

**INFLUENCIA DEL CLIMA Y EL TRANSPORTE EN LA PROCEDENCIA Y
COMPOSICIÓN DE ARENAS FLUVIALES EN LA CUENCA DE DRENAJE DEL
RÍO META. MARGEN ORIENTAL DE COLOMBIA. ZONA CENTRAL.**

RICARDO AMOROCHO PARRA
Geólogo

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2011**

**INFLUENCIA DEL CLIMA Y EL TRANSPORTE EN LA PROCEDENCIA Y
COMPOSICIÓN DE ARENAS FLUVIALES EN LA CUENCA DE DRENAJE DEL
RÍO META. MARGEN ORIENTAL DE COLOMBIA. ZONA CENTRAL.**

RICARDO AMOROCHO PARRA

Geólogo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

MAGÍSTER EN GEOLOGÍA

Director:

GEÓLOGO PhD. GERMAN BAYONA

Corporación Geológica ARES

Co – Director:

GEÓLOGO Msc. ANDRES REYES HARKER

ECOPETROL - ICP

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS**

ESCUELA DE GEOLOGÍA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2011

Gracias Maestro por tu infinita misericordia
y por amarnos hasta la muerte!

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue posible gracias a:

El aporte intelectual, económico y moral del Dr. Germán Bayona y la Corporación Geológica ARES.

La colaboración y seguimiento del Geol. Msc. Andres Reyes Harker del Instituto Colombiano del Petróleo – ECOPETROL.

El Dr. Andrés Mora por su colaboración en la ejecución del presupuesto para la realización de los trabajos de laboratorio en el Instituto Colombiano del Petróleo – ECOPETROL.

El Geol. Msc. Jorge Pinto Valderrama director de la Escuela de Geología y Coordinador del programa de Maestría en Geología de la Escuela de Geología – UIS por su colaboración e incansable empeño para que el programa fuese un éxito.

Los compañeros de maestría por su inagotable apoyo intelectual, moral y buenos deseos en la finalización de este trabajo de investigación.

Las personas que hacen parte de los equipos humanos de los laboratorios de Difracción de Rayos X, Microscopía SEM y preparación de muestras de roca en el Instituto Colombiano del Petróleo – ECOPETROL, por la colaboración brindada durante la realización de los trabajos de laboratorio.

Mariana mi hija que es mi motor y siempre me da fuerza para continuar.

Los que no he nombrado aquí porque aunque están en el anonimato también

fueron parte importa y fueron un apoyo inmenso en la ejecución y finalización de este trabajo de investigación.

MUCHAS GRACIAS!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	25
1. OBJETIVOS	27
1.1 OBJETIVO GENREAL	27
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
2. GENERALIDADES	28
2.1 UBICACIÓN ÁREA DE ESTUDIO	28
2.2 FISIOGRAFÍA Y CLIMA	31
2.2.1 Ecosistemas	31
2.2.2 Clima y Vegetación	33
2.2.3 Hidrografía	36
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	40
3.1 ESTRATIGRAFÍA	40
3.2 MARCO TECTÓNICO ACTUAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	43
3.3 GEOMORFOLOGÍA	46
4. ANTECEDENTES	49
5. METODOLOGÍA	67
5.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS EN CAMPO	69
5.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO	72
6. RESULTADOS	82
6.1 CARACTERÍSTICAS COMPOSICIONALES DEL ÁREA FUENTE PARA	

LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META (CHRM)	82
6.2 RESULTADOS DE LA TOMA DE MUESTRAS EN CAMPO	86
6.3 RELACION ENTRE DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO EN LA CHRM Y LA PENDIENTE DE CADA CUENCA HIDROGRAFICA	90
6.3.1 Cuenca Hidrográfica del Río Humadea	91
6.3.2 Cuenca Hidrográfica del Río Guayuriba	92
6.3.3 Cuenca Hidrográfica del Río Cusiana	93
6.3.4 Cuenca Hidrográfica del Río Ariporo	94
6.3.5 Cauce Principal del Río Meta	94
6.4 RESULTADOS DE LA PETROGRAFIA EN LAS MUESTRAS DE ARENA COLECTADAS EN LA CHRM	97
6.4.1 Identificación Composicional de los Tipos de Granos	97
6.4.2 Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Rocas Metamórficas y Metasedimentarias	101
6.4.3 Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Rocas Sedimentarias	111
6.4.4 Composición de las Muestras Tomadas en el Cauce Principal del Río Meta	120
6.5 RESULTADOS DE LAS IMÁGENES TOMADAS EN GRANOS DE CUARZO CON EL MICROSCOPIO DE ESCANEEO ELECTRÓNICO (SEM)	137
6.5.1 Resultados del Análisis SEM en las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Metamórfica y Metasedimentaria	137
6.5.2 Resultados del Análisis SEM en las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Sedimentaría	140

6.5.3 Resultados del Análisis SEM en las Muestras Colectadas en el Cauce Principal del Río Meta	143
6.6 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DR-X)	147
6.6.1 Muestras de Lodo en los Afluentes con Área Fuente de Composición Metamórfica y Metasedimentaria	147
6.6.2 Muestras de Lodo Tomadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Sedimentaria	150
7. INFLUENCIA DEL ÁREA FUENTE, TRANSPORTE Y CLIMA EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META	154
7.1 INFLUENCIA DEL ÁREA FUENTE	154
7.1.1 Influencia del Área Fuente en la Composición de las Muestras Tomadas en los Afluentes que Drenan el Sector con Rocas Metamórficas y Metasedimentarias	156
7.1.2 Influencia del Área Fuente en la Composición de las Muestras Tomadas en los Afluentes que Drenan el Sector con Rocas Sedimentarias	159
7.1.3 Influencia del Área Fuente y/o Contaminación de Afluentes en la Composición de las Muestras en el Cauce Principal del Río Meta	162
7.2 INFLUENCIA DEL TRANSPORTE EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS DE ARENA COLECTADAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META (CHRM)	169
7.2.1 Influencia del Transporte en la Composición de las Muestras de Arena Colectadas en los Afluentes con Morfología Recta	170
7.2.2 Influencia del Transporte en la Composición de las Muestras de Arena Colectadas en los Afluentes con Morfología Meandriforme	174

7.2.3 Influencia del Transporte en la Composición de las Muestras de Arena Colectadas en el Cauce Principal del Río Meta	178
7.3 INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS COLECTADAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META	185
7.3.1 Influencia del Clima en la Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Metamórfica y Metasedimentaria	186
7.3.2 Influencia del Clima en la Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Sedimentaria	188
7.4 PONDERACION DE FACTORES QUE CONTROLAN LA COMPOSICION DE LAS ARENAS Y LODOS FLUVIALES DE LA CUENCA DEL RIO META	193
CONCLUSIONES	195
REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS	198
ANEXOS	206

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de las formaciones aflorantes en la Cuenca Hidrográfica del Río Meta utilizando la nomenclatura propuesta por ECOPETROL para el Terciario en el sector del piedemonte de los Llanos Orientales	41
Tabla 2. Propuesta de correlación estratigráfica generalizada para la Cuenca de los Llanos. Modificado de INGEOMINAS, 2004.	43
Tabla 3. Relación de muestras recolectadas Vs análisis realizados.	72
Tabla 4. Relación de muestras a las que se les elaboró sección delgada	81
Tabla 5. Relación de muestras a las que se les realizó análisis SEM.	81
Tabla 6. Relación de muestras a las que se les realizó análisis DR-X.	81
Tabla 7. Composición de las rocas en el área fuente para los cuatro afluentes estudiados y tipos de fragmentos de roca esperados en los sedimentos fluviales de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM)	83
Tabla 8. Valores porcentuales en el área fuente de cada una de las formaciones rocosas expuestas	84
Tabla 9. Relación de muestras colectadas para cada río dentro de la CHRM.	86
Tabla 10. Resultados de los primeros cuatro momentos estadísticos sobre la media para las muestras colectadas en la CHRM	90
Tabla 11. Categorías, grupos composicionales, abreviaturas y criterios diagnóstico	100
Tabla 12. Valores porcentuales de las rocas expuestas en el área fuente y de los granos contados en las muestras de arena	103
Tabla 13. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Humadea (M66 más cercana al área fuente) y cerca de la confluencia del Río Humadea	

y el Río Guayabero (M61 más distal al área fuente).	147
Tabla 14. Valores porcentuales en la fracción $<2\mu$, obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Humadea (M66) y cerca de la confluencia del Río Humadea y el Río Guayabero (M61)	148
Tabla 15. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Guayuriba (M70) y cerca de la confluencia entre los ríos Guayuriba y Metica (M56)	149
Tabla 16. Valores porcentuales en la fracción $<2\mu$, obtenidos a partir de DR-X en las muestras de lodo tomadas en el Río Guayuriba (M70) y cerca de la confluencia entre los ríos Guayuriba y Metica (M56)	149
Tabla 17. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Cusiana (M79) y cerca de la confluencia con el Río Meta (M28)	151
Tabla 18. Valores porcentuales en la fracción $<2\mu$, obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Cusiana (M79) y cerca de la confluencia con el Río Meta (M28)	151
Tabla 19. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Ariporo (M86) y en el Río Meta (M14 y M3)	152
Tabla 20. Valores porcentuales en la fracción $<2\mu$, obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Ariporo (M86) y en el Río Meta (M14 y M3)	153

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación regional de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM)	30
Figura 2. Mapa de ecosistemas en Colombia. La CHRM está delimitada en negro. Río H: Humadea; Río G: Guayuriba.	32
Figura 3. Mapa de zonas con diferencias de temperatura.	34
Figura 4. Mapa de zonas con diferencias en el régimen de lluvias.	35
Figura 5. Mapa de zonas con diferencias de vegetación y clima.	38
Figura 6. Mapa Hidrográfico del área de estudio.	39
Figura 7. Mapa geológico generalizado de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta.	42
Figura 8. Mapa de fallas activas en el piedemonte llanero.	45
Figura 9. Geoformas fluviales en cauce del Río Metica.	47
Figura 10. Geoformas fluviales en el cauce del Río Meta.	48
Figura 11. Ubicación de las muestras tomadas en la Cuenca Hidrográfica del Río Orinoco.	59
Figura 12. Diagrama de composición de las arenas de la cuenca hidrográfica del Río Orinoco.	60
Figura 13. Diagrama donde se muestran las variedades de cuarzo en la cuenca hidrográfica del Río Orinoco.	62
Figura 14. Composición de las arenas del Frente Andino	63
Figura 15. Diagrama de un sistema fluvial idealizado	66
Figura 16. Fotografía que muestra la toma de muestras en campo.	69
Figura 17. Esquema que muestra la geomorfología de un río recto y los sectores de muestreo (barra lateral y planicie de inundación).	70
Figura 18. Esquema que muestra la geomorfología de un río meandriforme	

y el sector de muestreo (barra de punto y planicie de inundación).	71
Figura 19. Esquema que muestra la geomorfología de un río trenzado y los sectores de muestreo.	72
Figura 20. Fotografía en nicoles paralelos que ilustra la elección de un grano contado fuera del retículo	74
Figura 21. Mapa geológico detallado donde se ubican las cuatro subcuencas de los afluentes analizados y la CHRM	85
Figura 22. Ubicación de las 75 muestras de arena colectadas en la CHRM	88
Figura 23. Ubicación de las 10 muestras de lodo colectadas en la CHRM	88
Figura 24. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Humadea con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras	91
Figura 25. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Guayuriba con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras	92
Figura 26. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Cusiana con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras	93
Figura 27. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Ariporo con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras	95
Figura 28. Perfil topográfico aproximado del cauce principal del Río Meta, ubicación de algunas muestras y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras	96
Figura 29. Ubicación de las 44 muestras de arena seleccionadas para petrografía.	99

Figura 30. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras de los ríos Humadea (muestras M59 y M65) y Guayuriba (muestra M76)	102
Figura 31. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos granos de alterita en algunas muestras de los Ríos Humadea (M59) y Guayuriba (M68)	104
Figura 32. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Humadea	105
Figura 33. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Guayuriba	106
Figura 34. Composición de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente metamórfica y metasedimentaria	108
Figura 35. Madurez composicional de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente metamórfica y metasedimentaria.	109
Figura 36. Composición de los granos poliminerálicos en las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente metamórfica y metasedimentaria	110
Figura 37. Variación en la relación de cuarzo policristalino (Qp) y cuarzo total (Qt), fragmentos de roca foliada (Rmsf) y fragmentos de roca total (Rt), y fragmentos de roca con glauconita (Rglc) y fragmentos de roca (R), para los Ríos Humadea y Guayuriba	111
Figura 38. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria en algunas muestras de los ríos Cusiana (muestras M78 y M38) y Ariporo (muestras M85 y M13)	112

Figura 39. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Cusiana	113
Figura 40. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Ariporo	114
Figura 41. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando granos de cuarzo, un fragmento de roca sedimentaria y un grano de ferricrita en una de las muestras del Río Cusiana	115
Figura 42. Composición de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente sedimentaria	117
Figura 43. Composición de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente sedimentaria	118
Figura 44. Composición de los granos poliminerálicos en las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente sedimentaria	119
Figura 45. Variación en la relación de cuarzo policristalino (Qp) y cuarzo total (Qt), fragmentos de roca foliada (Rmsf) y fragmentos de roca total (Rt), y fragmentos de roca con glauconita (Rglc) y fragmentos de roca (R), para los Ríos Cusiana y Ariporo	120
Figura 46. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria, metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Metica (primer segmento del Río Meta)	122
Figura 47. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Metica	123
Figura 48. Composición de las muestras de arena tomadas en el cauce principal del Río Meta	124
Figura 49. Madurez composicional de las muestras de arena tomadas en el cauce principal del Río Meta	125
Figura 50. Composición de los granos poliminerálicos en las muestras de	

arena tomadas en el cauce principal del Río Meta	126
Figura 51. Variación en la relación de cuarzo policristalino (Qp) y cuarzo total (Qt), fragmentos de roca foliada (Rmsf) y fragmentos de roca total (Rt), y fragmentos de roca con glauconita (Rglc) y fragmentos de roca (R), para los tres segmentos del Río Meta.	127
Figura 52. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria, metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (segundo segmento)	128
Figura 53. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (segundo segmento)	129
Figura 54. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria, metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (tercer sector)	130
Figura 55. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (tercer sector)	131
Figura 56. Diagrama propuesto por Basu y otros (1975), donde se muestra la procedencia de los diferentes granos de cuarzo en las muestras de arena de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta.	133
Figura 57. Mapa composicional (QtFR) para los 4 afluentes y el cauce principal del Río Meta.	135
Figura 58. Mapa donde se marca la presencia de la glauconita por sectores.	136
Figura 59. Imágenes tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos	

de cuarzo en las muestras tomadas en el Río Humadea	138
Figura 60. Imágenes tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas algunos granos de cuarzo en las muestras tomadas en el Río Guayuriba.	139
Figura 61. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el Río Cusiana	141
Figura 62. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas algunos granos de cuarzo en las muestras tomadas en el Río Ariporo	142
Figura 63. Imágenes tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el primer segmento del Río Meta	144
Figura 64. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el segundo segmento del Río Meta	145
Figura 65. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el tercer segmento del Río Meta	146
Figura 66. Composición de las muestras de arcilla (fracción $<2\mu$) en el Río Humadea	148
Figura 67. Composición de las muestras de arcilla (fracción $<2\mu$) tomadas en el Río Guayuriba (M70) y cerca de la confluencia del Río Guayuriba con el Río Metica (M56)	150

Figura 68. Composición de las muestras de arcilla (fracción $<2\mu$) tomadas en el Río Cusiana (M79) y cerca de la confluencia con el Río Meta (M28)	152
Figura 69. Composición de las muestras de arcilla (fracción $<2\mu$) tomadas en el Río Ariporo (M86) y en el Río Meta (M14 y M3)	153
Figura 70. Esquema donde se muestran las zonas en la Cuenca Hidrográfica del Río Meta según la clasificación de Schumm (1977) y Niño (2004)	155
Figura 71. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de feldespatos (F) a medida que aumenta la distancia de transporte con el área fuente	157
Figura 72. Variación irregular de cuarzo total (Qt), feldespatos (F) y fragmentos de roca (FR) a medida que aumenta la distancia con el área fuente	158
Figura 73. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte con el área fuente	161
Figura 74. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte con el área fuente	162
Figura 75. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte en el primer segmento del Río Meta (Río Metica)	164
Figura 76. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte en el segundo segmento del Río Meta. El chert es sumado al cuarzo total	166
Figura 77. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los granos de R a medida que aumenta la distancia de transporte	

en el tercer segmento del Río Meta	168
Figura 78. Esquema donde se ilustra la ubicación de las muestras M85 y M11 en el Río Ariporo, M9 y M4 en el tercer segmento del Río Meta	184
Figura 79. Mapa donde se muestra las zonas de erosión limitada por la meteorización y el transporte en la CHRM.	194

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo B. Flujograma de trabajo que muestra la metodología utilizada.	207
Anexo B. Convenciones utilizadas por algunos trabajos donde se relacionan las categorías de los granos reconocidos durante la petrografía modal.	208
Anexo C. Tabla de resultados porcentuales recalculados para la composición de las muestras de la CHRM.	209
Anexo D. Difractogramas de las muestras del río Humadea	211
Anexo E. Difractograma de la muestra del río Guayuriba.	213
Anexo F. Difractograma de la muestra del río Cusiana	214
Anexo G. Difractograma de la muestra del río Ariporo	215
Anexo H. Difractogramas de las muestras de cauce principal del Río Meta	216

RESUMEN

TITULO: INFLUENCIA DEL CLIMA Y EL TRANSPORTE EN LA PROCEDENCIA Y COMPOSICIÓN DE ARENAS FLUVIALES EN LA CUENCA DE DRENAJE DEL RÍO META. MARGEN ORIENTAL DE COLOMBIA. ZONA CENTRAL*.

AUTOR: RICARDO AMOROCHO PARRA**

Palabras claves: Composición arenas fluviales, depósitos fluviales, área fuente, transporte y clima.

DESCRIPCIÓN

La Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM) está ubicada en los Llanos Orientales de Colombia. Con la información obtenida de la composición de muestras de arena y lodo se realizó una ponderación de los factores que controlan el cambio de la composición de los sedimentos fluviales a diferentes distancias del área fuente (pocos kms hasta >400 kms), en condiciones climáticas predominantemente tropicales. La composición de las arenas fluviales pertenece a dos grupos. Las arenas cerca al área fuente son litoarenitas, en los afluentes perpendiculares a la cordillera; esta composición se mantiene entre los primeros 25-45 Kms donde el área fuente es predominantemente sedimentaria. Entre 40-60 Kms donde el área fuente incluye rocas metamórficas. En el Río Meta, las arenas son litoarenitas hasta los 140 Kms de distancia perpendicular al área fuente. La composición de las arenas se mantiene como sublitoarenita a distancias que superan los 480 Kms del área fuente. Los factores que influyen en la composición son: a) la composición del área fuente; b) el transporte; c) el clima; y d) la variación composicional de las arenas que transportan los afluentes a lo largo del Río Meta. De este modo, en sectores con régimen de pluviosidad alto y con pendientes abruptas, en ríos geomorfológicamente rectos, la composición de las arenas es predominantemente litoarenitas y está controlada principalmente por la composición del área fuente y la intensidad del transporte (ó erosión limitada por la meteorización). En sectores con régimen de pluviosidad alto y pendiente suave, en ríos geomorfológicamente meandriformes, la composición de las arenas es predominantemente sublitoarenitas y está controlada fundamentalmente por la meteorización química (ó erosión limitada por el transporte). Los ríos que nacen en los planos aluviales de los Llanos y re trabajan los depósitos aluviales tienen arenas de composición cuarzo arenita (e.g. Río Manacacias).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Director: PhD. German Bayona; Co – Director: Msc. Andrés Reyes Harker.

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF THE WEATHER AND TRANSPORT IN THE PROVENANCE AND COMPOSITION OF FLUVIAL SANDS IN THE META RIVER DRAINAGE BASIN. COLOMBIAN EAST. CENTRAL ZONE*.

AUTHOR: RICARDO AMOROCHO PARRA**

KEYWORDS: Compositions, Fluvial Deposits, Source Area, Transport and Weather.

DESCRIPTION:

The Hydrographic Meta River Basin is part of foreland basin located in Llanos Orientales of Colombia. With the information obtained from sand and mud samples was weighted the factors that control the change in the composition of river sediments to different distances of source area (fewer than kilometers 400 kilometers) in tropical climatic conditions mainly. The compositions in the fluvial sands are in two teams. The sands near to source area are litoarenites, in the rivers perpendiculars to East Cordillera; this composition is keep between 25-45 kilometers where the source area is sedimentary mainly, and between 40-60 kilometers where the source area is metamorphic rocks. In the Meta River, the composition of sands is litoarenite for 140 kilometers of perpendicular distance to source area. The composition of sands is keep as sublitoarenite for distances >480 kilometers to source area. Factors influencing the composition of fluvial deposits are: a) the composition of the source area; b) transport; c) the climate; and d) the compositional variation of the sand transported along the tributaries of the Meta River. Thus, in areas with high rainfall regime with steep slopes, rivers geomorphologically straight, the composition of the sand is dominantly lithoarenites and is mainly determined by the composition of the source area and intensity of transport (or limited by erosion weathering). In areas with rainfall regime is high and gentle slope in geomorphological meandering rivers, the composition of the sand is dominantly sublitharenites and is mainly controlled by chemical weathering (erosion or limited by the transport). The rivers that originate in the plains and reworked alluvial deposits are sands of quartz arenite composition (eg Manacacias River).

* Work of Grade

** Ability of Physiochemical Engineerings. School of Geology. Director: Director: PhD. German Bayona; Co – Director: Msc. Andrés Reyes Harker.

INTRODUCCIÓN

Los análisis de procedencia se realizan para inferir la composición de la roca fuente erodada y el ambiente tectónico del área donde provienen los sedimentos, a partir de la identificación composicional de areniscas (Basú, 1985; Dickinson, 1985; Johnsson et al., 1991). La composición de la roca fuente, el clima, el relieve, la pendiente, la vegetación y la dinámica de los ambientes fluviales son factores que toman un importante papel en el control de la composición de las arenas fluviales modernas (Basu, 1985; Suttner y Dutta, 1986; Grantham y Velbel, 1988). Por consiguiente, la correlación entre composición de areniscas y ambiente tectónico es un proceso complejo que requiere el análisis de los factores arriba enunciados (Johnsson et al., 1991).

