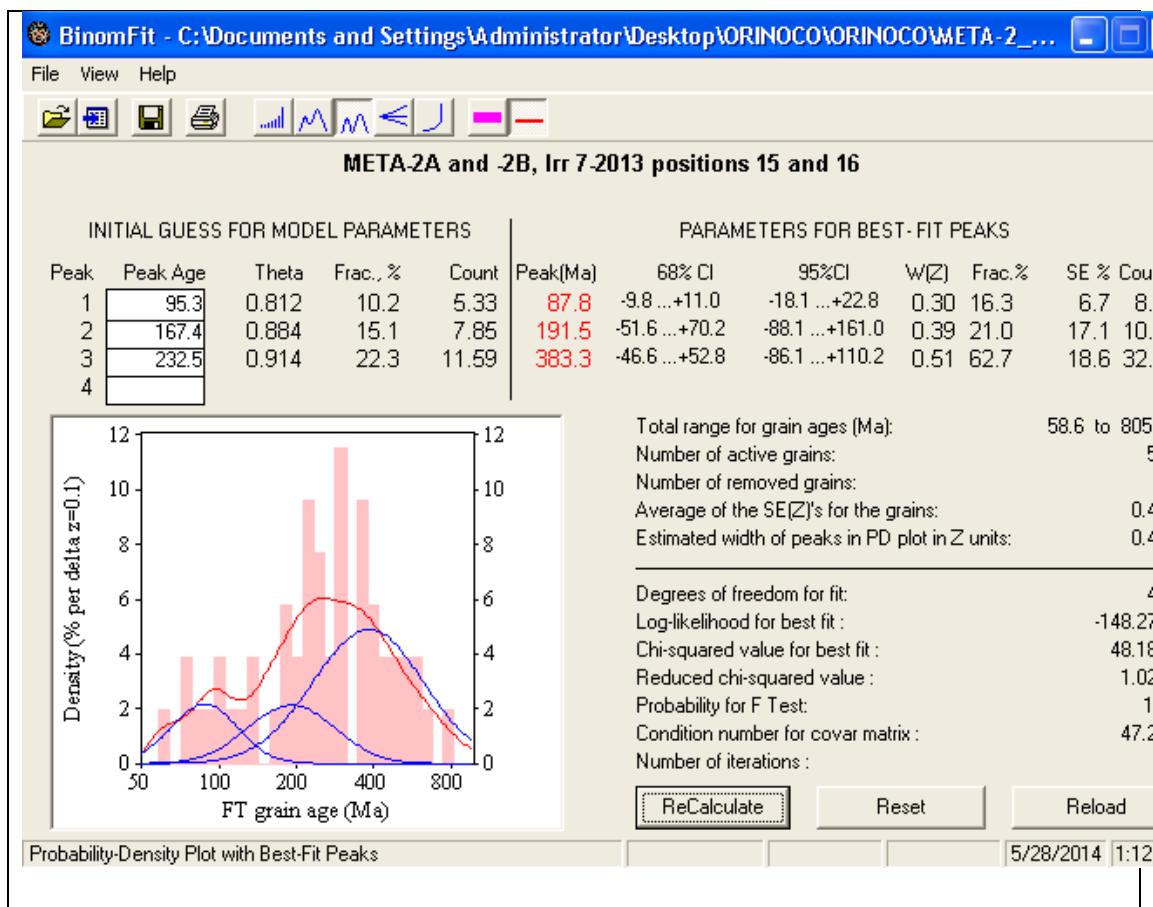


Figura 5.5. Resultados de la datación por trazas de fisión de la muestra del río Meta.

La Figura 5.5 representa el histograma de edades obtenidas para la muestra del río Meta, así como la función de densidad compuesta y la descomposición en 3 poblaciones o picos ("peaks") de edades, una primera población formada por 9 granos con una edad de $87,8 \pm 10$ Ma (Cretácico tardío), una segunda población conformada por 11 granos con una edad de $191,5 \pm 60$ Ma (Mesozoico) y la tercera población conformada por 33 granos con edades de $383,3 \pm 45$ Ma (Paleozoico).