En el norte de Suramérica se han realizado varios trabajos para tratar de entender como estos factores influyen en la depositación de arenas en los sistemas fluviales actuales, y la mayoría se han concentrado en los sistemas fluviales de los ríos Amazonas y Orinoco (Johnsson y Stallard, 1989; Johnsson y Meade, 1990; Johnsson et al., 1991). Estos trabajos a nivel regional muestran de forma general como se forman los depósitos de arenas bajo ciertas características climáticas y geológicas bien conocidas.

Los estudios en arenas de ríos modernos permiten evaluar la relativa importancia de los procesos que controlan la composición de arenas en el registro geológico. Con el objeto de realizar una correlación más exacta entre los depósitos de arenas y el área fuente, es necesario establecer cuál es el control que ejercen las características fisiográficas y climáticas de las regiones de donde proceden los sedimentos (Johnsson et al., 1991). Por ejemplo, el transporte es un factor que ha generado gran controversia debido a que dependiendo del rigor del clima, la distancia recorrida por los sedimentos y el tipo de mecanismo de transporte, se

generarán depósitos que pueden permitir o no identificar el tipo de roca fuente de donde proceden.

En la Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM) se conoce la composición del área fuente, las características fisiográficas, las condiciones climáticas y el ambiente tectónico. Lo anterior permite evaluar la correlación entre la composición de las arenas y el área fuente, y determinar como los otros factores influyen el control de la composición de las arenas fluviales en la cuenca antepaís de los Llanos Orientales de Colombia. En este estudio se realizó un muestreo consecutivo a lo largo del Río Meta y algunos afluentes para determinar el control en la composición de los depósitos de arenas de áreas fuentes conocidas. Además, la estrategia de muestreo dentro de la Cuenca permite comparar la variación de la composición a medida que se aumenta la distancia desde al área fuente y en los sectores donde las condiciones climáticas son diferentes. Los resultados de este trabajo pueden aplicarse adicionalmente a realizar comparaciones con los resultados de trabajos en cuencas de antepaís desarrolladas en condiciones climáticas tropicales.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENREAL

Determinar cuál es la influencia que ejerce el clima y el transporte en la composición en las arenas fluviales de la cuenca de drenaje del Río Meta, utilizando el conocimiento sobre distancia de transporte, condiciones de acumulación y composición en las cabeceras de los ríos. Margen oriental de Colombia. Zona central.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar características composicionales en las arenas fluviales que permitan identificar el tipo de roca fuente.
- Analizar el efecto del transporte en las arenas fluviales a partir de información de granulometría, morfología de granos y análisis composicional.
- Determinar la influencia del clima en la cuenca de drenaje del Río Meta utilizando los análisis composicionales de arenas y de algunas muestras de arcilla.

2. GENERALIDADES

2.1 UBICACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

El Río Meta nace en territorio colombiano en la Cordillera Oriental de los Andes, en la confluencia de los ríos Humadea y Guayuriba donde recibe el nombre de Río Metica, posterior este último se une con el río Manacacías para formar el Río Meta, en el departamento que lleva su nombre (Figuras 1).

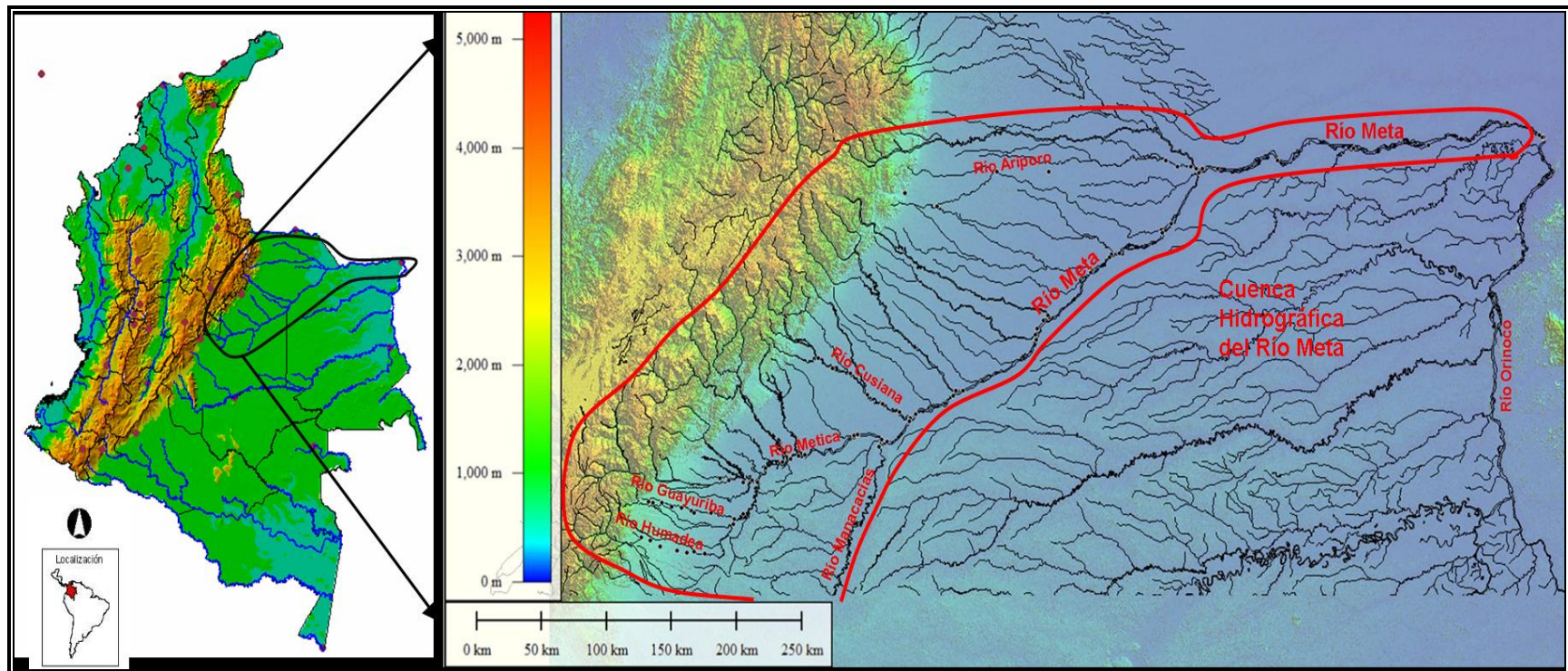
Discurre en dirección nordeste a través de la llanura de los Llanos Orientales de Colombia y hace parte de la cuenca del Río Orinoco. El Río Meta es el límite natural entre varios departamentos colombianos: primero entre los departamentos del Meta y Casanare, este tramo recibe Los Ríos Upía, Manacacías, Cusiana y el río Cravo Sur; luego entre los departamentos de Casanare y Vichada, un tramo en el que recibe las aguas de los Ríos Pauto, Guachiría, Ariporo, Casanare y finaliza en la confluencia con el río Cravo Norte; y finalmente, entre los departamentos de Vichada y Arauca. Luego, durante unos 200 km, forma la frontera natural colombo-venezolana, en dirección E-W hasta la desembocadura en Puerto Carreño.

La Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM) tiene una superficie de 93.800 km², en el tramo superior es muy amplia, se extiende unos 4° latitudinales (unos 350 km), mientras que el curso bajo, entre el río Cinaruco, en Venezuela, al norte, y el río Vita, en Colombia, al sur, sólo tiene unos 90 km (dirección E–W) (Figura 1).

El Río Meta divide los llanos de Colombia en dos regiones diferentes. La parte occidental de la izquierda es más húmeda y el río se desborda en la estación lluviosa y recibe los sedimentos de la cordillera Oriental. La parte oriental, de llano alto o altillanura, tiene una larga estación seca, el río no tiene un aporte importante de sedimentos procedentes de este sector.

Es el principal río de los Llanos Orientales colombianos, con un total de 1200 km de longitud y una navegabilidad de 900 km desde Puerto López hasta Puerto Carreño (IDEAM, 2008).

Figura 1. Ubicación regional de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM). La CHRM está delimitada en negro y rojo.



Fuente: Modificado de Rojas, 2004.

2.2 FISIOGRAFÍA Y CLIMA

2.2.1 Ecosistemas. La Orinoquía colombiana presenta seis ecosistemas, aquí solo haremos énfasis en los que influyen directamente dentro de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta, los cuales son el Piedemonte y la Orinoquia inundable (figura 2).

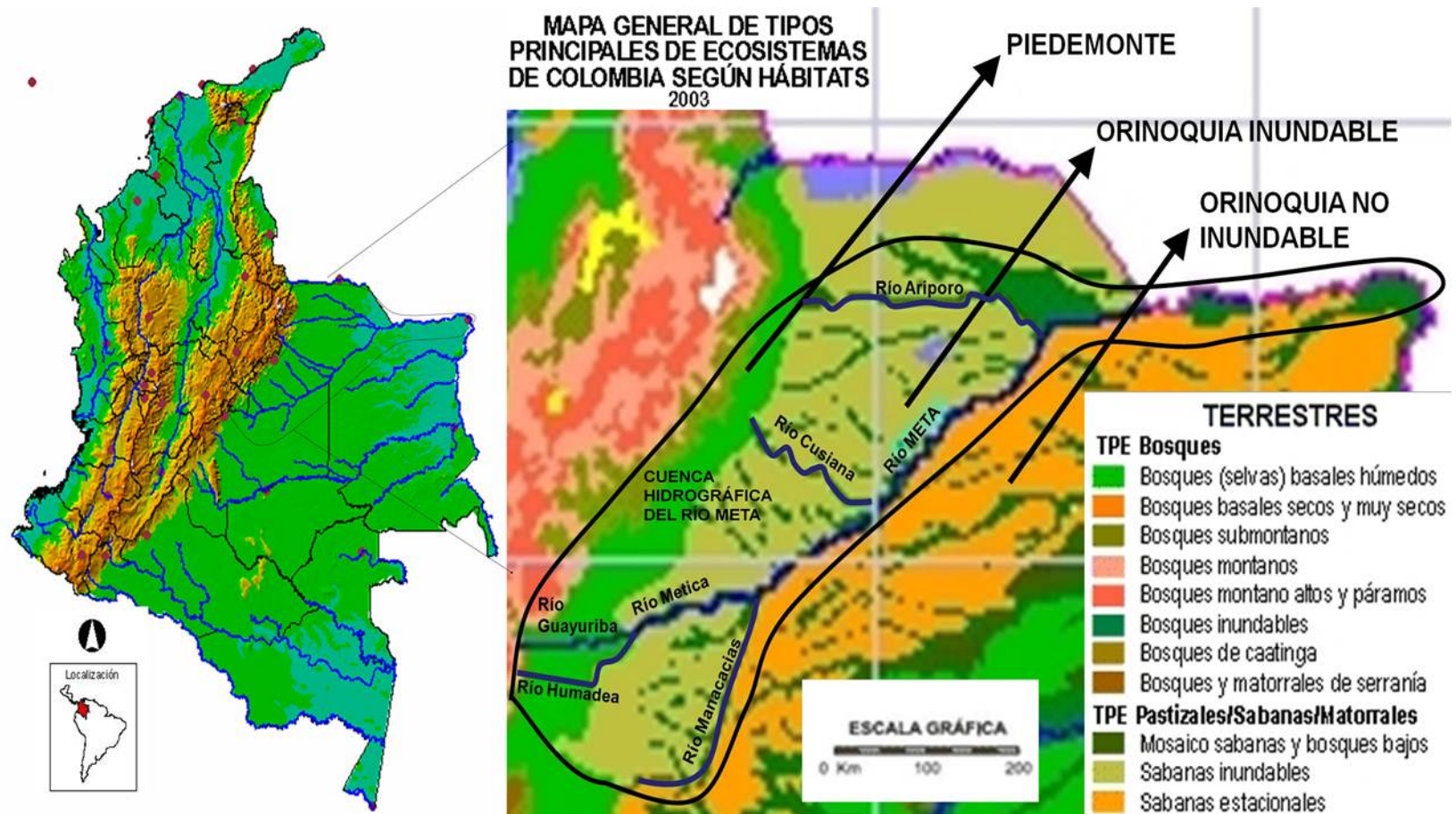
- El Piedemonte

Situado antes del encumbramiento de la Cordillera Oriental, es una faja de terreno pendiente cuya altura sobre el nivel del mar oscila entre los doscientos y los mil metros. Producto de depósitos recientes, el piedemonte acumula los mejores suelos por ser menos propenso a las inundaciones y están influidos por los vientos de la cordillera. Los sedimentos depositados en este sector reflejan con claridad la composición del área fuente, debido a que la erosión disminuye el periodo de residencia de los depósitos disminuyendo el efecto de los procesos meteóricos.

- Orinoquia Inundable

La Orinoquia inundable, al norte del río Meta, es la planicie con sedimentos fluviales recientes que corresponde a los departamentos de Arauca y Casanare. En esta parte los ríos se explayan en invierno y causan inundaciones cíclicas excepto en las partes altas conocidas como "bancos". En estos sectores el periodo de residencia de los depósitos es más prolongado que en el piedemonte, el río genera extensas playas de arena e islas las cuales son expuestas claramente en épocas de verano.

Figura 2. Mapa de ecosistemas en Colombia. La CHRM está delimitada en negro. Río H: Humadea; Río G: Guayuriba.

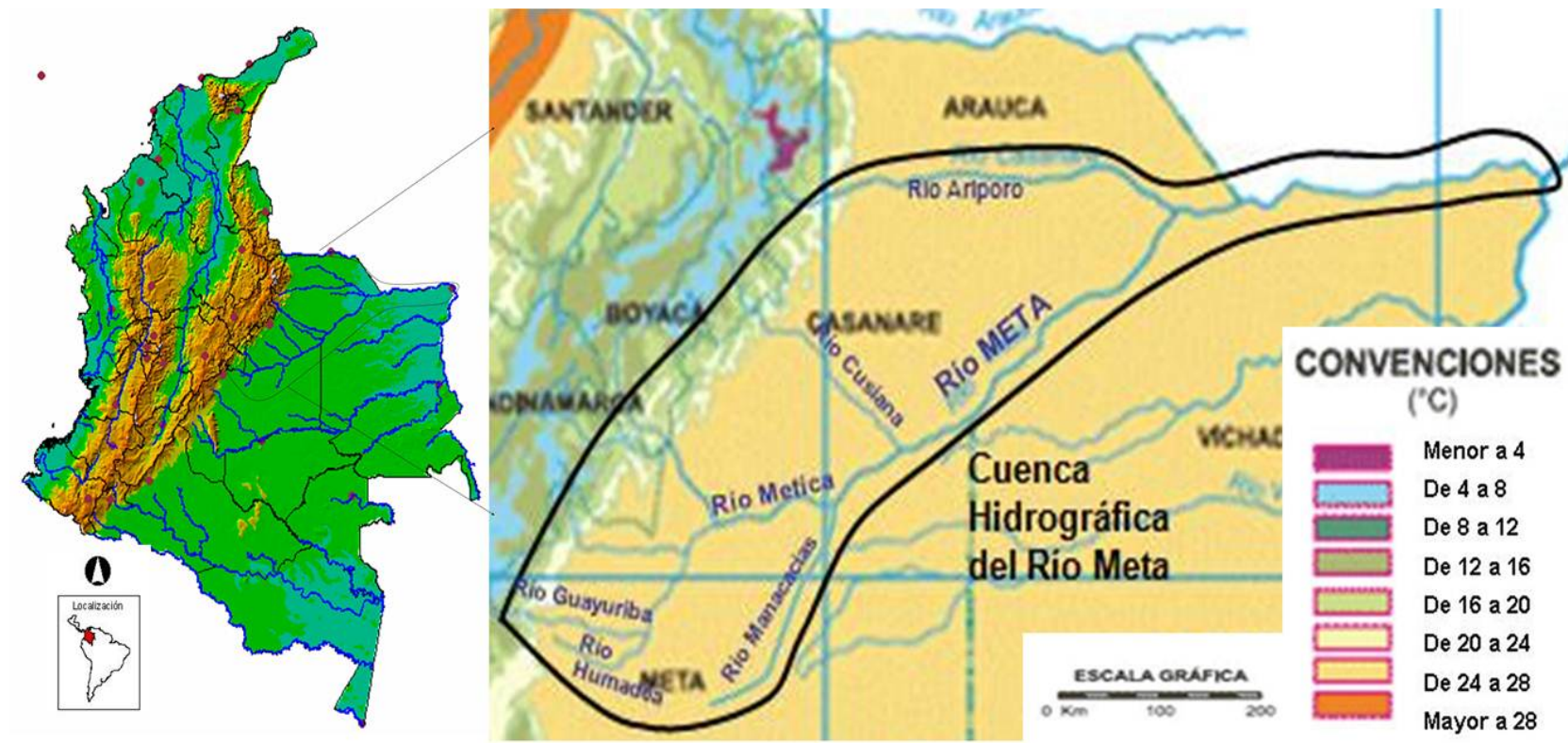


Fuente: Modificado de UNAL, 2003.

2.2.2 Clima y Vegetación. El clima en la Cuenca del Río Meta es variable y está sujeto a los cambios en la elevación. En los sectores altos de la cordillera es frío y muy frío, templado y cálido hacia el sector del piedemonte, y tropical hacia el sector de los Llanos, considerando que un clima tropical se caracteriza por ser no árido y con un régimen de lluvias que no superan los 2000 mm por año; pero la temperatura no es el único factor que determina el clima. Las precipitaciones y la humedad de la atmósfera también afectan los ecosistemas. El rango de las variaciones en la temperatura por sector es: en los sectores altos de la cordillera entre 8 °C - 20 °C, en el piedemonte entre los 22 °C - 33 °C y en los Llanos entre los 23 °C - 36 °C (IDEAM, 2008). Nótese que la temperatura no es un factor variable dentro del área de estudio ni en la cuenca de los Llanos. (Figura 3).

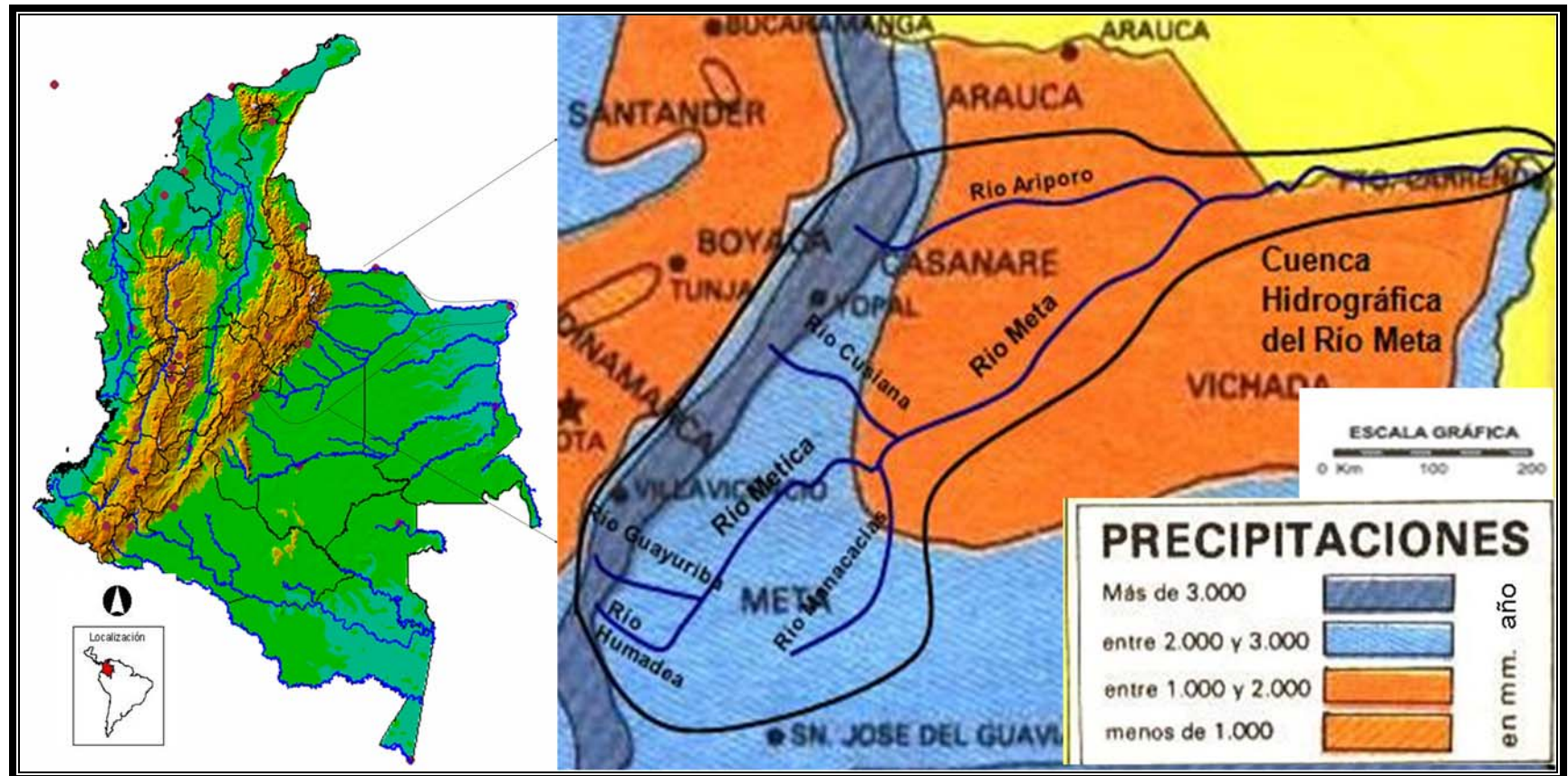
Debido a su posición intertropical, la cuenca no disfruta de estaciones. Tiene un período definido de lluvias que va de abril a noviembre, seguido de otro de sequía que abarca de diciembre a marzo. El régimen pluviométrico es monomodal: tiene un mayor registro durante la época de lluvias intensas y decrece hasta el mínimo en el período de mayor sequía. Sin embargo, la cantidad de lluvia que cae no es uniforme en todas las áreas de la región: mientras al norte de Arauca y Vichada la precipitación está por debajo de los 1.500 mm/año, en la faja del piedemonte, como el área de Villavicencio, caen al año más de 4.500 mm/año (IDEAM, 2008). En los Llanos hay una notable diferencia en la precipitación entre las planicies del sur y el norte (Figura 4), las cuales pasan desde 3000 mm/año en el sur hasta los 1000 mm/año en el norte. La cantidad de agua lluvia incide sobre el caudal de los ríos, la vegetación y la fauna. El clima de gran parte del norte de Sur América fue considerablemente seco durante la última máxima glaciación (Johnsson et al., 1991).

Figura 3. Mapa de zonas con diferencias de temperatura. La CHRM está delimitada en negro.



Fuente: Modificado de IDEAM, 2004.

Figura 4. Mapa de zonas con diferencias en el régimen de lluvias. La CHRM está delimitada en negro.



Fuente: Modificado de IDEAM, 2001.

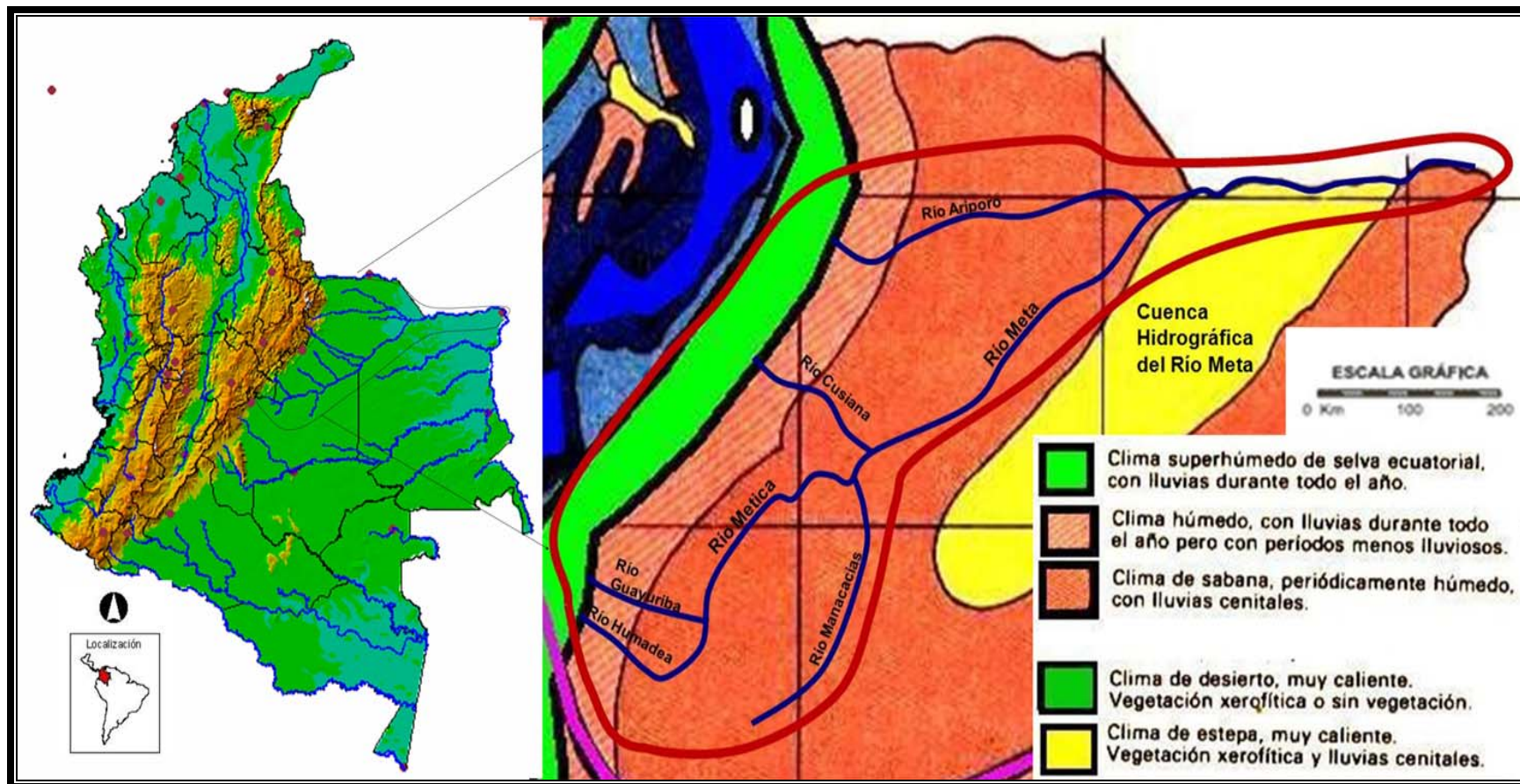
La vegetación en los sectores bajos de la cuenca es de sabanas; estas son formaciones vegetales donde predominan las gramíneas (Figura 5). En los Llanos Orientales aparecen algunas leñosas, como chaparro, alcornoque y drago. En los sectores altos predominan los bosques subandinos (1900 – 2700 mts) y andinos (3100 – 3700 mts), los cuales están constituidos por lauráceas, musgos, hepáticas, líquenes y helechos, orquídeas, bromeliáceas y ericáceas. También, Se encuentran helechos arborescentes, palmas, briófitas, líquenes, hongos y plantas vasculares pequeñas, además abundan las epífitas (IDEAM, 2008). Nótese que el tiempo de residencia parcial de los sedimentos en las planicies es afectado principalmente por factores climáticos.

2.2.3 Hidrografía. El curso definido del río Humadea al cual confluyen las aguas del Acacias y el Guayuriba para pasar a denominarse Metica. Navegable a partir de Puerto López, recibe por la margen izquierda las aguas del Humea y pasa a llamarse Meta (Figura 6). El curso alto del río se localiza entre los nacederos y el Humea. A partir de allí continua el curso medio que va hasta la desembocadura del Casanare y recibe, por la margen izquierda, los aportes del Cabuyaro, Upía, Túa, Cusiana, Cravo Sur, Guanapalo, Pauto, Guachiria, Ariporo y el renombrado Casanare. Por la banda opuesta apenas si concurren los ríos Manacacias y Yucao. Otra característica que tiene el Río Meta es su morfología, la cual es meandrica hasta donde es llamado río Metica y posterior a la confluencia del río Manacacias toma la forma de río trenzado, posterior a la confluencia del río Casanare de nuevo tiende a ser meandrico; aunque estas características son distintivas no hay evidencia de algún control estructural.

Con esto, se tendrá un control general en la composición de las arenas desde los afluentes hasta su llegada al Cauce Principal del Río Meta, aprovechando similitudes en las condiciones climáticas y en las composiciones de las áreas fuente; además, se podrá observar como varía la composición respecto a la distancia de transporte, utilizando los datos colectados en las muestras de los

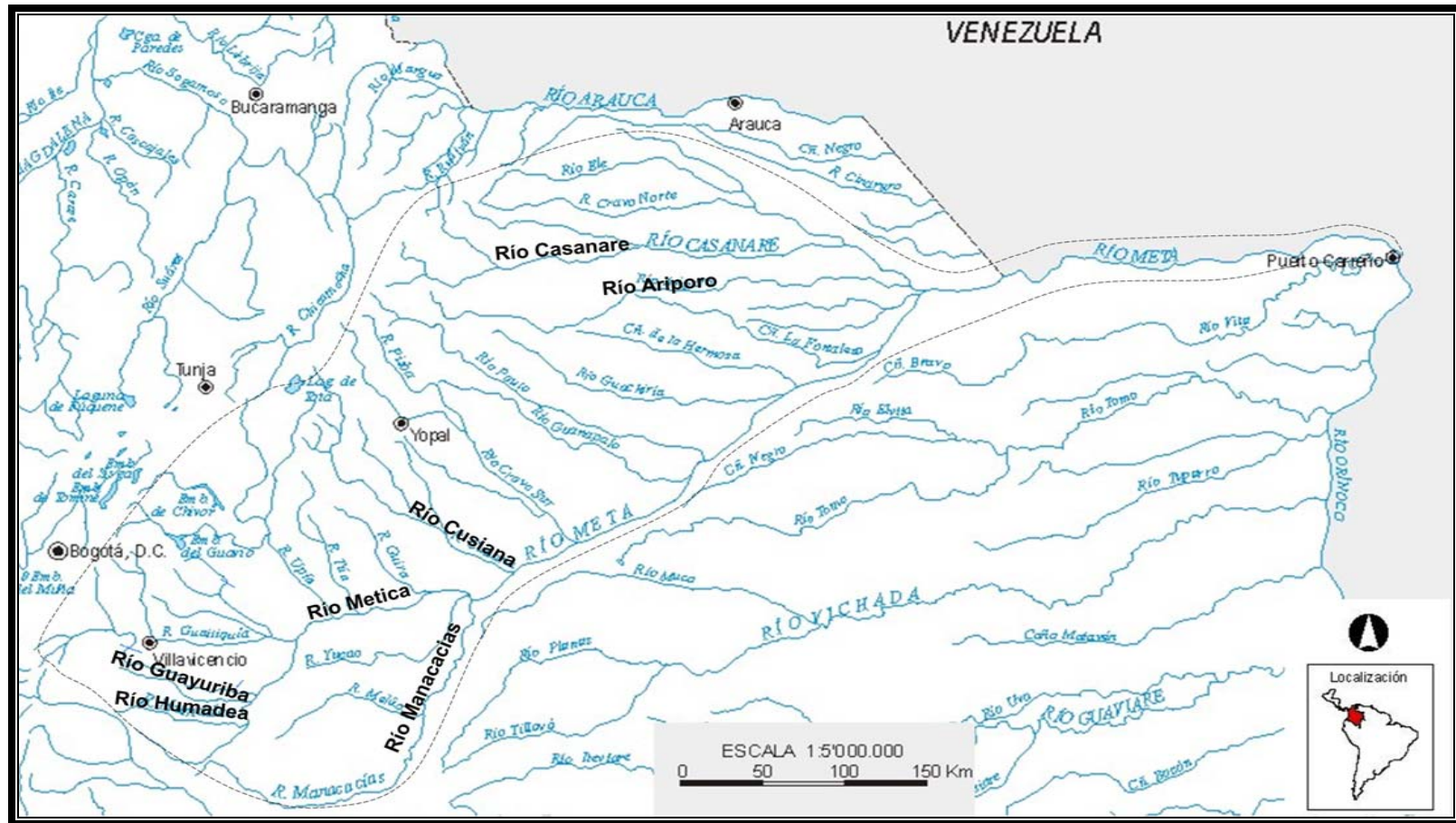
afluentes y en las muestras colectadas en el cauce principal del Río Meta, desde su nacimiento hasta su desembocadura en el Río Orinoco.

Figura 5. Mapa de zonas con diferencias de vegetación y clima. La CHRM está delimitada en negro.



Fuente: Modificado de IDEAM, 2001.

Figura 6. Mapa Hidrográfico del área de estudio. La CHRM está delimitada en negro.



Fuente: Modificado de IGAC, 2005.

3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

3.1 ESTRATIGRAFÍA

Las rocas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico del piedemonte llanero se agrupan en 16 unidades litoestratigráficas (Figura 7, Tabla 1). En la tabla 1 se presenta de base a techo una breve descripción de las unidades aflorantes, enfocada a establecer que tipo de materiales (fragmentos de roca, cristales, minerales, etc.) podrían estar siendo aportados a la cuenca.

En las cabeceras de los Ríos Humadea y el Guayuriba, en los afluentes más al sur del Río Metica (Figura 7) las rocas son del Paleozoico (Región A en figura 7), principalmente de edad Precámbrico – Silúrico, que corresponden al denominado Grupo Quetame. Rocas sedimentarias de edad Devónico Superior a Carbonífero Inferior, agrupadas como Grupo Farallones (Pulido y Gómez, 2001), cubren de manera discordante las rocas del Precámbrico – Silúrico.

La secuencia sedimentaria Mesozoica y Cenozoica aflora predominantemente en las cabeceras de los ríos Upía (al sur) a Aripuro (al norte) (Figura 7), y no hay rocas cristalinas expuestas en las cabeceras o sectores intra-montaña de los cauces (Región B en figura 7). La sucesión Mesozoica está conformada por 8 unidades litoestratigráficas y la sucesión Cenozoica por 6 (ver tabla 1) (Pulido y Gómez, 2001; López, 2004).

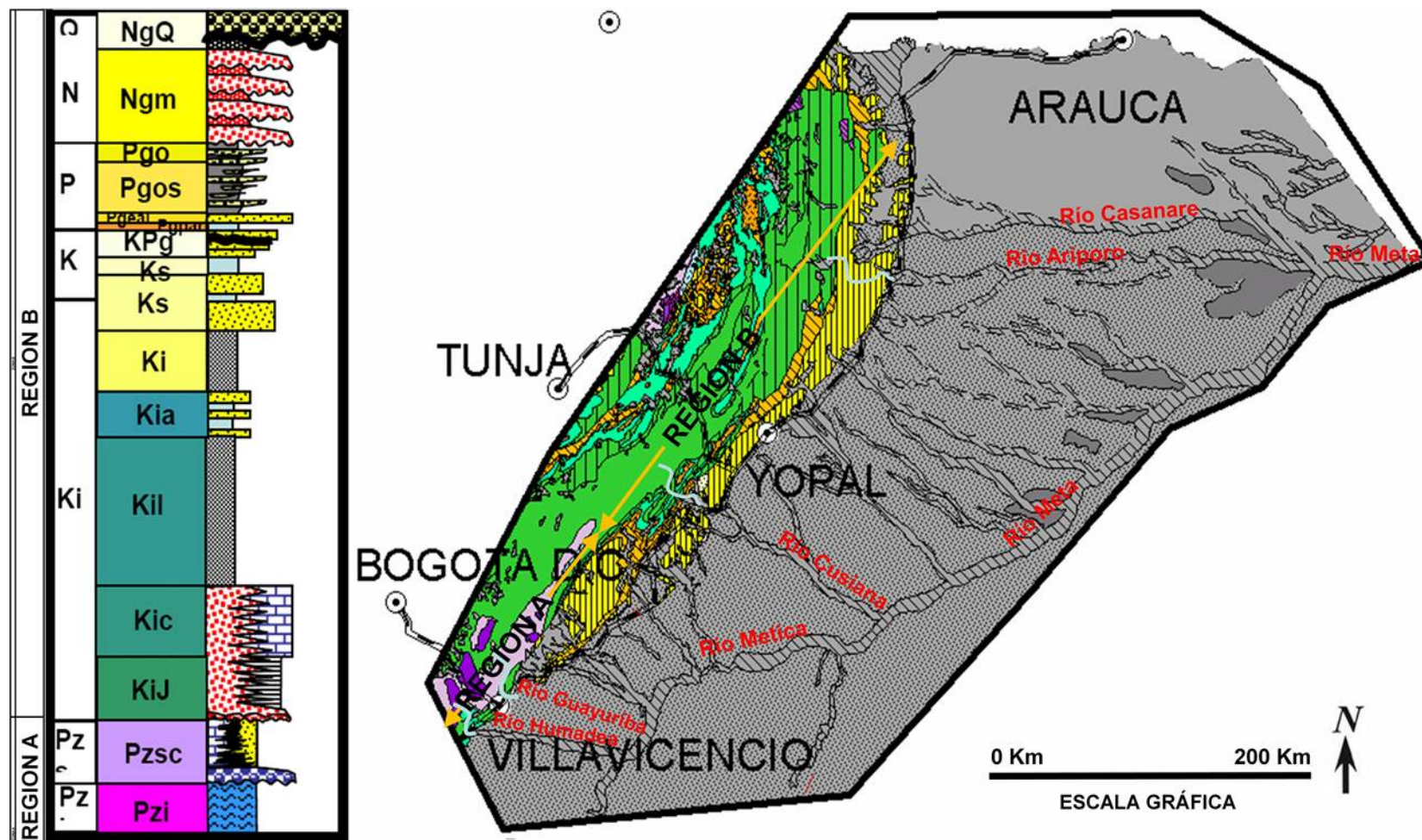
Es importante destacar que para las unidades aflorantes en el sector del piedemonte Llanero existen diversas nomenclaturas; por esto, se presente una tabla de correlación estratigráfica buscando unificar la temática (Tabla 2).

Tabla 1. Descripción de las formaciones aflorantes en la Cuenca Hidrográfica del Río Meta utilizando la nomenclatura propuesta por ECOPETROL para el Terciario en el sector del piedemonte de los Llanos Orientales.

EDAD	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
NEÓGENO	Fm. Necesidad	Gravas de cuarcita, arenita y lodolita en una matriz arenosa gruesa, interestratificadas con limolitas.
PALEOGENO	Fm. Guayabo	Areniscas y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas, En la parte inferior se presentan lentes de carbón de entre 20 y 50 cm.
	Fm. León	Lutitas y arcillolitas fisiles de color gris a grises verdoso, con intercalaciones de bancos de areniscas.
	Fm. Carbonera	Intercalación entre arcillas, lodolitas fisiles y limolitas verdes y el grises. En los niveles de arcillolitas existe abundante ferruginización.
	Fm. Mirador	Arenitas gruesas a medias de cuarzo, localmente de grano muy grueso a conglomerático, relativamente friables, y con delgadas intercalaciones de carbón, de apariencia lenticular.
	Fm. Cuervos	Arcillolitas de colores gris, verde. Es frecuente observar algunas intercalaciones de arenitas medias de cuarzo.
	Fm. Barco	Cuarzoarenitas ligeramente arcillosas color blanco a gris claro.
CRETÁCICO	G. Guadalupe	Areniscas cuarzosas, sublitoarenitas, limolitas e intercalaciones de chert.
	Fm. Chipaque	Gruesas secuencias de shales gris, muy ricos en materia orgánica y en menor proporción shales calcáreos, intercalados con arenitas . La distribución composicional de las arenitas es cuarzo en 85-100%, materia orgánica de 0-10% y matriz arcillosa de 0-10%.
	Fm. Une	Areniscas muy cuarzosas de grano grueso, con una presencia leve de materiales ortoquímicos cementantes y proporciones variadas de fragmentos aloquímicos.
	Fm. Fómeque	Shales a lodolitas grises, muy ricos en materia orgánica carbonosa y en menor proporción shales calcáreos y silíceos, calizas fosilíferas oscuras, arenitas y calizas lumaquéllicas. Las arenitas contienen cuarzo 90%, moscovita 0-5% y matriz arcillosa 5-10%.
	Fm. A. Juntas	Compuesta por paquetes de cuarzoarenita intercalada con shale gris oscuro y areniscas carbonosas; las areniscas se componen casi exclusivamente de cuarzo (98%) con algunas trazas de moscovita y materia orgánica (0-3%).
	Fm. L. Macanal	Lodolitas con esporádicas intercalaciones de arenitas, composición de cuarzo en 95%, mientras que la matriz arcillosa y la moscovita están en menor proporción.
	Fm. C. Guavio	Shales negros con lentes de yeso, calizas micríticas y fosilíferas.
	Fm. B. Buenavista	Fragmentos y bloques de filitas, cuarcitas, areniscas, calizas y cuarzo lechoso, englobados caóticamente en una matriz areno arcillosa.
	Fm. Bata	Conglomerados con cantos de arcillolitas, cuarcitas y cuarzoes en una matriz limolítica; limolitas silíceas, micáceas; arcillolitas, areniscas cuarzosas con intercalaciones de lutitas negras compactas con marcas de oleaje y niveles fosilíferos.
PALEOZOICO	Fm. Farallones	Principalmente son conglomerados, arcillolitas, calizas, lutitas, areniscas. Mineralógicamente se caracterizan por la presencia de cuarzo, filosilicatos, circón, turmalina, láminas de materia orgánica, pirita limonitizada ocasionalmente y esfena.
	G. Quetame	Cuarcitas, filitas, metaconglomerados y metaareniscas ligeramente feldespáticas y liticas, metalimolotas, algunos líticos son de cuarcita foliada, esquistos y filitas. Mineralógicamente se caracterizan por contener biotita, en algunos sectores cloritizada, moscovita, sercita, grafito, limonita, turmalina, cuarzo, epidota, circón, pirita, magnetita y algunas venas de cuarzo.

Fuente: Modificado de López, 2004 y Prada, 2004.

Figura 7. Mapa geológico generalizado de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta.



Fuente: Nomenclatura y mapa modificado de López, 2004.

Tabla 2. Propuesta de correlación estratigráfica generalizada para la Cuenca de los Llanos.

Grupo		Catatumbo	Cordillera Oriental (ECOPETROL)		Piedemonte Llanero			
					Sector Central	Sector Sur	Sector Norte	
V		Necesidad			Corneta	Grupo Medina	Farallones	
IV	B	Guayabo			Caja		Calzón	
					Diablo		Charte	
	A	León			San Fernando	Chopal		
		Carbonera				Humea	Arrayán	
		Mirador			Areniscas de El Limbo			
III	Cuervos	Arcillas de El Limbo						
	Barco	Arenisca del Morro						
II		Guaduas			Grupo Palmichal			
		Grupo Guadalupe						Arenisca Tierna Arenisca Labor Formación Plañeros Arenisca Dura
		Chipaque						
		Une						
		Fómeque						
		Grupo Cáqueza						
		Arcillas de Las Juntas	Areniscas Alto de Cáqueza					
		Lutitas de Macanal						
		Calizas del Guavio	Brechas de Buenavista		Ardita			
I		Batá						
		Farallones				Congl. Del Ele		
		Quetame				Güejar		

Fuente: Modificado de INGEOMINAS, 2004.