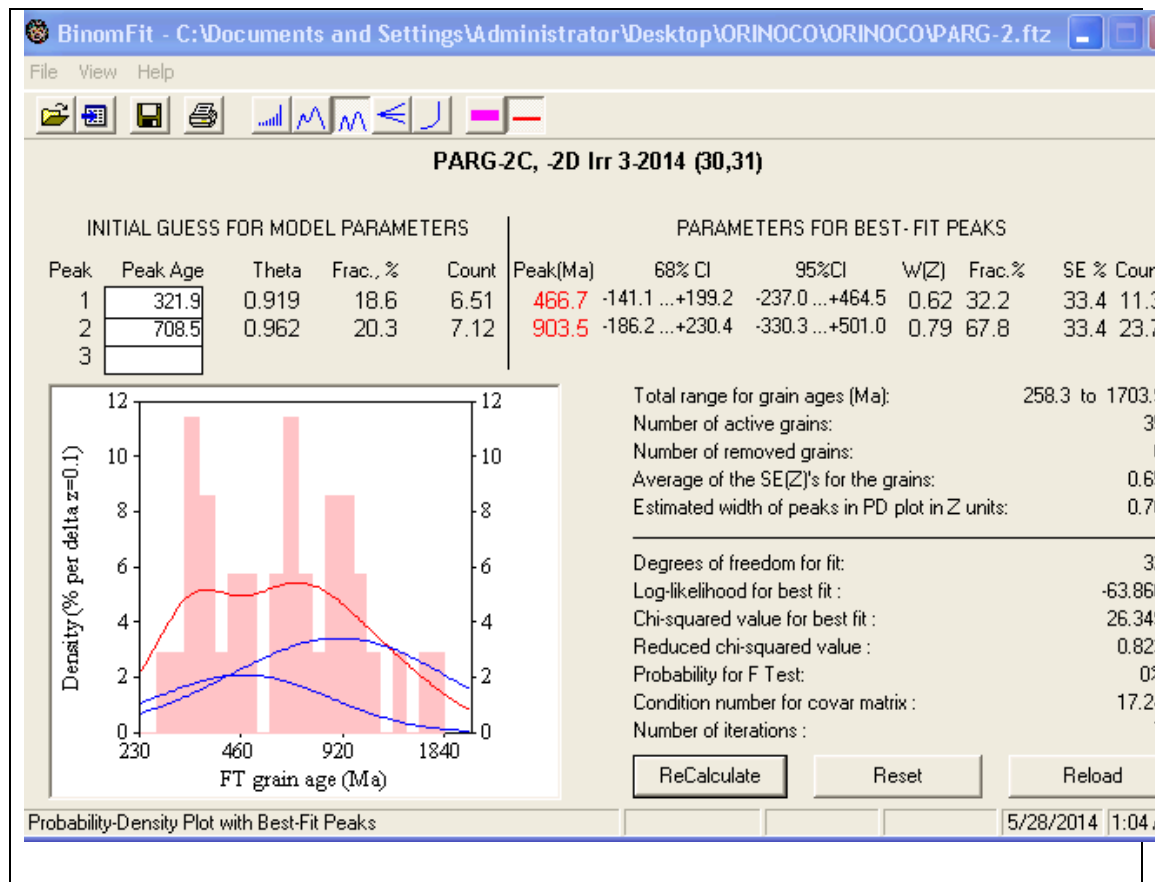


Figura 5.6. Resultados de la datación por trazas de fisión de la muestra del río Parguaza.

La Figura 5.6 representa el histograma de edades, la función de densidad compuesta y la descomposición en 2 poblaciones o picos ("peaks") para la muestra del río Parguaza. La primera población formada por 11 granos tiene una edad de $466,7 \pm 170$ Ma (Paleozoico), y la segunda población conformada por 24 granos con una edad de $903,5 \pm 208$ Ma (Precámbrico).