3.2 MARCO TECTÓNICO ACTUAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

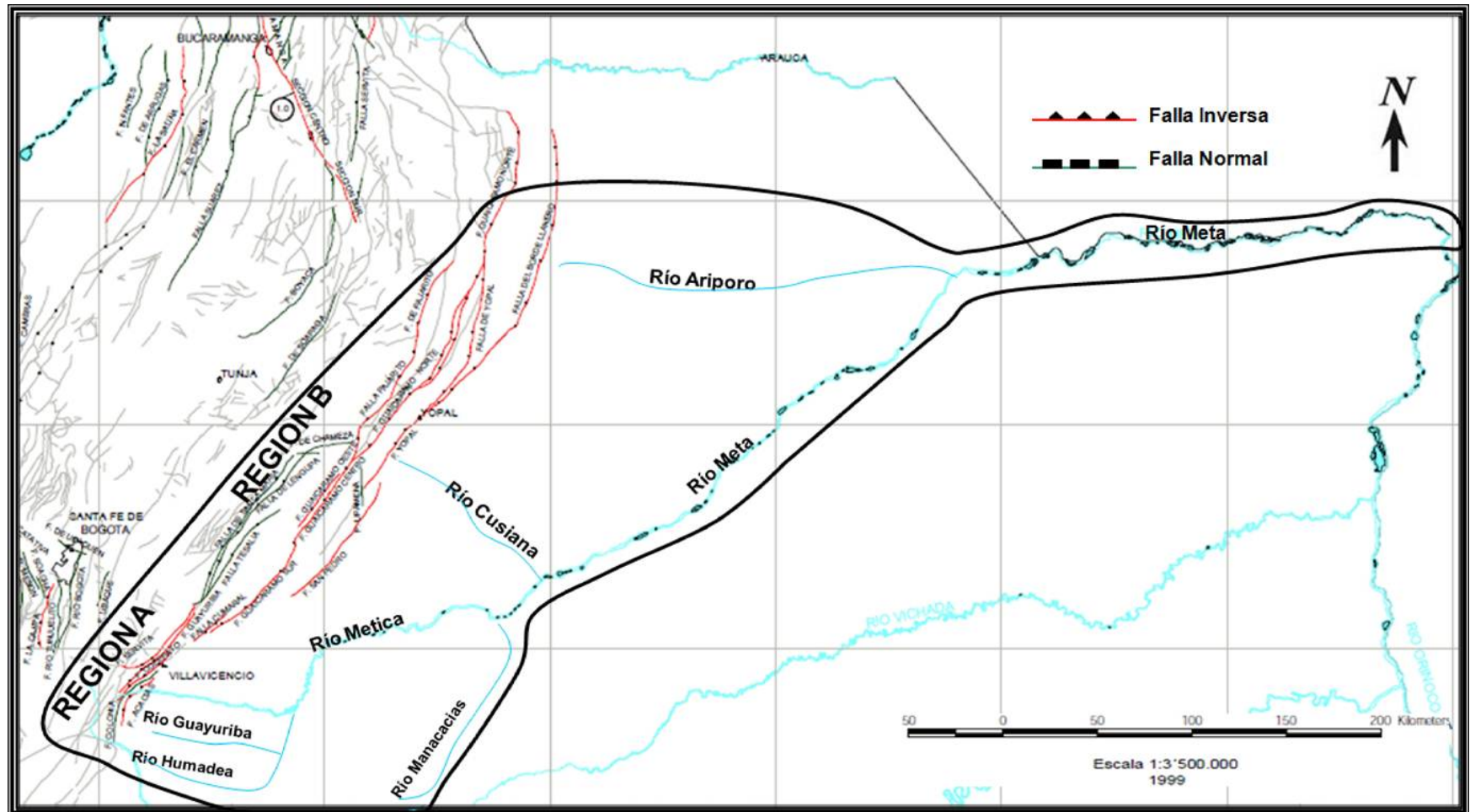
La actual Cuenca de los Llanos es una cuenca de "foreland" desarrollada al oeste del escudo de Guyana (cratón) (Figura 8). La Historia tectónica comienza con la formación del cratón (supercontinente precámbrico), el cual ha sufrido múltiples

fases tectónicas desde el Paleozoico y el Mesozoico previas a la deformación Terciaria Andina, la cual comenzó en el Cretáceo Tardío y culminó en el Mioplioceno (ECOPETROL - ICP, 2002).

El cinturón deformado avanza hacia el oriente gracias al desplazamiento de las unidades litológicas mediante fallas de bajo ángulo. Ejemplos de estas fallas son Guaicaramo, Yopos o borde llanero, fallas que pliegan las unidades que se encuentran en el bloque colgante; estas fallas están asociadas a zonas de alta deformación en la Cordillera Oriental; son fallas de alto ángulo (60° o más) con grandes desplazamientos en el rumbo; ejemplos de estas fallas son Mirador y Servitá, las cuales permiten colocar rocas del Paleozoico inferior sobre rocas del cretáceo inferior. El origen de estas deformaciones está asociado a la convergencia que tienen las diferentes placas tectónicas desde el Cretáceo Superior hasta el reciente en el norte de Sur América, que han ejercido esfuerzos tangenciales al escudo, generando importantes movimientos de rumbo (López, 2004).

Estudios realizados por varios autores a nivel regional coinciden en indicar que las direcciones de máxima compresión horizontal actual, oscilan entre E – W y NW – SE. (Meza & Parra, 1993). Además, los recientes trabajos realizados por Delgado (2010) y Jiménez (2010), en los departamentos de Casanare y Meta permiten observar que no hay ninguna relación entre el estilo estructural de la región y la orientación en superficie de los afluentes del Río Meta; pero si existe una ligera concordancia entre la orientación que toma el Río Meta después de la confluencia con el Río Manacacias y la orientación de las estructuras en ese sector, las cuales son SW – NE.

Figura 8. Mapa de fallas activas en el piedemonte llanero. La CHRM está delimitada en negro.



Fuente: Modificado de INGEOMINAS, 1999.

3.3 GEOMORFOLOGÍA

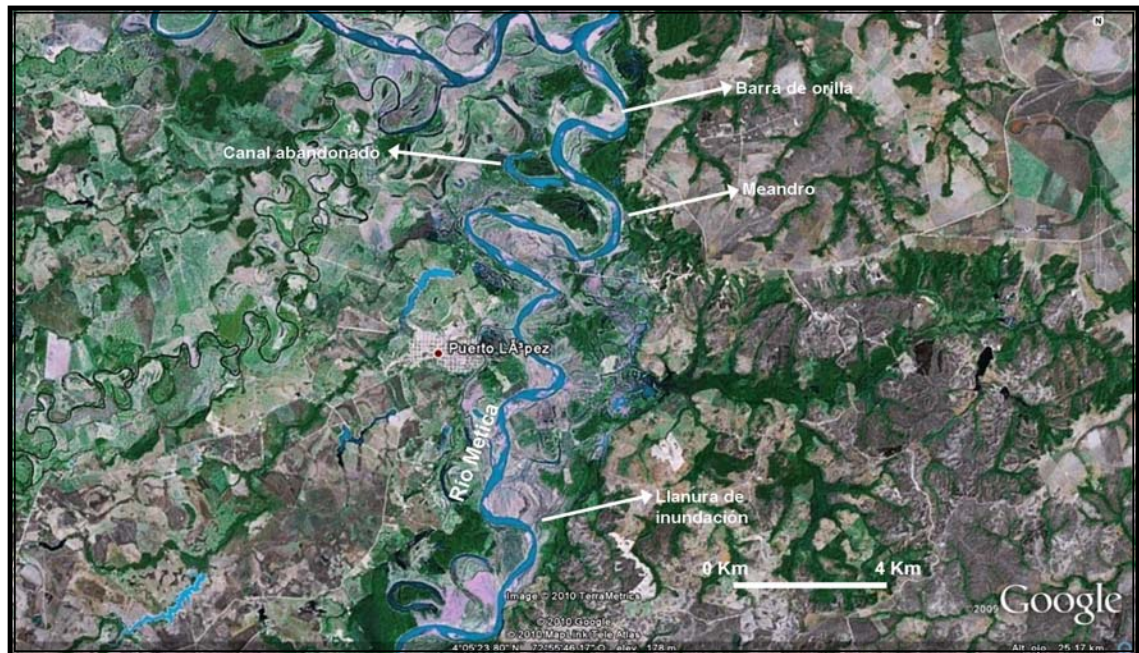
El Piedemonte Llanero en la cuenca del Río Meta, presenta expresiones geomorfológicas, directamente relacionadas a procesos tectónicos regionales. Una comparación entre grandes estructuras y morfologías, permiten definir según su origen tres grandes familias de geoformas: Estructural, fluvial afectado por neotectónica y fluvial (López, 2004). Los dos primeros grupos de geoformas hacen referencia al sector del piedemonte Llanero, y la última al sector de los Llanos por donde transita el Río Meta. Para el presente estudio se hará una breve descripción de las geoformas fluviales.

Dos componentes de geoformas fluviales son diferenciables en la cuenca del Río Meta: Llanuras de Inundación y Valles aluviales. Las Llanuras de inundación están limitadas a sectores donde los canales de los ríos y caños presentan un comportamiento meandriforme. En estos sectores se pueden diferenciar lóbulos por desborde de canal y llanuras de inundación. El proceso se desarrolla en zonas de muy baja pendiente donde los ríos tengan zonas adyacentes deprimidas que se inundaran al momento de romperse sus diques o albardones naturales. López (2004), define como Valle aluvial la zona por la que divaga el cauce de un río. Este componente está constituido por geoformas asociadas a la evolución de ríos meandriformes o trenzados. En algunos sectores solo es posible identificar el componente más no geoformas específicas.

Las geoformas asociadas a evolución de ríos meandriformes corresponden en general a todas las variaciones de ambientes que se desarrollan en ríos meandriformes. Dependiendo del grado de actividad y relleno se pueden diferenciar las siguientes geoformas: meandros y barras puntuales, las cuales son comunes en los ríos Cusiana, Ariporo y Metica (Figura 9). Las geoformas asociadas a evolución de ríos trenzados dependen del grado de cubrimiento que presente la barra, se lograron identificar: Barras longitudinales cubiertas de

vegetación, Barras longitudinales parcialmente cubiertas con vegetación y Barras longitudinales sin vegetación, estas geoformas son fáciles de apreciar en el cauce del río Meta (Figura 10). El grado de cubrimiento con vegetación indica el grado de actividad del canal con respecto a la barra, por lo que se convierte en indicativo de evolución morfológica de los ríos que las han formado.

Figura 9. Geoformas fluviales en cauce del Río Metica.



Fuente: Tomado de Google, 2009.

Figura 10. Geoformas fluviales en el cauce del Río Meta.



Fuente: Tomado de Google, 2009.

4. ANTECEDENTES

Son diversos los trabajos que se han realizado para entender cuáles son y cómo actúan los factores que controlan la sedimentación fluvial en ambientes modernos para diversos escenarios en diferentes lugares del mundo, esto contribuye a mejorar los modelos de procedencia que se realizan en areniscas antiguas; las referencias aquí citadas son las que más relevancia han tenido en el presente trabajo y las convenciones más utilizadas están en el anexo B:

Dickinson (1970), realiza un trabajo donde debate sobre la clasificación de grawacas y arcosas, agrupadas como areniscas subcuarzosas. El autor afirma que para esto se debe hacer especial identificación de los tipos de granos detríticos y al reconocimiento de texturas detríticas que es opuesto a elementos texturales de origen diagenético. Reservando los términos grawaca y arcosa para describir campos imprecisos y abandonar la proporción de matriz como un indicador inicial de la clasificación, las areniscas subcuarzosas pueden ser descritas adecuadamente usando seis parámetros numéricos de grano. Los tres iniciales son calculados al 100% lo cual permite designar un tipo de roca de la forma $Q_xF_yL_v$, donde Q hace referencia al total de los granos de cuarzo, F es el total de los granos de feldespato y L es el total de los granos de fragmentos líticos inestable en el armazón; tres parámetros secundarios de la forma de relaciones permite un refinamiento deseable dentro de cada parámetro inicial: C/Q , donde C es el total de granos de cuarzo policristalino; P/F , donde P es el total de granos de plagioclasa; y V/L , donde V es el total de granos líticos volcánicos. Los fragmentos líticos los subdivide en don niveles dentro de cuatro categorías principales en las cuales hay varias subcategorías como: a) fragmentos volcánicos; b) fragmentos clásticos; c) fragmentos de tectonitas; d) fragmentos microgranulares; e) epimatriz acompañada por alteración de granos del armazón; f) fragmentos líticos deformados y recrystalizados. La extensa albitización y alteración de otros

minerales complica la interpretación de modos detríticos en muchas rocas, pero potenciales errores se pueden evitar con una mayor atención a la mineralogía y a las texturas relictas, excepto donde las fabricas de tectonitas se trasponen al armazón detrítico original. Se encontró que muchas areniscas subcuarzosas fueron derivadas de una, o una mezcla, de tres tipos de procedencias: a) terrenos volcánicos produciendo rocas feldespatolíticas pobres en cuarzo; b) terrenos plutónicos produciendo fragmentos feldespáticos con pocos fragmentos líticos; y c) terrenos tectónicos sedimentarios y metasedimentarios produciendo granos de chert y líticos con pocos granos de cuarzo y feldespato, excepto donde los detritos volcánicos o plutónicos reciclados son abundantes.

Cameron y Blatt (1971), realiza un trabajo de muestreo en la cuenca Elk Creek en Dakota del Sur. Se recolectaron muestras de arena, cada una de 500 gramos, y a una distancia promedio entre cada muestra de 1 milla; 17 muestras de arena fueron analizadas en detalle, se tamizo para realizar la separación de cada fracción en intervalos de 1ϕ y se fabricaron secciones delgadas para ser inspeccionadas por conteo de puntos. En la fracción arena muy gruesa se contó un promedio de 220 granos, 300 granos para la fracción fina. La abundancia de los diferentes tipos de fragmentos fueron calculados al 100%, omitiendo los fragmentos de shale y minerales opacos. Los resultados indican que fragmentos finos de esquistos son mecánicamente muy inestables y muchos son destruidos con menos de 15 millas de transporte (8 millas aéreas) en corrientes de alto gradiente; un alto porcentaje de estos fragmentos no es transportado y son disgregados por los procesos formadores de suelos y durante el transporte de las primeras millas. Aunque muchas areniscas contienen un alto contenido de fragmentos de esquisto, este puede haber sido depositado a muy pocas millas de su área fuente. Los fragmentos volcánicos son relativamente resistentes durante el transporte fluvial y pueden ser transportados cientos de millas antes de sufrir disminución en su abundancia debido a la abrasión. Además atribuyen parte de la redondez de los fragmentos a la alteración química formadora de suelos. En las

regiones de bajo gradiente el tamaño más pequeño es arena muy gruesa, esta puede ser redondeada a partir de la abrasión mecánica.

Basu et al., (1975) realiza un trabajo con muestras de arena colectadas de corrientes fluviales que drenan un solo tipo de roca en el Grupo Indiana, estas muestras fueron tamizadas para separar la fracción media (1-2 ϕ) del material restante, con el cual se fabricaron secciones delgadas para realizarles un posterior análisis petrográfico. La undulosidad fue determinada para 900 granos en 21 muestras utilizando técnicas estereográficas estándar. Los resultados muestran que el cuarzo con extinción ondulatoria $<5^\circ$ corresponde a muestras de origen plutónico y las muestras que contiene cuarzo con extinción ondulatoria $>5^\circ$ corresponden a muestras con fuente metamórfica de bajo grado. La policristalinidad del cuarzo también es un indicador de procedencia, los resultados arrojaron que en rocas plutónicas el 13% del cuarzo total corresponde a cuarzo policristalino, en rocas metamórficas de alto grado el 29% y en rocas metamórficas de bajo grado el 53%. Más del 75% de los granos de cuarzo policristalino de fuentes plutónicas y metamórficas de alto grado contienen entre 2 y 3 cristales por grano.

Basu (1976), realizó un trabajo con muestras de arena de fuente plutónica de las Montañas Apalaches al este y las Montañas Rocosas al oeste de los Estados Unidos. El clima al este se caracteriza por ser húmedo y al oeste por ser árido. Las muestras fueron tomadas de altos topográficos de composición granítica, de corrientes fluviales en barras subacuadas y subáereas; además, se tomaron muestras de corrientes de primer orden en el piedemonte apalachiano evitando su contaminación con otros tipos de fragmentos de roca; las muestras fueron tamizadas y se separó la fracción lodo de la arena (el lodo no fue analizado); de la fracción arena se separó en las fracciones gruesa, media y fina. Se fabricaron 270 secciones delgadas, las cuales fueron analizadas usando el método de conteo de puntos de Chayes (1956). Se contaron 300 puntos por muestra. Un grupo de

muestras pertenece a la región de los Apalaches que se caracteriza por tener un régimen de precipitación entre 124 y 127 cm al año, comparado con las Montañas Rocosas (segundo set de muestras) que se caracteriza por un régimen de precipitación entre 31 a 43 cm al año. Los resultados obtenidos muestran que las diferencias climáticas en las áreas fuente producen diferente abundancia modal de granos y tienden a depender del tamaño en los constituyentes principales de las arenas. Además, la relativa distribución de los tipos de minerales de los constituyentes principales en arenas de primer ciclo esta probablemente determinado por la composición de las rocas fuente. También fue posible medir la madurez textural de estas arenas a partir de gráficos QFR.

Suttner et al., (1981), realizaron un muestreo en los Montes Apalachianos y en las Montañas Rocosas; tomaron 182 muestras de arena en corrientes de primer y segundo orden, que drenan áreas limitadas por un solo o muy limitado rango de rocas fuente de tipo cristalino como esquistos biotíticos y cloríticos. Para minimizar el efecto del transporte las muestras fueron tomadas dentro de los primeros 20 Km a partir de la cabeza de corriente. Los análisis modales fueron realizados en secciones delgadas de las fracciones de arena gruesa, media y fina. Se graficaron los resultados de la fracción arena media en diagramas ternarios QFR donde probablemente se resalta los cambios composicionales inducidos por el clima. En este trabajo encuentran que el clima es un factor inicial determinante de la composición de arenas de primer ciclo; además, las características climáticas pueden ser preservadas por más de 75 Km. de transporte en corrientes de relativo alto gradiente. Las cuarzoarenitas de primer ciclo probablemente no pueden ser producidas en áreas de moderado a alto relieve localizado en temperaturas o climas secos aún si la última depositación ocurre en ambientes de alta energía caracterizados por tasas moderadas de sedimentación. También, la producción de cuarzo arenitas de primer ciclo bajo una única combinación de condiciones extremas de clima, relieve y tasas de sedimentación son remotamente posibles. La cantidad de volumen total de cuarzo arenitas en el registro rocoso probablemente

tiene un origen multicíclico.

Ingersoll et al., (1984), realizan un trabajo modal con seis muestras de arena no consolidada tomadas de arroyos en Nuevo México, estas arenas tienen diferentes tipos de rocas fuente: metamórfico, plutónico, volcánicas basálticas a félsicas, y sedimentarias. Las muestras fueron secadas, disgregadas a mano para evitar romper cualquier grano, La fracción restante fue tamizada en intervalos de 1ϕ , estas fueron montadas y se fabricaron secciones delgadas con tinción para plagioclasa y feldespatos. En cada sección fueron contados 300 puntos usando el máximo grado de espaciamiento para cubrir toda la sección, esto produciría valores estadísticos confiables para todos los parámetros identificados. Este test busca realizar un trabajo comparativo entre el método de conteo Gazzi-Dickinson y el método tradicional. Los resultados muestran que el método Gazzi-Dickinson tiene distintas ventajas sobre el método tradicional al determinar la composición modal para las diferentes rocas fuentes propuestas. Tres ventajas iniciales son: 1) mayor uniformidad en los resultados para cualquier tamaño de grano, incluyendo muestras no sorteadas; 2) no es necesario el tamizado y conteo múltiple de diferentes fracciones; y 3) los conteos son completados más fácilmente y con menos ambigüedad, especialmente para areniscas alteradas diagenéticamente y con pobre sorteo.

Basu (1985), realiza un trabajo con muestras de arena del Grupo Indiana, el muestreo se trató de realizar donde los factores como la composición de la roca fuente, el relieve y el transporte permanecen invariables; así, se trabajó con muestras de fuentes seleccionadas separadamente de rocas ígneas plutónicas (Granitos) y metamórficas de alto grado (esquistos y gneis de alto grado de metamorfismo); las muestras fueron tamizadas para separar las fracciones de tamaños de arena gruesa, media y fina las cuales fueron analizadas petrográficamente. Los resultados mostraron que la composición de las muestras de las pendientes suaves y los regolitos son muy similares a los de las corrientes

de primer orden que drenan las mismas zonas donde el ángulo de la pendiente es menor al ángulo de reposo. Otro resultado importante obtenido es que la composición modal de las arenas colectadas en las corrientes fluviales de rocas fuente similar es controlada por el clima. Pero las altas pendientes que sobrepasan el ángulo de reposo pueden opacar el efecto del clima en la composición de arenas de primer ciclo; además, se puede inferir que el ángulo de pendiente (el cual controla la duración de los procesos pedogénicos, no el relieve) tiene mayor incidencia que los efectos del clima.

Dickinson (1985), realiza un trabajo con muestras procedentes de diferentes escenarios tectónicos. Entre otras cosas se observa que los modos detríticos de areniscas inicialmente reflejan los diferentes escenarios tectónicos de los terrenos procedentes, aunque otros factores sedimentológicos como el relieve, clima, los mecanismos de transporte, el ambiente depositacional y los cambios diagenéticos pueden también influenciar la composición de areniscas. Encuentra que los principales tipos de procedencia relacionada a fuentes continentales son cratones estables, basamento levantado, arcos magmáticos, y orógenos reciclados. Las arenas con procedencia compuesta pueden ser descritas como mezclas de arenas cuarzosas de cratones estables, de basamento levantado o arcos plutónicos, arenas feldespáticas de arcos volcánicos, y arenas cuarzolíticas de diferentes tipos como orógenos reciclados que producen proporciones variadas de granos de cuarzo y líticos. Las areniscas de cuencas “antepaís”, comúnmente involucran petrofacies cuarzofeldespáticas relacionadas con rift. Aunque estas petrofacies cuarzosas de márgenes continentales pasivas, a petrofacies cuarzolíticas se derivan de orógenos reciclados.

Suttner L. y Dutta P. (1986), en su trabajo sobre la composición de areniscas aluviales en las Formaciones Cutler y Fountain en Colorado, y el supergrupo Gondwana de la Península de la India; estas rocas son de tipo cristalino y el clima es muy variado en estas regiones, esta elección permite tener una similaridad o

permanecer constantes variables como la composición de la roca fuente, la distancia de transporte, el ambiente de depositación y la diagénesis. 124 muestras fueron colectadas de afloramientos, se elaboraron secciones delgadas con tinción para facilitar la identificación de feldespatos. Se contaron 300 granos por sección solamente en la fracción arena media, con el fin de minimizar el efecto del tamaño de grano en el control de la composición.

Los resultados de este trabajo mostraron que las areniscas de estas formaciones contienen detritos derivados de rocas fuentes cristalinas de tamaño grueso transportados relativamente cortas distancias antes de su depositación aluvial; además, el bajo enterramiento indica que no hay exposición a una actividad térmica que podría ocasionar una destrucción diagenética del armazón mineralógico; consecuentemente la variación composicional en el armazón, dentro y entre los depósitos puede ser relacionada inicialmente por variaciones en el clima y en los depósitos. La madurez composicional de las arenisca Godwana se asocia con el periodo seco entre el Pérmico a Triásico. En la Formación Cutler las areniscas son inmaduras (Q:F:R = 49:44:7) lo cual es consistente cerca a la fuente en abanicos aluviales en climas cálidos y muy secos; en contraste, las areniscas que están a menos de 200 m de la Formación Fountain son más maduras (Q:F:R = 65:26:9) que las areniscas a más de 600 m (Q:F:R = 54:36:10), esto refleja características del cambio gradual de clima húmedo al final del Misisipiano e inicios del Pensilvaniano en Colorado. La discriminación gráfica de arenas con diferencias climáticas, a partir de su armazón mineralógico es alcanzado con gráficos log/log de la relación entre el cuarzo total con feldespato total y fragmentos de roca, seguido de la relación entre cuarzo policristalino total con feldespato total y fragmentos de roca. También, en condiciones normales, el control climático en la composición de areniscas no es más importante que el control tectónico; sin embargo, diferencias sustanciales en la composición QFR de areniscas en la misma cuenca, particularmente como se representó en un diagrama ternario QFR, puede ser causado por cambio climático.

Grantham J. y Velbel M., (1988), en su trabajo sobre la influencia del clima y la topografía en la cantidad de fragmentos de roca en depósitos modernos de arenas fluviales en Carolina del Norte, toman muestras de arena de las corrientes en las microcuencas hidrográficas de la Cuenca Coweeta; para minimizar el efecto del transporte las muestras fueron tomadas de corrientes de primer y segundo orden de hasta 800 metros de longitud. Cada muestra fue secada y tamizada para separar las fracciones de arena gruesa (-1 a 1ϕ), media (1 a 2ϕ) y fina (2 a 4ϕ), posterior fueron fabricadas secciones delgadas con cada una de las fracciones; se contaron 300 puntos en cada una de las secciones. Los resultados mostraron una abundancia de fragmentos de roca en el sedimento tamaño arena derivado de un área fuente con precipitación variable al sur de los Apalaches pero no correlacionable con la extensión total de la meteorización química en el área fuente. Además, el total de la meteorización en la Cuenca Coweeta es una función de la duración e intensidad de la meteorización química en el área fuente, y la duración está relacionada con la topografía de la microcuenca hidrográfica; además, la intensidad está relacionada con el clima. La combinación del clima y la topografía producen variaciones sistemáticas de la abundancia de fragmentos de roca en sedimentos de la Cuenca Coweeta.

Johnsson M. y Meade R., (1990), realizan un trabajo sobre el efecto de la meteorización química en la sedimentación fluvial durante su almacenamiento aluvial en el Río Solimões, Brasil. Las muestras fueron tomadas de cada una de las secuencias aluviales; en total fueron tomadas 21 muestras; en laboratorio, cada muestra fue disgregada ultrasónicamente y pasada a través del tamiz de $63\text{-}\mu\text{m}$. La fracción $>63\text{-}\mu\text{m}$ fue secada y separada en fracciones de 1ϕ usando un tamizador mecánico. Para normalizar la dependencia composicional los análisis fueron restringidos a una sola fracción de tamaño. Como en la mayor parte de las arenas la fracción fina y muy fina fue abundante fue seleccionada esta fracción. Con estas muestras se fabricaron secciones delgadas las cuales se les aplicó tinsión para plagioclasa y feldespatos. El análisis modal fue realizado utilizando el

método de conteo de punto siego, y para cada muestra fueron contados 500 granos. La fracción <63- μm fue separada en intervalos de 2- μm por centrifugación de la suspensión limo – arcilla, estas muestras fueron analizadas por difracción de rayos X.

Los resultados encuentran una modificación de la composición del sedimento a través de la meteorización química dependiente de la intensidad total de la meteorización y del tiempo durante el cual ocurre la meteorización; además, el almacenamiento de sedimentos fluviales en secuencias aluviales provee un extenso periodo para que la meteorización afecte su composición. En ambientes en los cuales la intensidad total de la meteorización es alta, el resultado puede ser un marcado incremento en la madurez composicional con un incremento en la edad del sedimento. También, en la fracción arena muy fina, arenas inmaduras de composición arcósica a litoarenítica muestran una progresiva pérdida de fragmentos líticos, feldespatos, y minerales accesorios, con un concomitante enriquecimiento en cuarzo. En la fracción arcilla, un incremento en la abundancia relativa de esméctica con un incremento en la edad probablemente refleja la degradación de vidrio volcánico durante la meteorización de fragmentos líticos volcánicos en la fracción arena. La fracción arcilla de las muestras más viejas contienen menos esméctica, algo más de caolinita, y marcadamente más vermiculita comparado con muestras más jóvenes. Aunque, el incremento moderado de caolinita en muestras antiguas, la fracción arcilla es rica en cationes y relativamente menos lixiviada cuando es comparada con suelos en otros lugares de la cuenca del Amazonas; estas condiciones pueden reflejar una continua incorporación de arcillas ricas en cationes pobremente meteorizadas dentro de la fracción arcilla a través de la disgregación de alteritas, fragmentos líticos, y agregados de arcillas en fracciones de tamaño grueso. Por último, arenas intensamente meteorizadas almacenadas en planos de inundación pueden ser reincorporadas dentro del río durante la migración del canal, resultando en una dilución neta y reemplazamiento de arenas nuevamente erodadas por material

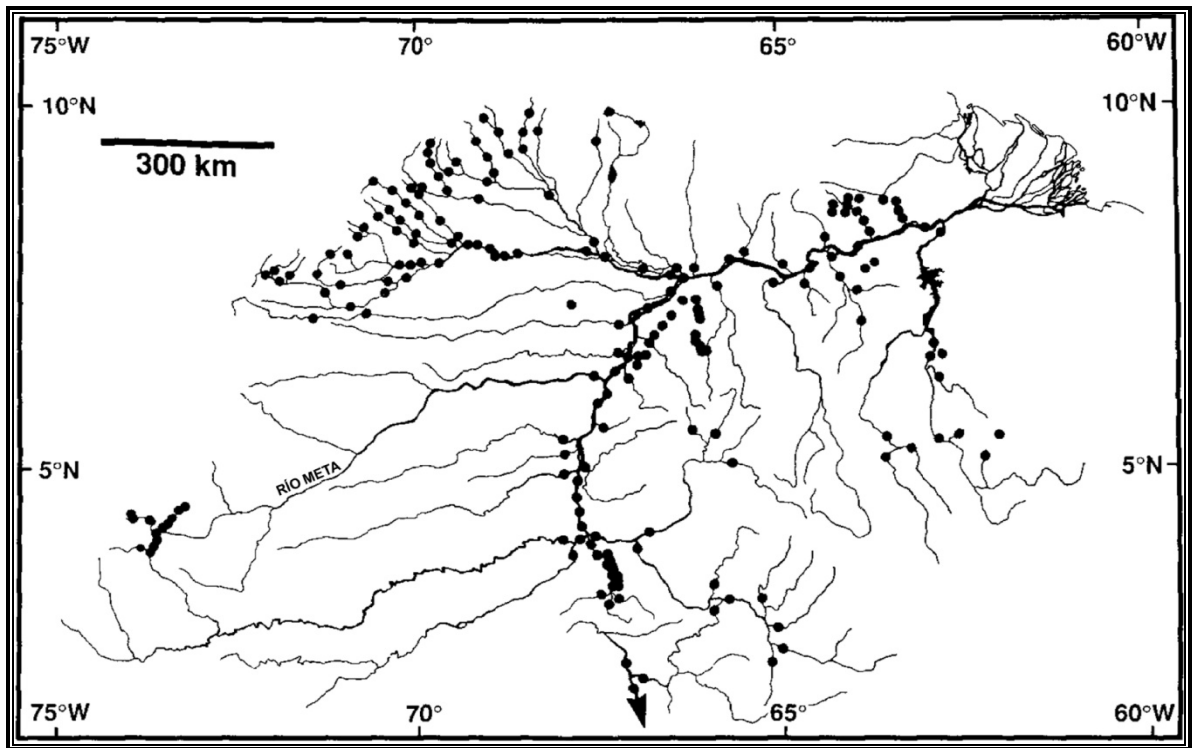
más viejo y composicionalmente más maduro.

Johnsson et al., (1991), realizó un trabajo en la cuenca hidrográfica del Río Orinoco, el cual se ha tomado como base para el presente trabajo de investigación en la cuenca hidrográfica del Río Meta, por tanto aremos marcado hincapié en algunos resultados obtenidos en su trabajo. El muestreo fue realizado tratando de cubrir una gran cantidad de área (figura 11), en secciones transversales a los canales fluviales; se tomaron 274 muestras de arena, las cuales fueron secadas y las diferentes fracciones de tamaño fueron separadas con un tamizador mecánico. La frecuencia de distribución fue calculada para incrementos de $1/2\phi$. Para normalizar la dependencia en la composición y en el tamaño de grano, se realizaron todos los análisis modales en una sola fracción de tamaño; donde, la fracción de tamaño medio ($1-2\phi$) fue elegida porque facilita la comparación de los resultados con datos obtenidos por otros trabajos. Con estas muestras se fabricaron secciones delgadas con tinción para plagioclasa y feldespato. La abundancia modal de los granos de armazón en las 237 muestras fue determinada por el método de punto ciego de conteo; para cada muestra se contaron 500 granos y se distinguieron 34 categorías de granos. La morfología de los granos se inspecciono utilizando el microscopio de escaneo electrónico; además, se determinó la composición de elementos mayores de la fracción media para 198 muestras. En este trabajo se divide la cuenca en cuatro provincias morfotectónicas: Terrenos Orogénicos constituidos por las Montañas del Caribe, Andes de Mérida y Cordillera Oriental; los Llanos donde se ubica la Cuenca Foreland Andina; y el Escudo de la Guayana.

En esta cuenca se reconocen tres principales grupos composicionales (figura 12): 1) arenas de composición subarcosa y arcosa, procedentes de las zonas altas del Escudo de la Guayana; 2) arenas de composición litoarenita y sublitoarenita procedentes del cinturón orogénico activo en las márgenes oeste y noroeste de la cuenca y parte de los Llanos próximos al cinturón montañoso; y 3) arenas de

composición cuarzoarenita esparcidas por las partes restantes de la cuenca. Arenas multicíclicas de composición cuarzoarenita son producidas en las plataformas cubiertas ubicadas en las zonas altas del escudo y de las zonas levantadas de la cuenca de los Llanos Orientales.

Figura 11. Ubicación de las muestras tomadas en la Cuenca Hidrográfica del Río Orinoco.

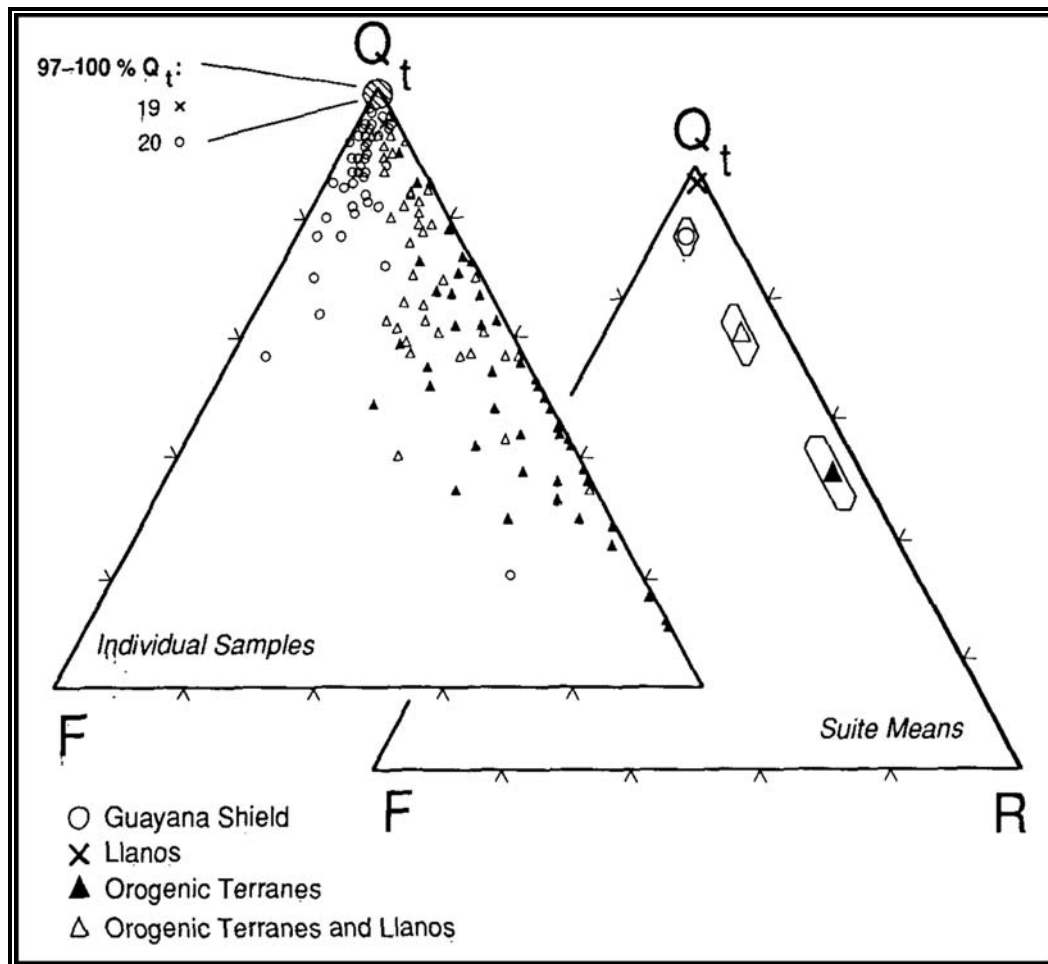


Fuente: Tomado de Johnsson et al., 1991.

La procedencia de los granos de cuarzo fue determinada utilizando el diagrama en forma de diamante de Basu y otros (1975) (figura 13), y se observa como las arenas de los llanos son muy pobres en cuarzo policristalino pero con más abundancia de cuarzo monocristalino.

Los terrenos plegados de la Cordillera Oriental en Colombia producen arenas inmaduras de composición litoarenita (figura 14), donde la fracción monominerálica es dominada por cuarzo y contiene abundantes fragmentos de roca sedimentaria en su fracción poliminerálica.

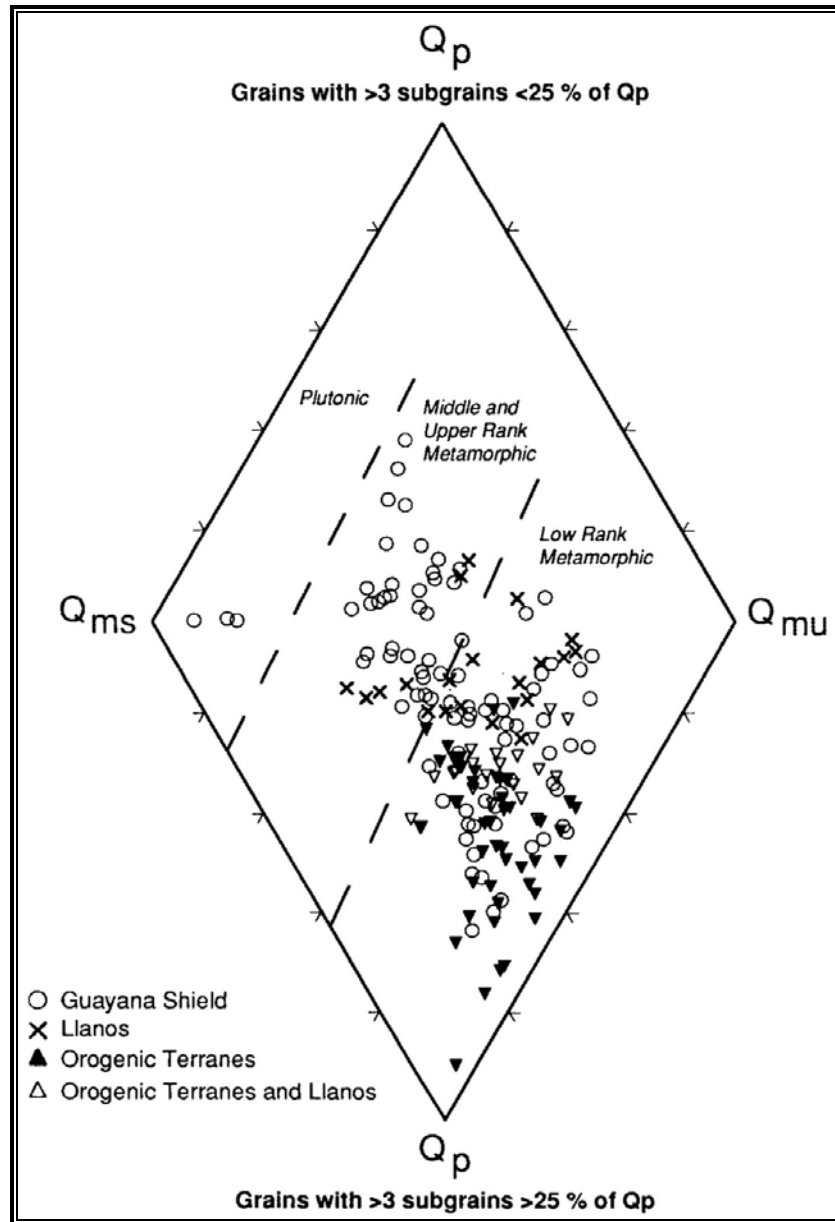
Figura 12. Diagrama de composición de las arenas de la cuenca hidrográfica del Río Orinoco. El diagrama de la izquierda corresponde a los valores individuales y el de la derecha a los valores medios.



Fuente: Tomado de Johnsson et al., 1991.

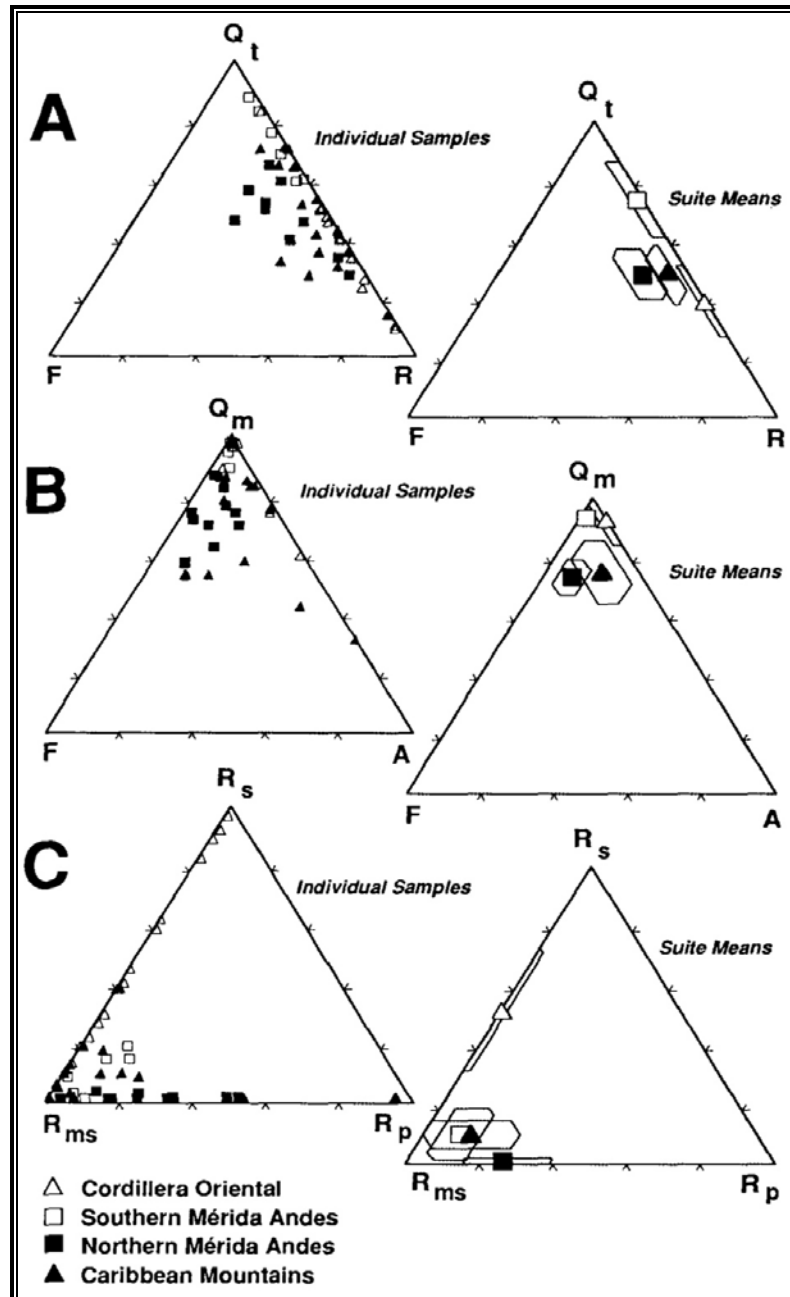
En el trabajo de Johnsson et al, (1991), se retoma el concepto de transporte y meteorización limitado por la erosión. Introducidos originalmente por Stallard y Edmond (1983) y Stallard (1985). Cuando los procesos de transporte remueven el material meteorizado en un área, más rápido que la generación de suelos, la erosión está limitada por la meteorización. En este caso se desarrollan suelos delgados, y la susceptibilidad a la meteorización química de los diferentes tipos de rocas tiene un importante control en la topografía. Por el contrario, cuando la tasa de generación de suelos excede la habilidad de los procesos de transporte para remover el material, la erosión está limitada por el transporte. En estas condiciones son desarrollados suelos espesos, y el tiempo de residencia de minerales en el suelo es prolongado; en este caso el desarrollo de la topografía depende del tipo de roca. En condiciones limitadas por el transporte, los productos físicos de la meteorización tienen un tiempo prolongado para reaccionar con el suelo y las aguas subterráneas. Estos suelos son extensivamente lixiviados y los productos de la meteorización son correspondientemente pobres en cationes. Estos conceptos permiten dilucidar el efecto de los diferentes factores que controlan la depositación y composición de arenas fluviales.

Figura 13. Diagrama donde se muestran las variedades de cuarzo en la cuenca hidrográfica del Río Orinoco.



Fuente: Tomado de Johnsson et al., 1991.

Figura 14. Composición de las arenas del Frente Andino. A: Composición total; B: Composición de componentes monominerálicos; C: Composición de componentes poliminerálicos (fragmentos de roca).



Fuente: Tomado de Johnsson et al, 1991.