CAPITULO VI

6. CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo permitió analizar las relaciones entre topoforma y clima como agentes controladores del relieve actual en el sector suroeste de la cuenca del río Orinoco, 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. La madurez textural de las muestras analizadas oscila entre inmaduro a maduro, esto señala que los sedimentos modernos estudiados provienen de fuentes diversas, encontrándose las mayores diferencias entre las cuencas Cataniapo y Meta cuyo contenido mineralógico en cuanto a porcentajes de circones, redondez y esfericidad pareciera indicar que se trata de fuentes diferentes, de esta forma es necesario para futuras investigaciones reexaminar esas diferencias en términos de edades de depositación.

El análisis visual para reconocer minerales pesados en las fracciones magnéticas y no magnéticas para cada muestra, fue validado vía microscopia electrónica de barrido (MEB), encontrándose en la cuenca Cataniapo una mayoría en porcentaje de circones, se encontró también cuarzo, apatito, topacio, rutilo, óxido. En el Meta circón, cuarzo, rutilo, apatito, topacio. En la cuenca de Parguaza circón, óxidos, cuarzo, rutilo, topacio. En la cuenca del río Orinoco: circón, cuarzo, óxidos, rutilo, topacio, apatito y la duna de Santos Luzardo circón, cuarzo, óxidos, rutilo, sillimanita, topacio, apatito.

El contenido de minerales pesados en circones es mucho mayor en las cuencas de Cataniapo y Parguaza con más del 85% para ambas muestras en una población de 100 granos por muestra, eso es debido a que ambas cuencas cortan la formación Granito de Parguaza constituida por rocas volcánicas, en contraste, la cuenca Meta y la duna Santos Luzardo que yacen sobre sedimentos recientes.

Después de realizar el Modelo de Elevación Digital (DEM), se obtuvo que los atributos de primer orden de las cuencas de estudio son: Meta con $48.353,92 \text{ km}^2$, pendiente = $2,098 \pm 6,015^\circ$ y elevación = $275,772 \pm 565,582 \text{ m}$. Orinoco, Área = $18.140,96 \text{ km}^2$, pendiente = $1,088 \pm 1,994$ y elevación = $109,233 \pm 24,159 \text{ m}$. Cataniapo, Área = $1587,87 \text{ km}^2$, la pendiente (S) = $8,795 \pm 7,882^\circ$ y elevación = $270,797 \pm 193,962 \text{ m}$, Parguaza: Área = $3826,12 \text{ km}^2$, la pendiente (S) = $12,064 \pm 8,553^\circ$ y elevación = $595,125 \pm 364,031 \text{ m}$ y la duna de Santos Luzardo Área = $279,5 \text{ km}^2$, la pendiente (S) = $0,411 \pm 0,365^\circ$ y elevación = $51,738 \pm 3,175 \text{ m}$

La tasa de erosión para cada cuenca es, Cataniapo: TSP = $67386,57 \pm 895681,88$, USP = $25,62171 \pm 70,629$, SSP = $6,335635 \pm 9,188972$, Meta: TSP = $432497,63 \pm 21358828$, USP = $11,4502 \pm 128,06$, SSP = $2,385641 \pm 9,239634$, Parguaza: TSP = $239844,16 \pm 3834424,5$, USP = $44,119 \pm 150,809$, SSP = $9,020145 \pm 13,996779$, Orinoco: TSP = 273681 ± 9197602 , USP = $6,5948 \pm 93,711$, SSP = $1,723041 \pm 6,951819$ y duna Santo Luzardo: TSP: $77326,063 \pm 1285651,8$, USP = $3,075 \pm 26,53$ SSP = $1,045201 \pm 3,704577$.