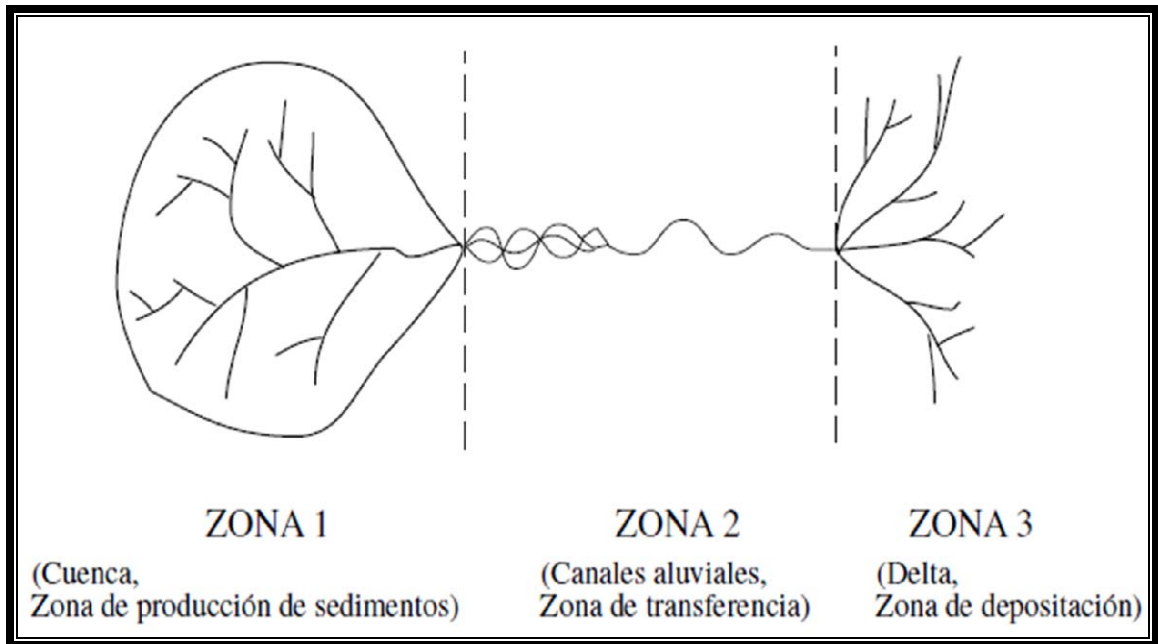
Johnsson et al., (1991), reconoce que dentro de los terrenos orogénicos, el rápido levantamiento tectónico y las pendientes elevadas permiten un régimen de meteorización limitando la erosión; los suelos son delgados, el tiempo de residencia en los suelos es corto, y las arenas son meteorizadas químicamente de forma incompleta e indican exactamente la composición de la roca fuente. Bajo estas condiciones, variaciones sustanciales en el ambiente tectónico y litología de la roca fuente puede ser discernida a partir de la composición de las arenas. La Cordillera Oriental produce arenas inmaduras de composición litoarenita con abundantes fragmentos de rocas sedimentarias. El almacenamiento extendido de sedimentos derivados del orógeno en los planos aluviales de los Llanos provee tiempo para que la meteorización química modifique sustancialmente la composición de las arenas; estas arenas son reincorporadas al lecho del río durante la migración del canal, resultando en una dilución neta y reemplazamiento de depósitos de arenas viejas por nuevas, composicionalmente más maduras. Este proceso es reflejado en la pérdida de material inestable (fragmentos de roca, feldespato) y un incremento en las relaciones de Q/L (Q: cuarzo, L: fragmentos de roca) y Q_m/Q_p (Q_m : cuarzo monocristalino, Q_p : cuarzo policristalino) con incremento en la distancia desde el frente andino. Los ríos que retrabajan los aluviones de los Llanos y no nacen en los terrenos orogénicos llevan arenas de composición cuarzo arenita. Cierta cantidad de Fe, es retenida en la fracción de tamaño grueso, donde este toma la forma de costras y fragmentos de lateritas; estos también pueden precipitar en forma de costra rodeando los granos o rellenando fracturas en los granos después de la mezcla de aguas de alto pH de los terrenos orogénicos con aguas más ácidas ricas en Fe procedentes del escudo. La heterogeneidad en la composición de las arenas es modesta luego de sobrepasar los 100 primeros kilómetros a lo largo del cauce principal del Río Orinoco.

En los trabajos realizados por Niño (2004), Johnsson (1991), Boggs, (1987) y Schumm (1977), se menciona que en las zonas donde la meteorización química

es intensa, los suelos son extensamente lixiviados generando productos residuales pobres en contenidos catiónicos como la caolinita. Esto se refleja en sectores con pobre densidad de vegetación. La baja intensidad de la meteorización química, permite que se conserven arcillas con alto potencial de intercambio catiónico como la illita. Esta presencia de illita facilita la obtención de nutrientes para las plantas, por ello, en este sector la vegetación es más densa.

En el trabajo de Niño (2004), el autor divide la red fluvial en 3 zonas principales idealizadas (figura 15). Las 3 zonas (Zona 1, Zona 2 y Zona 3) son definidas en dirección aguas abajo. La zona de más aguas arriba (Zona 1) corresponde a la cuenca hidrográfica o red de drenaje, y también al área de producción de sedimentos. Este es el área que aporta tanto el agua como los sedimentos al sistema aluvial. En esta zona los sedimentos son producidos y en la misma su almacenamiento es despreciable. La Zona 2 es la zona de transferencia, donde para un canal estable, la tasa de entrada de sedimentos iguala a la tasa de salida de ellos. La Zona 3 es la zona de depositación de los sedimentos. Estas tres subdivisiones del sistema aluvial pueden parecer arbitrarias, pues obviamente los sedimentos son almacenados, erosionados y transportados en todas las zonas en mayor o menor medida. Sin embargo, dentro de cada zona uno de dichos procesos es dominante y en el caso ideal, la Zona 1 es la zona de producción de sedimentos y la Zona 2 es la zona de transferencia o donde predomina el transporte de ellos. Eventualmente el sedimento es depositado en la Zona 3 sobre un abanico aluvial, una planicie aluvial, un delta, o en aguas profundas.

Figura 15. Diagrama de un sistema fluvial idealizado.



Fuente: Tomado de Niño (2004).

5. METODOLOGÍA

Con el objeto de deducir la relativa importancia de los diferentes procesos que controlan la composición de arenas en el registro geológico (e.g. Johnsson et al, 1991), se colectaron en total 75 muestras de arena y 10 de lodo (ver tabla 3). Las muestras de arena fueron tomadas en los sectores donde las barras están mejor expuestas y presentan una granulometría preferencialmente de arena media, tomando en cuenta que esta fracción representa la media composicional (Basu, 1985). Las muestras de lodo fueron colectadas en los sectores donde los ríos generan inundación en la Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM).

Cada afluente se seleccionó preliminarmente tomando en cuenta la accesibilidad y seguridad en el área, la composición de su área fuente, la geomorfología de su canal y depósitos, y la distancia desde el área fuente hasta su confluencia con el Río Meta.

La selección de los ríos Meta, Humadea, Guayuriba, Cusiana y Ariporo permite establecer los factores que controlan la composición de las arenas fluviales en algunos sectores de la CHRM, según las siguientes cinco variables:

a. Composición del área fuente: Las muestras colectadas en los ríos Humadea y Guayuriba proceden de rocas metamórficas, mientras las muestras de los ríos Cusiana y Ariporo de rocas sedimentarias. La composición de cada cuenca hidrográfica para los afluentes se determinó a partir de la información cartográfica y geológica publicada por el INGEOMINAS, junto con los trabajos realizados por López (2004) y Prada (2004).

b. Variación composicional de las arenas fluviales con respecto a su distancia de transporte: las muestras de arenas fluviales se tomaron desde zonas muy cercanas al área fuente y a lo largo del cauce principal de los ríos Humadea,

Guayuriba, Cusiana, Ariporo y Meta.

c. Clima: las muestras de los ríos Humadea y Guayuriba son de climas más húmedos, mientras las muestras de los ríos Cusiana y Ariporo son de climas más secos. Esta información fue recopilada a partir de las publicaciones realizadas por el IDEAM para esta región del país.

d. Geomorfología del cauce de los ríos. Los ríos Humadea y Guayuriba tienen un trazo geomorfológicamente recto, mientras los ríos Cusiana y Ariporo tienen un trazo geomorfológicamente meandrónico. El primer sector del Río Meta (ó Río Metica) es geomorfológicamente meandriforme. El segundo sector es geomorfológicamente trenzado, y el tercer sector inicia geomorfológicamente meandriforme pero es predominantemente trenzado.

e. Variación de los afluentes a lo largo del Río Meta: En este estudio el Río Meta fue dividido en tres sectores, con respecto al origen de los afluentes que llegan al cauce del Río Meta. El primer sector, identificado con el nombre de Río Metica, hace referencia al segmento del río antes de la confluencia con el Río Manacacias, y que recibe afluentes que nacen en sectores con área fuente metamórfica. El segundo sector, entre la confluencia con el Río Manacacias y antes de la confluencia con el Río Cusiana, recibe afluentes que nacen en la cobertura sedimentaria de la Cordillera Oriental. El tercer sector, entre la confluencia con el Río Cusiana y hasta la confluencia con el Río Orinoco, recibe varios afluentes que retribuyen aluviones de la cuenca de los Llanos.

La metodología desarrollada en esta investigación, la cual se describe en el anexo A, permite realizar una comparación con los resultados obtenidos por Johnsson et al., (1991) y con otros trabajos realizados en cuencas de antepaís en otros lugares del mundo. A continuación se describe las principales etapas durante la investigación.

5.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS EN CAMPO

Se recolectaron un total de 75 muestras de arena, cada una de 2 kilogramos aproximadamente, tomadas en los sectores de las barras de arena expuestas donde el tamaño de grano estuvo preferencialmente entre $1 - 2 \phi$ (figura 16), y 10 muestras de lodo, cada una de 250 gramos aproximadamente, tomadas en las planicies de inundación de los cuatro afluentes seleccionados y del cauce principal del Río Meta. Para cada muestra se tomo el dato de ubicación utilizando GPS y se midió el pH del agua utilizando papel tornasol con nivel de exactitud del 75%.

Figura 16. Fotografía que muestra la toma de muestras en campo.

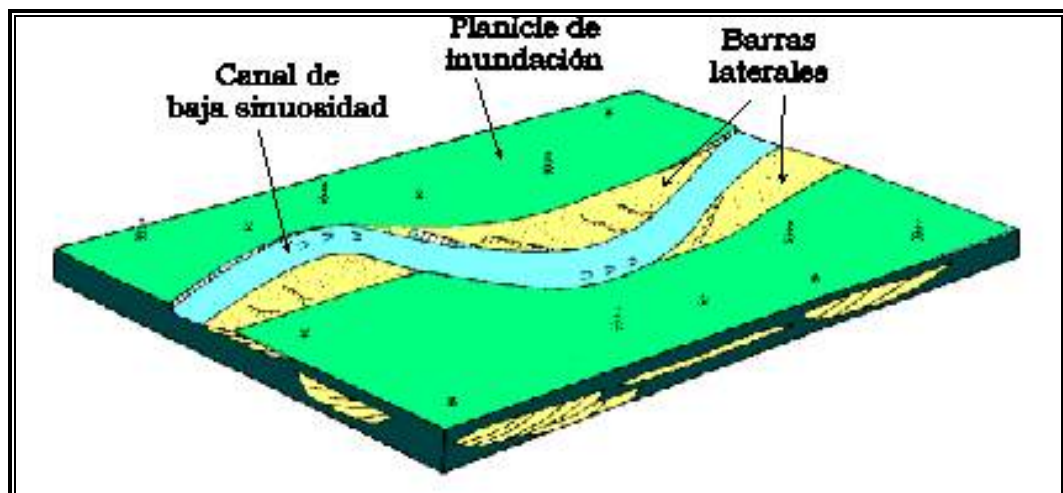


En los ríos Humadea y Guayuriba las muestras de arena fueron tomadas aproximadamente cada 14 kilómetros (medidos en línea recta) en barras laterales

expuestas. Las muestras de lodo se tomaron en las planicies de inundación (figura 17), una en el piedemonte y la otra en la confluencia con el Río Meta.

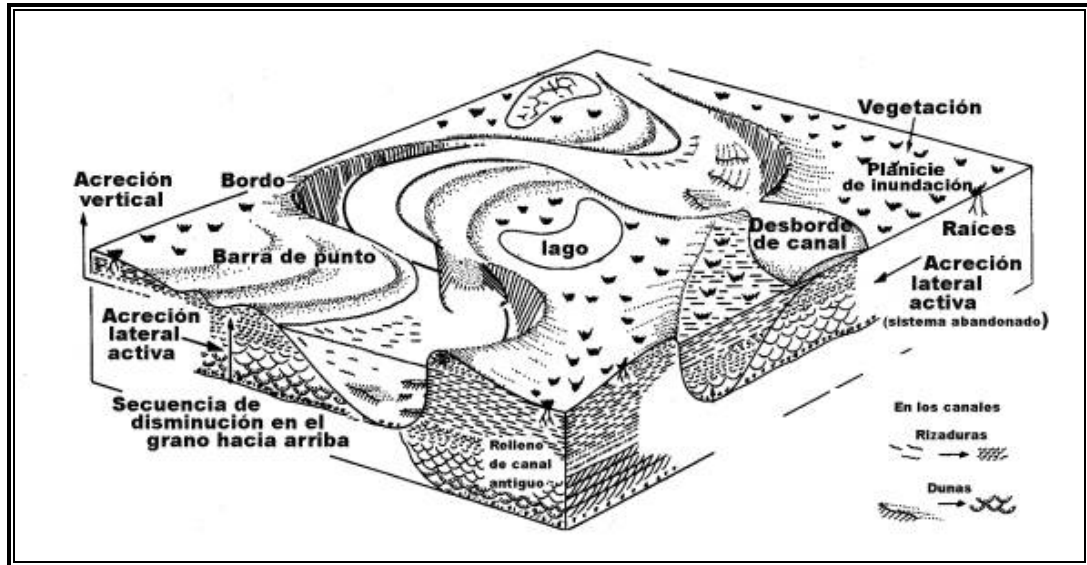
En los ríos Cusiana y Ariporo las muestras de arena fueron tomadas en barras puntuales expuestas, en el Río Cusiana se tomaron aproximadamente cada 20 kilómetros (medidos en línea recta), y en el Río Ariporo se tomaron aproximadamente cada 25 kilómetros en la zona húmeda y aproximadamente cada 40 kilómetros en la zona más seca (medidos en línea recta). Las muestras de lodo se tomaron en las planicies de inundación (figura 18), una en el piedemonte y la otra en la confluencia con el Río Meta.

Figura 17. Esquema que muestra la geomorfología de un río recto y los sectores de muestreo (barra lateral y planicie de inundación).



Fuente: Tomado de www.limarino.com.ar

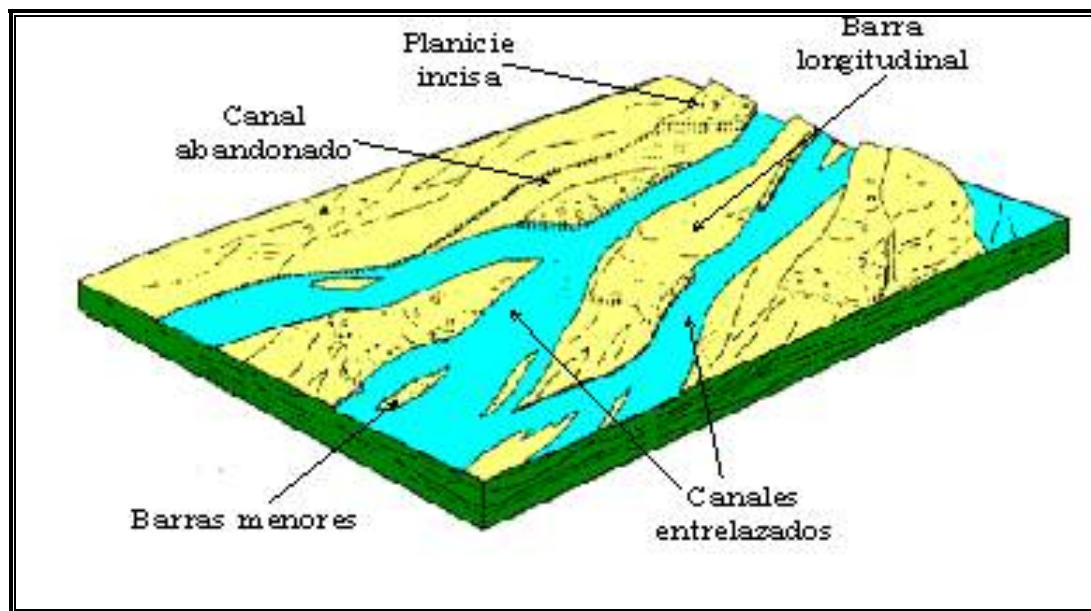
Figura 18. Esquema que muestra la geomorfología de un río meandriforme y el sector de muestreo (barra de punto y planicie de inundación).



Fuente: Tomado de Miall, 1987.

A lo largo del Río Meta las muestras de arena fueron tomadas aproximadamente cada 4 kilómetros (medidos en línea recta) antes y después de encontrar un afluente que naciera en la cordillera oriental. En el segmento meandriforme (antes de la confluencia con el Río Manacacias) las muestras de arena fueron colectadas de barras puntuales expuestas (figura 18), y en el segmento trenzado (después de la confluencia con el Río Manacacias) las muestras de arena fueron colectadas de barras longitudinales expuestas (figura 19). Las muestras tomadas, en el segmento que es frontera con Venezuela, más al oeste, se tomaron cada 70 km. En los dos segmentos iniciales, las muestras de lodo se tomaron en las planicies de inundación, después de la confluencia con los ríos Humadea, Guayuriba, Cusiana y Ariporo.

Figura 19. Esquema que muestra la geomorfología de un río trenzado y los sectores de muestreo.



Fuente: Tomado de www.limarino.com.ar

5.2 ANÁLISIS DE LABORATORIO

En la Tabla 3 se relacionan los análisis de laboratorio realizados en las muestras colectadas. El procedimiento de cada análisis se describe a continuación:

Tabla 3. Relación de muestras recolectadas Vs análisis realizados.

ANÁLISIS DE LABORATORIO	MUESTRAS COLECTADAS	MUESTRAS ANÁLIZADAS
Granulometría	75	75
Petrografía	75	44
SEM	75	21
DR-X	14	10

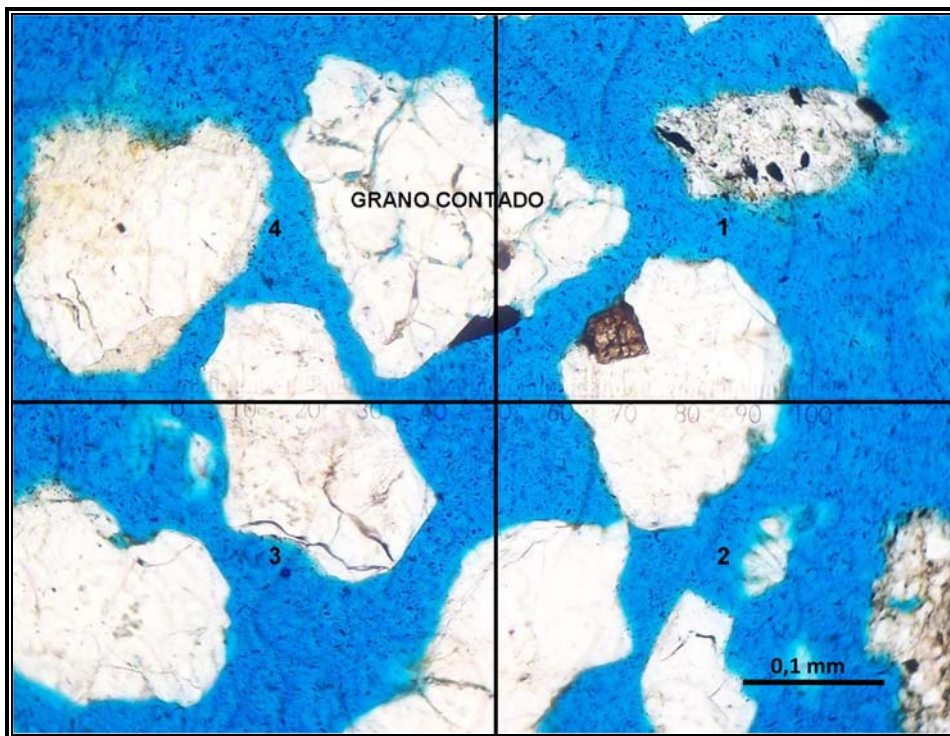
- Granulometría: Las 75 muestras de arena (anexo B) fueron secadas a 80 °C, se pesaron 1000 gramos de muestra y se realizó la separación de material en los tamaños de ((-1)-0 Φ) arena muy gruesa hasta (3-4 Φ) arena muy fina, utilizando un juego de mallas estandarizado y un tamizador mecánico propiedad de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. En la fracción arena media (1-2 Φ) se realizaron los cálculos estadísticos de media, varianza, skewness y kurtosis (primero a cuarto momento estadístico sobre la media).

Los resultados porcentuales para las tres principales fracciones de tamaño de arena (gruesa, media y fina) fueron recalculados al 100% y graficados en diagramas de barras para identificar la variación poblacional en cada muestra y entre cuencas, esta información fue integrada junto a diagramas esquemáticos que muestran la topografía en corte transversal de cada una de las cuencas estudiadas y del cauce principal del Río Meta.

- Petrografía: Para el análisis petrográfico se seleccionaron 44 muestras de arena tomando en cuenta el clima en las cuencas y la distancia entre las muestras en el cauce de cada río. Se elaboraron 44 secciones delgadas con la fracción arena media (1-2 Φ) (tabla 4). Los granos de arena son montados en portaobjetos de vidrio y aglutinados con epóxido para luego ser cortados y pulidos hasta ser llevados a un espesor de 30 μm aproximadamente. Las secciones delgadas fueron sometidas a tinción por feldespatos potásicos para facilitar su identificación durante la petrografía. Las láminas delgadas fueron preparadas por el Laboratorio de Preparación de Muestras del ICP. Para capturar la máxima cantidad de información textural y evitar hacer suposiciones concernientes a la forma de las partículas durante el transporte, se llegó a una clasificación utilizando los granos detríticos completos.

El método de conteo utilizado fue el tradicional y la clasificación de los granos se realizó tomando como base la nomenclatura utilizada en el trabajo de Johnsson et al. (1991). En total fueron contados 300 puntos por lámina, generando una malla de 20X15 milímetros. Para evitar contar puntos vacíos se tomó como referencia siempre el grano más cercano al retículo ubicado en el cuarto cuadrante (ó cuadrante NW en figura 20). El análisis de estas láminas se realizó utilizando los microscopios disponibles en el laboratorio de petrografía de la Universidad Industrial de Santander (Nikon Eclipse E200 POL).

Figura 20. Fotografía en nicoles paralelos que ilustra la elección de un grano contado fuera del retículo.



Los resultados modales obtenidos en la petrografía son recalculados siguiendo la metodología propuesta por Folk (1974). El recalcu para cada una de estas

categorías se hace normalizando al 100% en cada uno de los anteriores grupos y graficando estos resultados en diagramas ternarios donde en cada una de las esquinas se ubica cada categoría a evaluar (Folk, 1974).

Los resultados modales se presentan en tres diagramas ternarios:

- a. En el diagrama COMPOSICIONAL de cuarzo total, feldespatos y fragmentos de roca (QtFR), el chert es sumado al cuarzo total.
- b. El diagrama de cuarzo monocristalino, cuarzo policristalino (incluye chert) y fragmentos de roca (QmQpR) evalúa el grado de madurez composicional al medir la relación de los granos más estables química y físicamente (Qm) con respecto a granos de menor estabilidad química (e.g, R) y física (e.g, Qp + chert)
- c. La distribución de fragmentos de roca se presenta en el diagrama de fragmentos de rocas sedimentarias, fragmentos de rocas metamórficas y metasedimentarias, y fragmentos de rocas plutónicas (RsRmsRp).