Los análisis de correlación sólo para las cuatro cuencas indican que el clima es un factor importante sobre la evolución del relieve para el sector suroeste de Venezuela, la correlación fuertemente negativa o anticorrelación entre los índices de erosión con la redondez de los granos demuestra que la erosión calculada está muy limitada y no cuantifica el grado de erosión que poseen los orógenos de donde provienen tales muestras. En contraste la baja redondez y esfericidad de las muestras de Cataniapo y Parguaza indica una fuente muy cercana. Estos resultados son

coherentes con las edades por trazas de fisión en circones encontradas al final de la presente investigación.

Este trabajo demuestra que las 3 cuencas están drenando áreas completamente diferentes en términos de edades, lo que se traduce en múltiples fuentes, por ejemplo, la muestra del río Cataniapo con edades de $59,9 \pm 8$ Ma (Paleoceno-Eoceno) y 854.6 ± 100 Ma (Precámbrico), está drenando gran parte del cratón de Guayana; la muestra del río Meta drena áreas mucho más jóvenes cuyas edades coinciden con las edades reportadas dentro de Los Andes de Venezuela por Kohn et al., (1984) y en la Cordillera Oriental de Colombia, para esta muestra pudo discriminarse tres poblaciones de edades: $87,8 \pm 10$ Ma (Cretácico tardío), $191,5 \pm 60$ Ma (Mesozoico) y $383,3 \pm 45$ Ma (Paleozoico). Por último, en la muestra del río Parguaza se encuentran dos poblaciones de edades: $466,7 \pm 170$ Ma (Paleozoico), y $903,5 \pm 208$ Ma (Precámbrico).

Los resultados aquí mostrados permiten disponer de una metodología robusta para el estudio de las topoformas, las mismas en el caso del área de estudio están fuertemente influenciadas por el clima.

Por último, se recomienda realizar análisis de microscopía electrónica de transmisión para el análisis textural de los granos ya que esto arrojaría mayor información acerca de los mecanismos y los procesos que intervienen durante el transporte de sedimentos. Adicionalmente, es necesario extender el área de trabajo hacia la Cordillera Oriental de Colombia de donde provienen parte de los sedimentos de los ríos Meta y Caroní, y realizar en ellos el estudio de la discriminación entre clima, relieve y tectónica.

Se recomienda fechar las fracciones de apatitos de los sedimentos de las diferentes áreas consideradas en este trabajo, e incluir los datos de sismicidad de la falla de Guri y otros sistemas de fallas presentes en la zona para comparar tasas de erosión a largo plazo, con las de corto plazo y su relación con la sismicidad en orden de discriminar la influencia de la tectónica.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M (2008). New geological and single-zircon Pb evaporation data from the Central Guyana Domain, southeastern Roraima, Brazil: Tectonic implications for the central region of the Guyana Shield, *Journal of South American Earth Sciences* 26 (2008) 318–328

BALDWIN, S (1986). Fission track evidence for the source of accreted sandstones, Barbados: *Tectonics*, v. 5, p. 457-468

BENAIM, N (1972). Geología de la región de Botanamo estado Bolívar. VI Congreso de Geología Venezolano, Caracas. p. 1292-1314 .

BERMÚDEZ, M (2006). Procedimientos del Laboratorio de Termocronología de la UCV para la datación de eventos tecto-térmicos recientes mediante el método de huellas de fisión en apatitos detríticos. Trabajo de Ascenso a Profesor Agregado, Caracas.

BERMÚDEZ, M Y OTROS (2009). Exhumación Diacrónica durante el Mioceno – Plioceno de Los Andes de Mérida. Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

BERMÚDEZ, M. (2009). Patrones de Exhumación Cenozoica de Los Andes de Venezuela, Tesis Doctoral, Universidad Joseph Fourier, Francia.

BERMÚDEZ, M Y OTROS (2012). Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes, *Publication Geological Society of America*. Caracas.

BOGGS, S (2009). Petrology of sedimentary rocks. 2da Edition, Cambridge University Press, Cambridge, England. Hardback, 600 p.