Se elaboró una gráfica de tendencias con la relación entre cuarzo policristalino (Qp) y cuarzo total, fragmentos de roca foliada (incluyendo cuarzo policristalino foliado, Rmsf) y fragmentos de roca total (incluyendo cuarzo policristalino), y fragmentos de roca con glauconita (Rglc) y fragmentos de roca. Esto facilita observar el comportamiento del contenido de granos inestables (e.g. Qp, Rmsf y Rglc) a medida que las arenas se alejan del área fuente.

El diagrama de diamante de Basu (1985) se utiliza para identificar el origen de los cuarzoes. Los diagramas de variación de áreas permite identificar los cambios que suceden a medida que varía la distancia entre las muestras o la posible relación entre la composición de las arenas de diferentes cuencas.

Con los valores de QtFR en las 44 muestras analizadas, se elaboró un mapa donde se aprecia la composición de las muestras a medida que aumenta la distancia desde el frente montañoso (área fuente). Este mapa se construyó a partir del trazado de isolíneas que representan un valor de distancia horizontal en kilómetros entre línea y línea (20 kilómetros). En este mapa se trazaron líneas con diferente color para diferenciar la composición en cada sector. Cada línea de composición es trazada tomando en cuenta la composición definida a partir del diagrama ternario de Folk (1974) para cada muestra de arena; el color de cada línea inicia donde se encuentra la primera muestra con una composición definida y termina donde esta composición finaliza. De la misma forma se elaboró un mapa para marcar la presencia de glauconita; las líneas de diferente color marcan la presencia de este mineral o indican cuando este mineral se encuentra alterado o es ausente en las muestras.

- Microscopía de escaneo electrónico (SEM). La morfología de la superficie de algunos granos de cuarzo se analizó en el laboratorio de microscopía del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP). Un total de 21 muestras de arena entre 1-2 Φ fueron seleccionadas (tabla 5). De cada afluente se tomaron tres muestras, la colectada más cercana al área fuente, la tomada aproximadamente en la mitad del tramo entre el piedemonte y la confluencia con el Río Meta, y la más cercana a la confluencia con el Río Meta. En el primer segmento del Río Metica (antes de la confluencia con el Río Manacacias) se tomaron cada 35 km aproximadamente (medidos en línea recta), en el segundo segmento (después de la confluencia con el Río Manacacias) se tomaron cada 80 km aproximadamente (medidos en línea recta), y en el tercer segmento (después de la confluencia con el Río Casanare) se tomaron cada 150 km aproximadamente (medidos en línea recta).

Este estudio se realizó con el microscopio electrónico Leo 1450VP, equipado con

sistema de rayos X por energía dispersa OXFORD INCA alto vacío. Se trabajo sobre las muestras recubiertas con grafito. Se obtuvieron imágenes empleando el detector de electrones secundarios (SE) y el de electrones retrodispersos (BSE), los contrastes de intensidad que se observan en el modo SE dependen principalmente de la morfología de la muestra, su interpretación es similar a la del objeto visto por encima con iluminación lateral. En el modo BSE los contrastes dependen principalmente del número atómico promedio, zonas más claras en BSE corresponden a número atómico promedio elevado, en tanto que las oscuras pertenecen a números atómicos bajos.

Las imágenes obtenidas en el microscopio de escaneo electrónico son de granos de cuarzo porque estos tienen una mayor dureza física y estabilidad química, esto permite que estas partículas retengan marcas en su superficie producidas a lo largo de prolongados periodos geológicos (Boggs, 1987).

- Difracción de Rayos X (DR-X). Con éste análisis se identificó y cuantificó la composición de la fracción tamaño arcilla en 10 muestras de finos. En cada afluente estudiado se tomo una muestra, en el sector más cercano al área fuente. En el Río Meta se tomaron 6 muestras: dos cerca al nacimiento del Río Metica, una cerca a la confluencia con el Río Manacacias, una aproximadamente en la mitad del tramo del Río Meta delimitado por la confluencia con el Río Manacacias y la confluencia con el Río Casanare, otra cerca a la confluencia con el Río Casanare, y finalmente una cerca a la confluencia con el Río Orinoco. Las muestras fueron colectadas de las superficies de inundación en el cauce principal del Río Meta y en los cuatro afluentes con el propósito de tratar de identificar la intensidad de la meteorización (tabla 6).

Los resultados son presentados en dos gráficos. Primero se presenta en conjunto

los resultados para los cuatro afluentes y segundo se presentan en conjunto los resultados de las muestras tomadas en el cauce principal del Río Meta.

Para el análisis mineralógico, los difractogramas fueron obtenidos en un Difractómetro de Rayos-X marca Bruker modelo D4, equipado con lámpara de Cu y monocromador de grafito. Este análisis se realiza en el laboratorio de Difracción de Rayos X del ICP, bajo dos modalidades: Roca Total o bulk y Fracción arcilla: fracción de la muestra con partículas de diámetro efectivo menor a 2 μm . El análisis bulk describe de una manera global la mineralogía de la roca total, mientras que el análisis de la fracción menor de 2 micras caracteriza principalmente los filosilicatos que se concentran principalmente en partículas con éste tamaño. A continuación se detalla por separado la metodología utilizada para estos dos análisis.

Análisis Bulk

El análisis Bulk se llevó a cabo sobre la muestra representativa seleccionada mediante cuarteo y pulverizada manualmente en mortero de ágata, sin ningún tratamiento químico, y con montaje desorientado o de distribución de partículas al azar de acuerdo con el UST-153-P-010 del manual de procedimientos técnicos del laboratorio de DRX. Este análisis calcula la fracción en peso de cada componente con una incertidumbre de alrededor del 2% en fases bien cristalizadas que se encuentren en un porcentaje superior al 5%. Además, permite establecer los tratamientos que se requieren en la separación de la fracción menor de 2 μm , para la caracterización de los minerales de arcilla. La evaluación de los difractogramas se realizó con ayuda del Software Diffrac Plus, con base en los materiales de referencia de la JCPDF (Joint Committee Powder Diffraction Files) comercializados por el International Centre for Diffraction Data, ICDD .

La identificación de las fases cristalinas consiste en la comparación del

difractograma o perfil de difracción de la muestra con el difractograma de materiales de referencia o materiales puros reportados en las Bases de Datos cristalográficas, el difractograma de una sustancia pura es como su huella digital y permite la identificación inequívoca de la estructura cristalina que posee el compuesto. Este análisis se basa en el Método de Hanawalt, en el que cada compuesto se identifica por los tres picos de difracción más intensos. El cálculo de la concentración relativa de los compuestos identificados depende de diferentes fenómenos tales como el grado de cristalinidad de la muestra, la absorción y fluorescencia de rayos X que pueden tener los compuestos presentes y la probabilidad de dispersión coherente que tienen los distintos sistemas cristalinos. Éste análisis se hace con base en el área bajo la curva y empleando un set de constantes empíricas determinadas en nuestro laboratorio para los minerales más frecuentemente encontrados que dan cuenta de los fenómenos mencionados. Esta metodología calcula la fracción en peso de cada componente.

En el análisis de roca total, los filosilicatos presentes en las muestras se agrupan como arcillas o minerales arcillosos en tamaños menores de 2 micras; sin embargo, este tipo de minerales se pueden encontrar en tamaños mayores a 2 micras. Por lo tanto, el contenido de arcillas no define el contenido de finos presentes en la roca.

Análisis Fracción Menor de 2 Micras

La separación de la fracción menor de 2 micras o fracción arcilla se realizó por centrifugado (Norma ASTM C 775-79) que permite la separación por tamaños de partículas y se fundamenta en la Ley de Stokes. Inicialmente las muestras pasan por un proceso de disgregación y dispersión con ultrasonido, se eliminan cementantes y la materia orgánica lo cual permite obtener la arcilla más representativa del contenido total en la muestra. La metodología seguida consta

de la corrida de tres difractogramas para identificar los grupos principales de arcillas presentes:

N = Normal, la arcilla suspendida en agua se deja secar para permitir reforzar las reflexiones basales (00l) de las arcillas y obtener un espectro de DRX orientado.

C = Etilen Glicolada, moléculas orgánicas ocupan las posiciones interlaminares de las Esmeclitas o arcillas expandibles para aumentar las distancias basales.

F = Calentamiento de la muestra a 550° C, Destruye la estructura cristalina de las Caolinitas. Permite la diferenciación del grupo Caolinitas-Cloritas y algunos interestratificados.

Antes y después de cada tratamiento se realiza un análisis de la muestra y finalmente se superponen todos los difractogramas para definir la composición real, haciendo énfasis en los compuestos mayoritarios, es decir los que conforman alrededor del 95 % de la muestra arcillosa. La concentración relativa de los minerales presentes se calcula con la misma metodología utilizada para el análisis Bulk. En los difractogramas (anexos C, D, E, F y G) se presentan las cuatro corridas de rutina que corresponden a la muestra original o bulk (color negro), fracción menor de 2 micras o normal (color verde), fracción menor de 2 micras después del proceso de solvatación con etilenglicol (color azul) y fracción menor de 2 micras después del proceso de calcinación a 550°C (color rojo).

Las fases restantes de la investigación se muestran en el Anexo A.

Tabla 4. Relación de muestras a las que se les elaboró sección delgada. La muestra se identifica con la letra M y el número de muestreo.

MUESTRAS SECCIÓN DELGADA																					
MUESTRA	M4	M6	M8	M9	M11	M13	M15	M18	M19	M24	M27	M32	M35	M36	M38	M39	M40	M41	M46	M49	M50
FUENTE	RM	RM	RM	RM	RCR	RA	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RM	RC	RM	RMT	RM	RMT	RU	RMT
RMT: Río Metica RM: Río Meta RH: Río Humadea RG: Río Guayuriba RHM: Río Humea RU: Río Uplá RC: Río Cusiana RA: Río Ariporo RCR: Río Casanare																					

MUESTRAS SECCIÓN DELGADA																					
MUESTRA	M53	M54	M55	M58	M59	M62	M63	M65	M67	M68	M71	M73	M76	M77	M78	M80	M82	M83	M85	M87	M88
FUENTE	RHM	RMT	RMT	RMT	RH	RH	RH	RH	RMT	RG	RG	RG	RG	RG	RC	RC	RC	RC	RA	RA	RA
RMT: Río Metica RM: Río Meta RH: Río Humadea RG: Río Guayuriba RHM: Río Humea RU: Río Uplá RC: Río Cusiana RA: Río Ariporo RCR: Río Casanare																					

Tabla 5. Relación de muestras a las que se les realizó análisis SEM. La muestra se identifica con la letra M y el número de muestreo.

MUESTRAS ANÁLISIS SEM																					
MUESTRA	M4	M6	M9	M13	M19	M27	M35	M38	M47	M54	M58	M59	M63	M67	M68	M73	M77	M78	M82	M85	M88
FUENTE	RM	RM	RM	RA	RM	RM	RM	RC	RMT	RMT	RMT	RH	RH	RH	RG	RG	RG	RC	RC	RA	RA
RM: Río Meta RMT: Río Metica RH: Río Humadea RG: Río Guayuriba RC: Río Cusiana RA: Río Ariporo																					

Tabla 6. Relación de muestras a las que se les realizó análisis DR-X. La muestra se identifica con la letra M y el número de muestreo.

MUESTRAS ANÁLISIS DR-X										
MUESTRA	M3	M14	M28	M51	M56	M61	M66	M70	M79	M86
FUENTE	RM	RM	RM	RMT	RMT	RH	RH	RG	RC	RA
RM: Río Meta RMT: Río Metica RH: Río Humadea RG: Río Guayuriba RC: Río Cusiana RA: Río Ariporo										

6. RESULTADOS

6.1 CARACTERÍSTICAS COMPOSICIONALES DEL ÁREA FUENTE PARA LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META (CHRM)

Un análisis de la composición de las rocas del área fuente permite determinar el tipo de composición de las arenas que se podría esperar para cada una de las subcuencas de los cuatro afluentes estudiados (tabla 7). Uno de los parámetros que determina la composición de los depósitos sedimentarios en una cuenca de antepais es la composición de las rocas en el área fuente. Otro factor que influye de forma importante en la meteorización química es el régimen pluviométrico, el cual determina la cantidad de agua presente en las cuencas hidrográficas (Schumm, 1977; Boggs, 1987).

En la figura 21 se muestra la geología de superficie en la CHRM y se delimitan las cuencas hidrográficas para cada uno de los cuatro afluentes estudiados. Los porcentajes de la exposición de cada unidad sedimentaria en cada una de las cuencas son presentados en la Tabla 8.

Aunque los resultados por área obtenidos no son exactos debido a que no tienen en cuenta los diferentes valores de pendiente o el relieve montañoso (figura 21), estos resultados son una aceptable aproximación para determinar la influencia de la exposición de determinado cuerpo rocoso con respecto al suministro de sedimento y su composición en una cuenca hidrográfica.

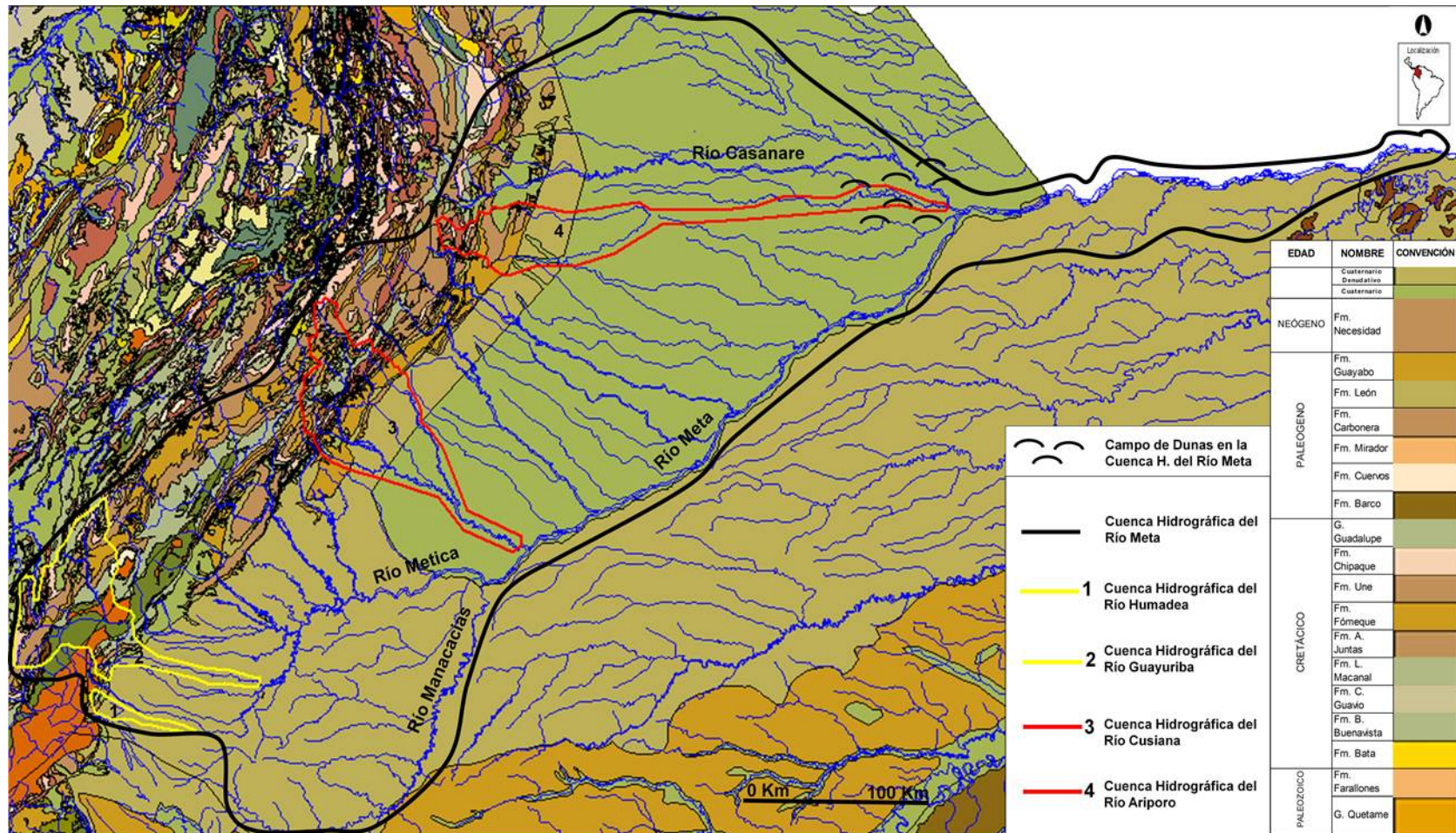
Tabla 7. Composición de las rocas en el área fuente para los cuatro afluentes estudiados y tipos de fragmentos de roca esperados en los sedimentos fluviales de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM).

EDAD	NOMBRE	LITOLOGÍA	PRINCIPALES INDICADORES SEDIMENTOLÓGICOS										
			Mf	Ms	Fal	Fls	Flf	Flgc	As	Qpc	Qpf	PH	F
NEÓGENO	Fm. Necesidad	NgQ											
PALEOGENO	Fm. Guayabo	Ngm			■ ◆		■ ◆	■ ◆	■ ◆				
	Fm. León	Pgo			▼ ■ ◆	▼ ■ ◆		▼ ■ ◆	▼ ■ ◆				
	Fm. Carbonera	Pgos			▲ ▼ ■ ◆	▲ ▼ ■ ◆							
	Fm. Mirador	Pgos						■					
	Fm. Cuervos	Pgos			◆	◆							
	Fm. Barco	Pgos											
CRETÁCICO	G. Guadalupe	KPg Ke Ks				▼ ■	▼ ■	▼ ■	▼ ■	▼ ■		■	▼ ■
	Fm. Chipaque	Ks KI				▼ ■ ◆			▼ ■ ◆			▼ ■ ◆	
	Fm. Une	KIa					▼ ■ ◆	▼ ■ ◆	▼ ■ ◆				▼ ■ ◆
	Fm. Fómeque	KII				▼ ■ ◆			▼ ■ ◆				
	Fm. A. Juntas	KII			▼ ◆	■ ◆			▼ ■ ◆				
	Fm. L. Macanal	Kic				▼ ■			▼ ■				
	Fm. C. Guavio	Kic											
	Fm. B. Buenavista	KIJ		▼					▼		▼		
	Fm. Bata	KIJ											
	PALEOZOICO	Fm. Farallones	Pzsc			▲ ▼	▲ ▼			▲ ▼		▲ ▼	
	G. Quetame	Pzi	▲ ▼	▲ ▼							▲ ▼		
▲ Cuenca Río Humadea ▼ Cuenca Río Guayuriba ■ Cuenca Río Cusiana ◆ Cuenca Río Ariporo													
Mf: Fragmentos metamórficos foliados de bajo grado; Ms: Fragmentos metasedimentarios; Fal: Fragmentos de arcillolitas limosas; Fls: Fragmentos de limolitas silíceas; Flf: Fragmentos de limolitas feldespáticas; Flgc: Fragmentos de limolitas con glauconita; As: Fragmentos de areniscas silíceas; Qpc: Chert; Qpf: Cuarzo policristalino foliado; PH: Fosfatos; F: Feldespatos													

Tabla 8. Valores porcentuales en el área fuente de cada una de las formaciones rocosas expuestas. Los valores están totalizados al 100%.

FORMACIONES EXPUESTAS EN LAS SUBCUENCAS (%)					
FORMACIONES		CUENCAS HIDROGRÁFICAS			
EDAD	NOMBRE Fm.	R. HUMADEA	R. GUAYURIBA	R. CUSIANA	R. ARIPORO
NEÓGENO	Cuaternario				
PALEOGENO	Fm. Guayabo	0,00	0,00	25,13	33,14
	Fm. León	0,00	0,50	3,94	35,62
	Fm. Carbonera	32,08	0,37	5,02	3,06
	Fm. Mirador	0,00	0,00	0,68	0,00
	Fm. Cuervos	0,00	0,00	0,00	2,56
	Fm. Barco	0,00	0,00	0,00	0,00
CRETÁCICO	G. Guadalupe	0,00	6,42	1,23	0,00
	Fm. Chipaque	0,00	10,57	7,08	5,06
	Fm. Une	0,00	21,07	18,57	5,14
	Fm. Fómeque	0,00	8,74	18,27	13,36
	Fm. A. Juntas	0,00	5,61	6,75	2,05
	Fm. L. Macanal	0,00	12,54	13,33	0,00
	Fm. C. Guavio	0,00	0,00	0,00	0,00
	Fm. B. Buenavista	0,00	1,79	0,00	0,00
	Fm. Bata	0,00	0,00	0,00	0,00
	Fm. Farallones	31,61	18,60	0,00	0,00
PALEOZOICO	G. Quetame	36,31	13,79	0,00	0,00
Área Total (Kms ²)		40,13	2543,35	1947,38	800,15

Figura 21. Mapa geológico detallado donde se ubican las cuatro subcuencas de los afluentes analizados y la CHRM.



6.2 RESULTADOS DE LA TOMA DE MUESTRAS EN CAMPO

En la tabla 9 se indica la cantidad de muestras tomadas en campo para cada uno de los afluentes y para el cauce principal del Río Meta. La toma de cada muestra está condicionada a la facilidad de navegabilidad y a las vías de acceso a los afluentes y al Río Meta.

Tabla 9. Relación de muestras colectadas para cada río dentro de la CHRM.

RÍO	MUESTRAS DE ARENA	MUESTRAS DE LODO
Humadea	8	2
Guayuriba	9	1
Cusiana	7	1
Ariporo	8	1
Meta	32	5
Segmento 1	9	
Segmento 2	15	
Segmento 3	8	
Humea	1	
Upía	1	
C. Guira	1	
Manacacias	1	
Cravo Sur	1	
C. Guanapalo	1	
Pauto	1	
Guachiria	1	
C. Hermosa	1	
C. Picapica	1	
Casanare	1	
Total	75	10

En la figura 22 se indica la ubicación para cada una de las 75 muestras de arena colectadas en total y en la figura 23 se indica la ubicación para cada una de las 10 muestras de lodo colectadas en la CHRM.

Figura 22. Ubicación de las 75 muestras de arena colectadas en la CHRM.