CARVER, E (1971). Procedures in sedimentary petrology. Wiley-Interscience, New York, 653 p.

CONDIE Y SLOAN (1998). Origin and Evolution of earth : Principles of historical Geology. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 498 p.

CODECIDO, G (1969). Geología; técnica para el estudio de los minerales pesados y su aplicación en la estratigrafía de Venezuela. S.L. [s.e.](#) , Venezuela, Caracas. 24 p.

COLLINS, T (2007). Image J for microscopy. Biotechniques, 43 (Suppl.1), p. 25-30 .

COELLO, V (2012). Significado tectónico y procedencia de la formación Guárico a través de análisis petrográfico y minerales pesados, Venezuela norcentral. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

COELLO, R (2012). Integración geológica de la región Bobare – Farriar entre los estados Lara y Yaracuy, Trabajo Especial de Grado, U.C.V, Venezuela, Caracas.

DAVILA, J (1998). Estudio de la distribución de cuarzo y caolinita en los perfiles de meteorización desarrollados sobre una roca granítica. Trabajo Especial de Grado, Instituto de Ciencias de la Tierra, Escuela de Química, Facultad de Ciencias; U.C.V, Caracas.

ENGLAND, P Y OTROS (1990). Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks: Geology, v. 18, p. 1173-1177.

FERNANDEZ, M Y GUTIERREZ, E (1965). Preparación Mecánica de Minerales y Carbones. Métodos de concentración por gravedad, separación magnética o eléctrica y flotación. Dossat, 580 p.

FERREIRA T, Y RASBAND W (2012). Image J, user guide /IJ 1,46 r, available online: <http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>.

FLORES, J Y MÉNDEZ, A (2005). Correlación estratigráfica y geocronológica de las quebradas Hoyos y Vichú por el método de huellas de fisión, Formación 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, Caracas.

FLORES, M (2013). Estudio de la relación entre clima, erosión y tectónica a lo largo del río Guárico mediante análisis geomorfológicos, geológicos y datos termocronológicos existentes. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Caracas.

FRIMMEL, H Y OTROS (2002). Neoproterozoic tectonic and climatic evolution recorded in the Gariep Belt, Namibia and South Africa, Basin Research, Vol 14, No 1, March 2002, p. 55 – 67.

FOLEY, S (2008). Rejuvenation and erosion of the cratonic lithosphere

FORBES, C (2012). Cooling and exhumation history of the northeastern Gawler Craton, South Australia: Precambrian Research, v. 200-203, p. 209-238.

HESS, H (1959). Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator: S.G. Frantz Co. Instrument Instruction Booklet, 6 p.

GAMERO, A Y RAVETI, M (2011). Estudio geoquímico y Mineralógico de minerales pesados en la zona Nor-Occidental del estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado UCV, Caracas.

GIBBS, A (1987). Proterozoic volcanic rocks of the northern Shield, South America. Geochemistry and Mineralization of Proterozoic Volcanic Suites. Geol. Soc. London, Special Publish, p. 275-288.

GONZALEZ, J (1980). Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. Tomo II. FONINVES, 1029 p.

GONZÁLEZ, R Y OTROS (2000). “Regional Geology of the upper Rio Negro

River area, Amazon, Brazil”. En: 31st Int. Geol.Cong., Rio de Janeiro.

GONZÁLEZ, R (2006). Atlas geográfico histórico del estado Aragua,República Bolivariana de Venezuela : contiene material pedagógico y turístico de sus 18 municipios, Editorial El Aragüeño, Venezuela, 133 p.

GHOSH, S (1985). “Geology of the Roraima Group and its implications”. En: Mem. I Simp.Amaz., Puerto Ayacucho, Caracas, p. 33-50.

HACKLEY Y OTROS (2005). Mapa geológico de Venezuela. Open file 2005-1038. USGS, 2 p.

HERRERA, G (2004). Caracterización geoquímica de los minerales pesados provenientes de la cuenca del río Aro, estado Bolívar, Venezuela. TEG para optar al título de Lic. En Geoquímica, Escuela de Química, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

HURLEY, P (1968). Some orogenic episodes in South America by K-Ar and Whole rock Rb-Sr dating. Can. Jour. Earth Sci., 5, p. 633-638.

HURTADO, R (2005). Estudio del comportamiento geoquímico de cinc en la zona de máxima meteorización del perfil laterítico del yacimiento de bauxita los Pijiguaos, Edo. Bolívar, Venezuela.. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Licenciado en Geoquímica, inédito, Caracas.

KRUMBEIN, C (1941). Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology 11, p. 64–72.

KLEIN, C Y HURLBUT, C (1997). Manual de mineralogía. 4ta edición, Reverté S.A, Madrid , 675 p.

LO MONACO, S Y YANES, C (1990). Model for bauxite formation, Los Pijiguaos, Venezuela. Chemical Geology. Trabajo Especial de Grado. Francia.

MASON, B Y MOORE, C (1982). "Principles of geochemistry", Jhon Wiley and Sons, New York. 4ta edition, 344 p.

MAYER, L (1990). Introduction to Quantitative Geomorphology: an exercise manual, Englewood Cliffs NJ, Prentice Hall, 380 p.

MENÉNDEZ, A (1964). "Geología del Area de El Tinaco, centro-norte del Estado Cojedes, Venezuela". En: Bol. Geol. Caracas 6 (12), p. 417-543.

MENÉNDEZ, A Y OTROS (1968). Revisión de la estratigrafía de la Provincia de Pastora según el estudio de la región de Guasipati, Guayana venezolana. Bol. Geol., Vol. 9, Nro 19, p. 309-338.

MENÉNDEZ, A (1994). "Cinturones de Rocas Verdes del Escudo de Guayana en Venezuela; Revisión Estratigráfica". En: III Simp. Int. del Oro en Venezuela., Libro de Memorias., Asoc. Venez. del Oro, Caracas, p. 123-139.

MENDOZA, V (1974). Evolución tectónica del Escudo de Guayana. Segundo Congreso Latinoamericano de Geología. Boletín Geológico, Publicación Especial, Caracas, p. 2237-2270.

MENDOZA, V (1993). Caracterización geoquímica de los resistatos pesados y minerales asociados recolectados en el alto Paragua, edo. Bolívar, Trabajo especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Ciencias U.C.V, Caracas.

MELLENDEZ, W (1995). Distribución de elementos químicos y minerales pesados en perfiles de meteorización desarrollados sobre una roca granítica a diferentes niveles topográficos. Trabajo Especial de Ascenso, Facultad de Ciencias. U.C.V, Caracas.

MENDOZA, V (2005). Geología de Venezuela, Tomo II. Cretácico, Terciario y Reciente Sedimentario de Venezuela. UDO. Escuela de Ciencias de la Tierra. Ciudad Bolívar.

MELLENDEZ, W (2006). Estudio químico y mineralógico del yacimiento de bauxita de los Pijiguaos. Edo. Bolívar. Tesis doctoral, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, U.C.V, Caracas.

MITCHELL, W (1975). Heavy Minerals Soil Components. Ed. Gieseking Jhon Eldou, 2, p. 449-480.

MILOVSKI, V (1982). Mineralogía. Editorial Mir, Moscú, 58 p.

MOORE Y BURCH (1986). Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. Soil Society of America Journal, 50, p. 1294 – 1298.

MOORE, GRAYSON Y LADSON (1991). Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological processes, 5: 3-30 p.

MORTON Y HALLSWORTH (1994). Identifying provenance-specific features of heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, p. 241-256.

MORENO, Y (1996). Estudio geoquímico de los minerales pesados que drenan las rocas del complejo Cuchivero, estado Bolívar y Amazonas. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias U.C.V, Caracas.

MORTON Y HALLSWORTH (1999). Identifying provenance-specific features of heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology, p. 124, 3-29.

PETTIJHON, F (1975). Sedimentary rocks. New York: Harper and Brothers, 628 p.

PDVSA-LÉXICO ESTRATIGRÁFICO (2010). Fm Esmeralda, Fm Moriche, Fm Cinaruco, Fm Caicara, Fm Granito de Parguaza, Grupo Roraima y Grupo Cuchivero. <http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm>, consulta 29 Octubre 2013.

RÍOS, J (1972). Geología de la región de Caicara, estado Bolívar. 4to Congreso geológico venezolano, Boletín de geología Publicación Especial Vol. 5, p. 1759-1782.

RING, U (1999). Exhumation Processes: Normal Faulting, Ductile Flow, and Erosion. Geological Society, London, Special Publications, v.154, p.1-27.

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

ROGERS, J (1996). A history of continents in the past three billion years. Journal of geology, U.S. 91-107 p.

COSTA, R Y OTROS (2009). 40Ar–39Ar geochronology across Archean and Paleoproterozoic terranes from southeastern Guiana Shield (north of Amazonian Craton, Brazil): Evidence for contrasting cooling histories, Journal of South American Earth Sciences 27 113–128.

SAVAT, J Y OTROS (1982). Common and uncommon selectivity in the process of fluid transportation: field observations and laboratory experiments on barc surfaces. U.S, Catena Supplement: 60-139 p.

SIDDER, M Y OTROS (1995). Sidder, G.B., 1995. “Geology and Mineral Deposits of the Venezuelan Guayana Shield.” En: U.S. Geol. Surv. Bull. Núm. 2.124 A, p. 01-20.

TEIXEIRA, W Y TASSINARI, C (2000). “Sm-Nd constrains on protoligh age of the Archean Imataca Complex, Venezuela”. En: II South American Symposium on Isotope Geology, Acta, p. 136-138.

TEIXEIRA, W (2002). Características isotópicas(Nd - Sr) do plutonismo intrusivo no Extremo NW do Cráton Amazônico, Venezuela, e implicações para a evolução Paleoproterozóica”. En: Geol. USP Sér. Client., Sao Paulo, Vol. 2, p. 131-141.

TUCKER, K Y WHIPPLE, G (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models; sensitivity analysis and intermodal comparison. Journal of Geophysical Research. U.S.A. Massachusetts, p. 1671-1684.

TRICART, J (1978). Géomorphologie applicable. Masson, Estados Unidos, New York. 24 p.

VILA, M. (1965). Corporación Venezolana de Fomento, División de estudios generales, Venezuela. 235p.

VIANA, C Y ARCIA, Z (2013). 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. Facultad de Ingeniería, Biblioteca de las Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar por el grado académico Titular, Caracas.

WANG, Y Y OTROS (2013). Cratonic reactivation and orogeny: An example from the northern margin of the North China Craton: Gondwana Research, v. 24, p. 1203-1222.

WADELL, C (1932). Shape and roundness of rock particles. University of Michigan, U.S. 443-451 p.

WILSON, J Y GALLANT, J (2000). Digital terrain analysis. in: Wilson, J., and Gallant, J. (eds), Terrain Analysis: Principles and Applications, New York :John Wiley and Sons: p. 1-26.

YORIS, F (1992). Estudio de secuencias clásticas por métodos petrográficos y estadísticos. Tomo I, II, III, IV. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Biblioteca de las Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado para optar por el grado académico Titular, Caracas.

YORIS Y OSTOS (1997). Geología de Venezuela: Geología general y Cuencas Petrolíferas. En: Singer, J., ed., WEC 1997. Evaluación de pozos: Schlumberger-Sureco C.A. 1ra ed., Jolley Printing, Texas.

ZHANG, Y (2005). Global tectonic and climatic control of mean elevation of continents, and Phanerozoic sea level change, Earth and Planetary Science Letters 237, p. 524 – 531.