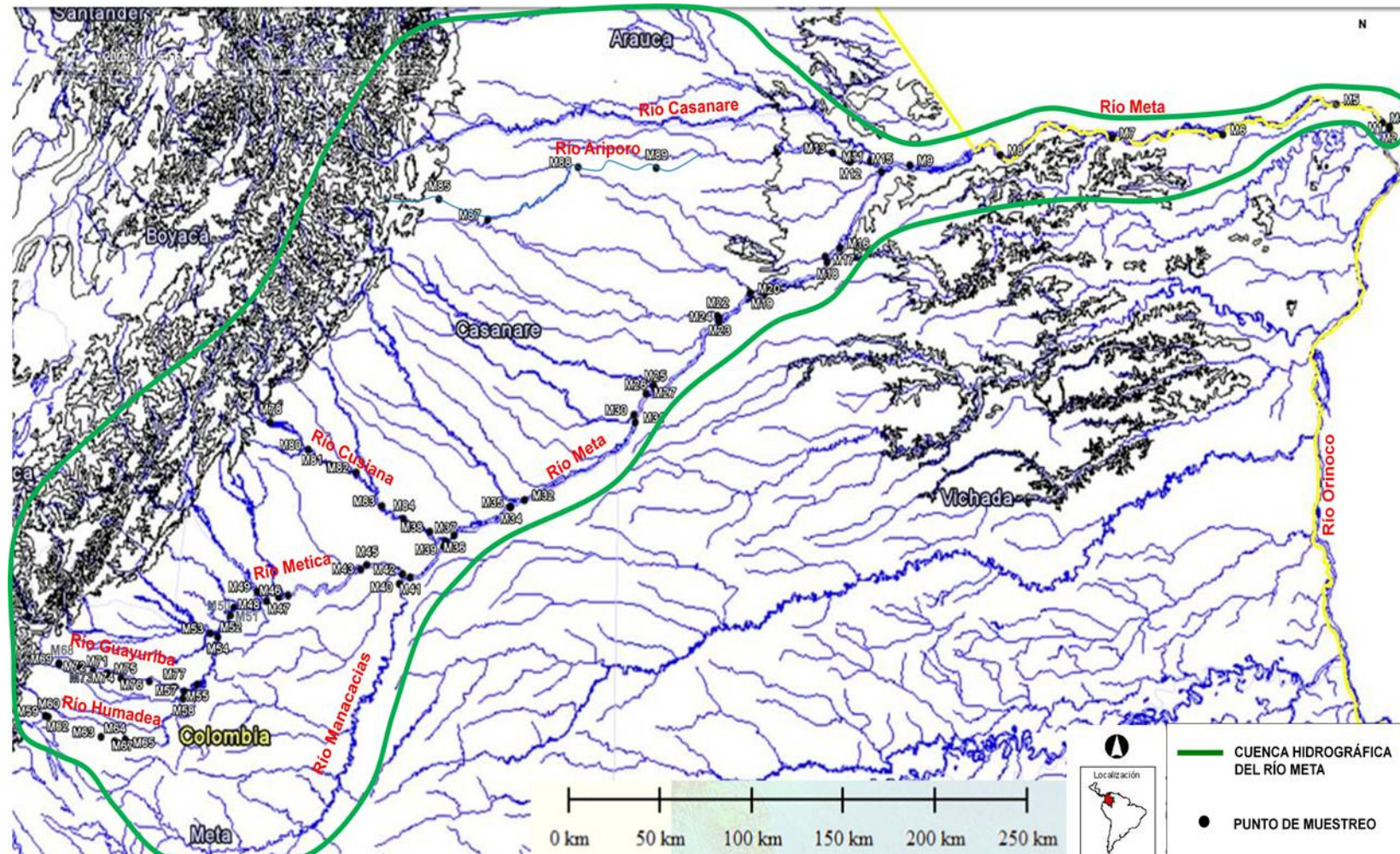
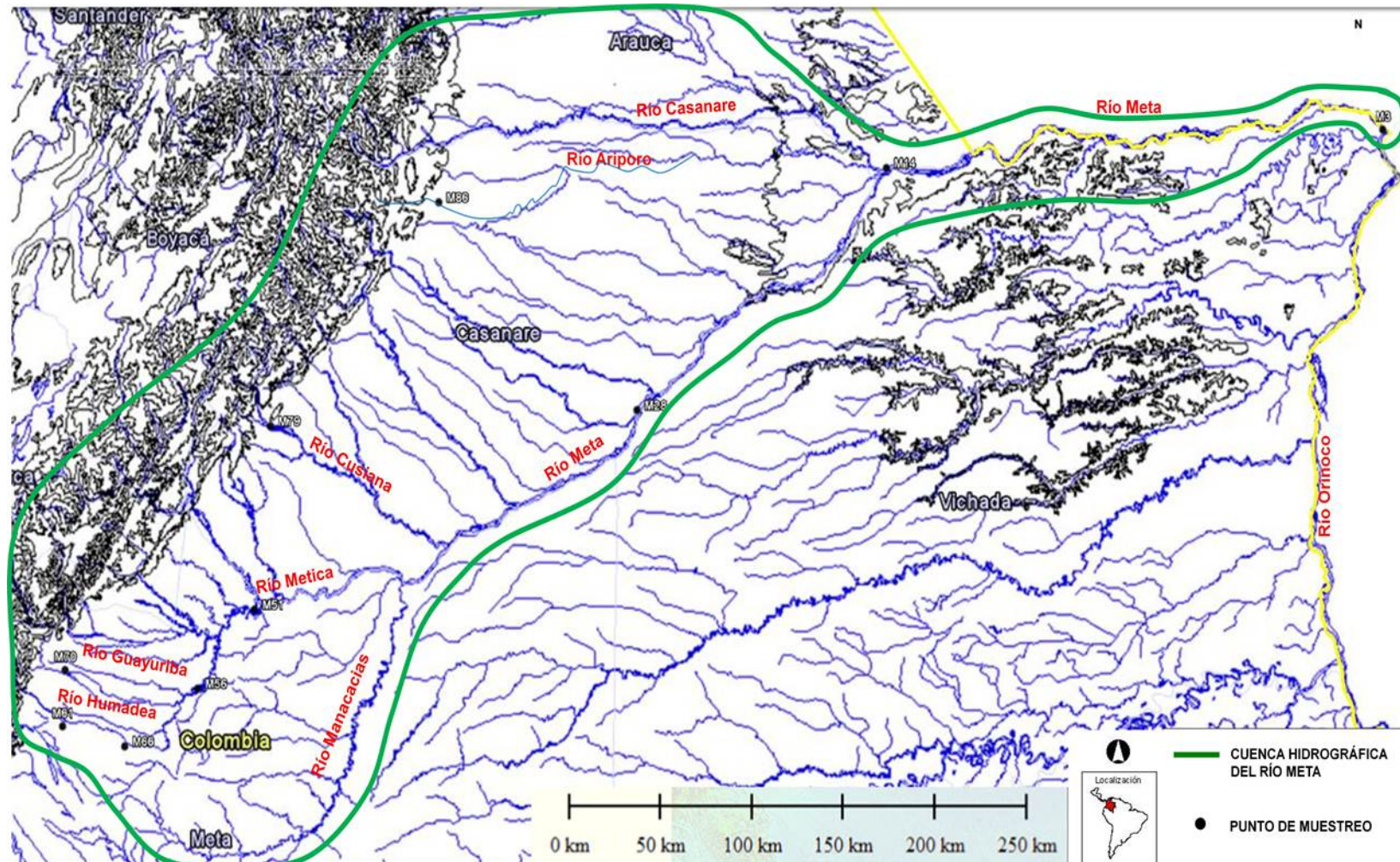


Figura 23. Ubicación de las 10 muestras de lodo colectadas en la CHRM.



6.3 RELACION ENTRE DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO EN LA CHRM Y LA PENDIENTE DE CADA CUENCA HIDROGRAFICA

En la tabla 10 se presentan los resultados de la media, desviación estándar, skewness y kurtosis, los cuales fueron calculados para el tamaño de arena entre 1-2 ϕ , en las 75 muestras colectadas en la CHRM (ver figura 22).

Tabla 10. Resultados de los primeros cuatro momentos estadísticos sobre la media para las muestras colectadas en la CHRM.

PARAMETROS DE DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO MEDIO (% 1-2 Φ)					
MUESTRAS	n	MEDIA	DESV. EST.	SKEWNESS	KURTOSIS
RÍO HUMADEA	6	43,16	10,29	-0,08	-2,75
RÍO GUAYURIBA	9	24,29	15,37	-0,14	-1,52
RÍO CUSIANA	8	48,70	14,07	-1,25	1,38
RÍO ARIPORO	7	48,81	27,56	-0,04	-0,64
RÍO META	36	41,36	23,27	-0,40	-1,00
Otros Afluentes	9	43,37	24,99	-0,10	-0,65
Total	75	41,58	21,92	-0,23	-0,71
n número de muestras					

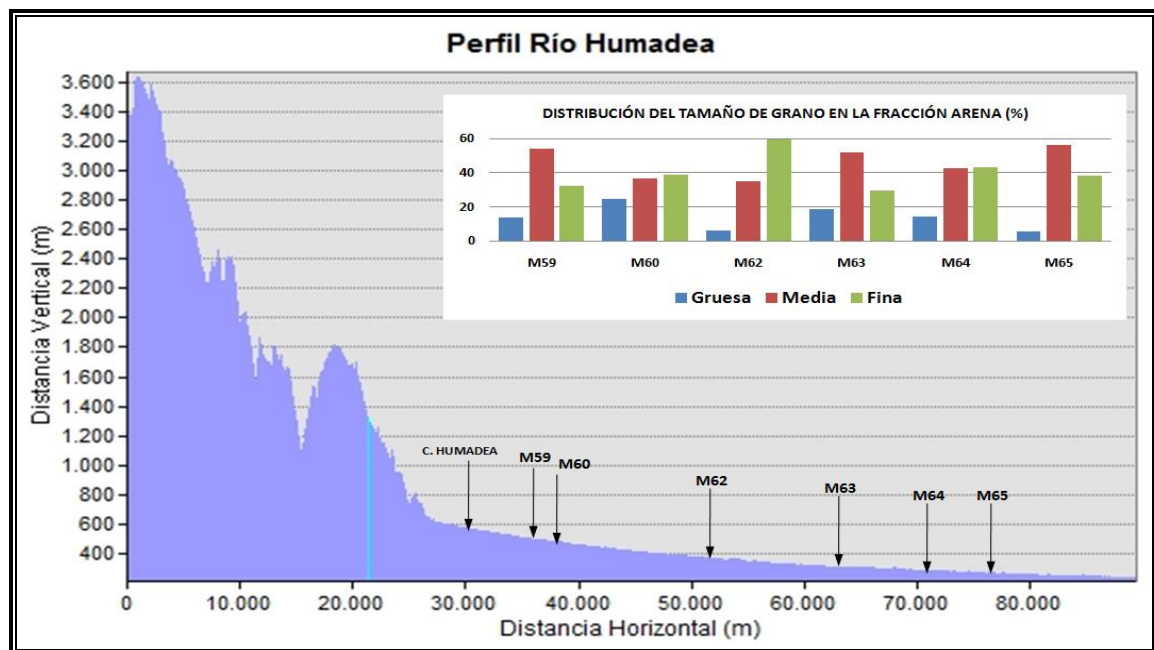
Los resultados obtenidos se relacionan a depósitos con pobre a moderado sorteado. Los resultados de skewness reflejan un exceso en el tamaño de grano grueso lo cual es congruente con el ambiente de sedimentación fluvial estudiado (Boggs, 1987; Miall, 1996). Los resultados de kurtosis muestran una tendencia platykurtica (Folk, 1974).

Los cortes topográficos transversales aproximados para las cuencas de los

afluentes y del cauce principal de Río Meta permiten apreciar el tipo de relieve, la distancia de transporte de los sedimentos fluviales colectados y su relación con la granulometría.

6.3.1 Cuenca Hidrográfica del Río Humadea. En el corte del Río Humadea (figura 24), se observa que la pendiente en el sector del área fuente (sector del piedemonte) es fuerte, cuando llega al sector del corregimiento Humadea se disminuye de forma abrupta y sigue disminuyendo gradualmente hasta unirse con el cauce del Río Metica. La proporción de la población del tamaño de grano arena media en las muestras tiende a aumentar al alejarse del área fuente (figura 24).

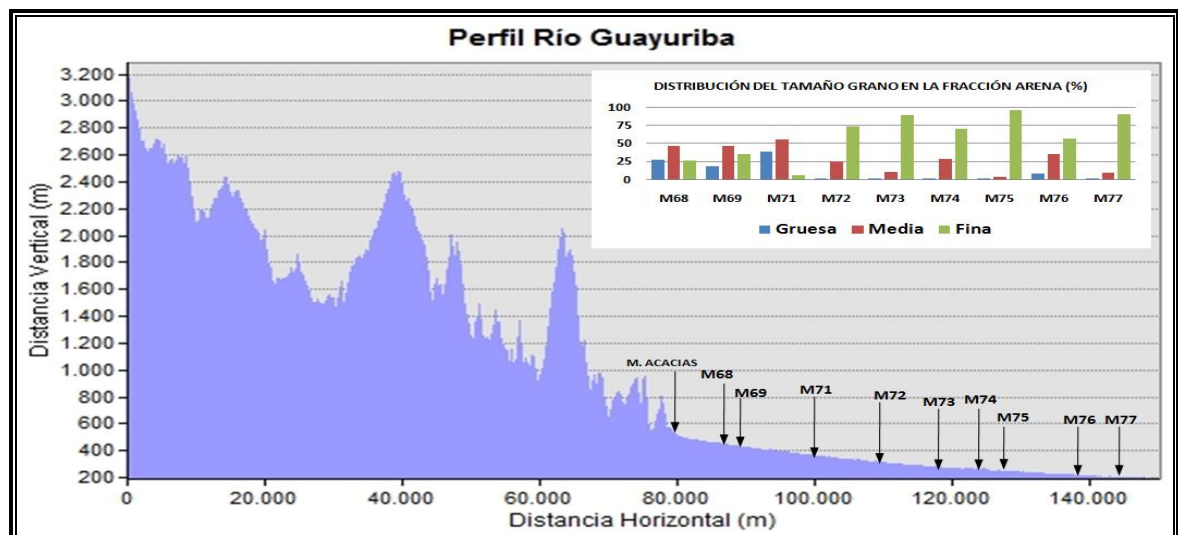
Figura 24. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Humadea con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras. Las muestras más cercanas al área fuente están a la izquierda y las más distales a la derecha.



Las rocas del área fuente para este afluente son principalmente metamórficas de bajo grado junto a algunos afloramientos sedimentarios (López, 2004).

6.3.2 Cuenca Hidrográfica del Río Guayuriba. En el corte del Río Guayuriba (figura 25), se observa que la pendiente en el sector del área fuente (sector del piedemonte) es fuerte a moderada con cambios escalonados. Cuando llega al sector del Municipio de Acacias se disminuye notoriamente, pero no llega a cambiar de forma abrupta como en el Río Humadea, esta sigue disminuyendo gradualmente hasta unirse con el cauce del Río Metica. La dimensión areal de la cuenca de este río es la más grande de las cuatro analizadas. En este río, la proporción del tamaño de grano arena media tiende a disminuir a medida que se aleja del área fuente (Figura 25).

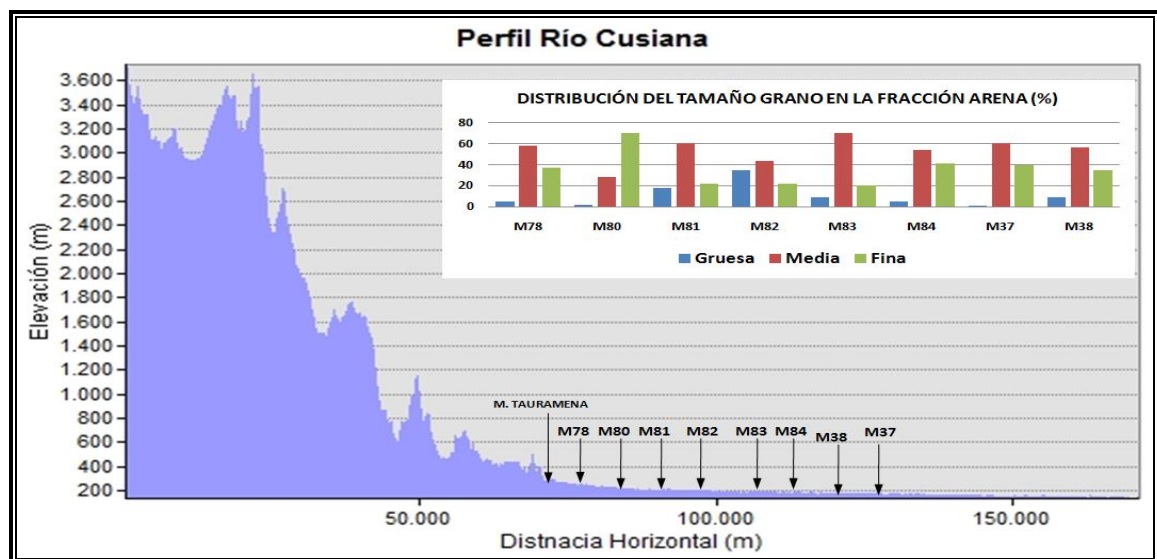
Figura 25. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Guayuriba con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras. Las muestras más cercanas al área fuente están a la izquierda y las más distales a la derecha.



Las rocas del área fuente para este afluente son principalmente sedimentarias y metamórficas (López, 2004).

6.3.3 Cuenca Hidrográfica del Río Cusiana. En el corte del Río Cusiana (figura 26), se observa que la pendiente en el sector del área fuente (sector del piedemonte) son fuertes y escalonadas, cambiando de forma abrupta a medida que se acerca al sector del Municipio de Tauramena, a partir de este sitio es suave y disminuye gradualmente hasta unirse con el cauce del Río Meta. En este río el tamaño de grano arena media tiene un comportamiento escalonado, y se mantiene en el mismo rango (40-60%) a medida que se aleja del área fuente (Figura 26).

Figura 26. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Cusiana con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras. Las muestras más cercanas al área fuente están a la izquierda y las más distales a la derecha.



Las rocas del área fuente para este afluente son principalmente sedimentarias (López, 2004).

6.3.4 Cuenca Hidrográfica del Río Ariporo. En el corte del Río Ariporo (figura 27), se observa que las pendientes en el sector del área fuente (sector del piedemonte) son fuertes y escalonadas, aunque el cambio es de forma gradual y también escalonada a medida que se acerca al sector del Municipio de Paz de Ariporo. A partir de este sitio la pendiente es suave y disminuye gradualmente hasta unirse con el cauce del Río Meta. En este río el tamaño de grano arena media tiene un comportamiento escalonado, pero tiende a aumentar a medida que se aleja del área fuente (Figura 27).

Las rocas del área fuente para este afluente son principalmente sedimentarias (López, 2004).

6.3.5 Cauce Principal del Río Meta. En el corte del Río Meta (figura 28), la pendiente tiende a ser suave en el primer sector, pero con ligeros cambios, principalmente entre el Municipio de Puerto López hasta la confluencia con el Río Manacacias. En el segundo sector la pendiente tiende a ser moderada. La pendiente en el tercer sector se caracteriza por ser moderadamente baja. El tamaño de grano arena media tiene un comportamiento escalonado, pero tiende a aumentar al alejarse de la región donde nace el Río Metica (Municipio de San Carlos de Guaroa) (Figura 28).

El Río Meta recibe los sedimentos que transportan sus afluentes desde el sector oriental de la Cordillera Oriental, los cuales son el producto de la meteorización de rocas metamórficas y sedimentarias principalmente (López, 2004). Parte de este sedimento es acumulado en aluviones que son retrabajados en épocas de invierno.

Figura 27. Perfil topográfico de la Cuenca del Río Ariporo con la ubicación de las muestras colectadas en este afluente y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras. Las muestras más cercanas al área fuente están a la izquierda y las más distales a la derecha.

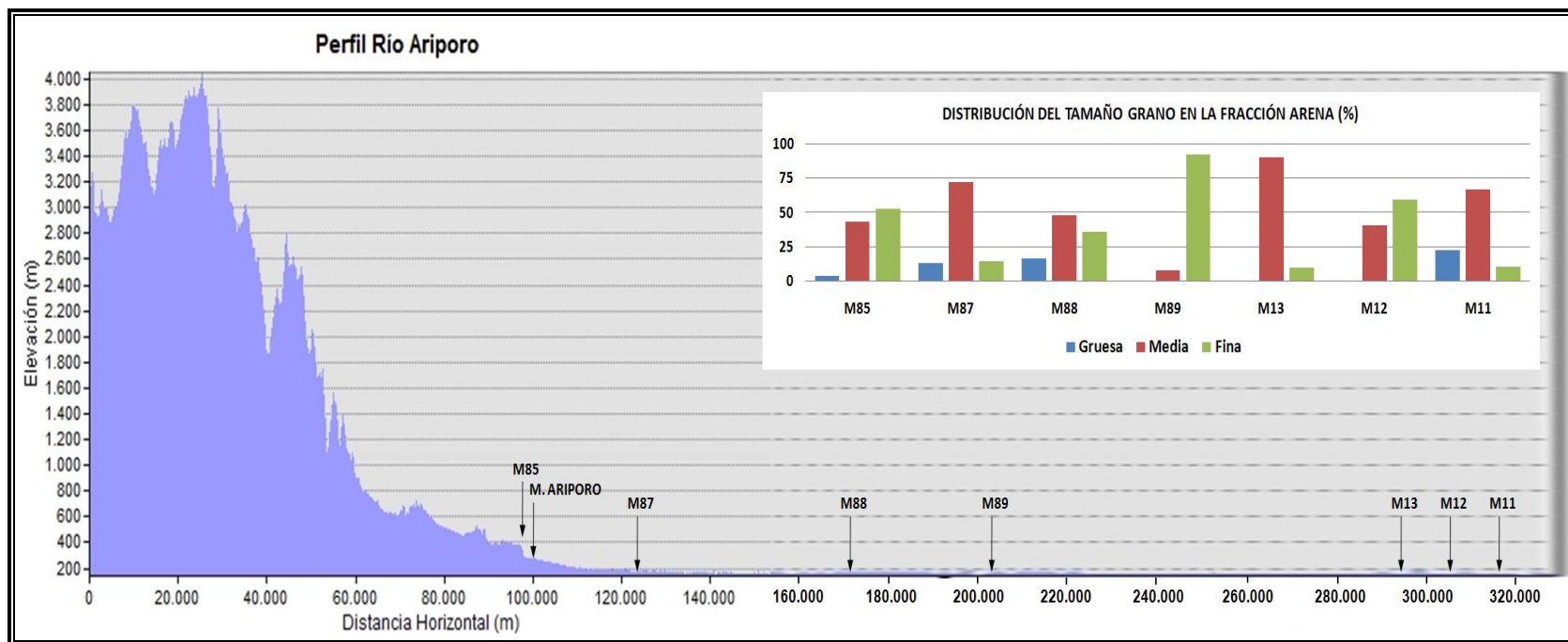
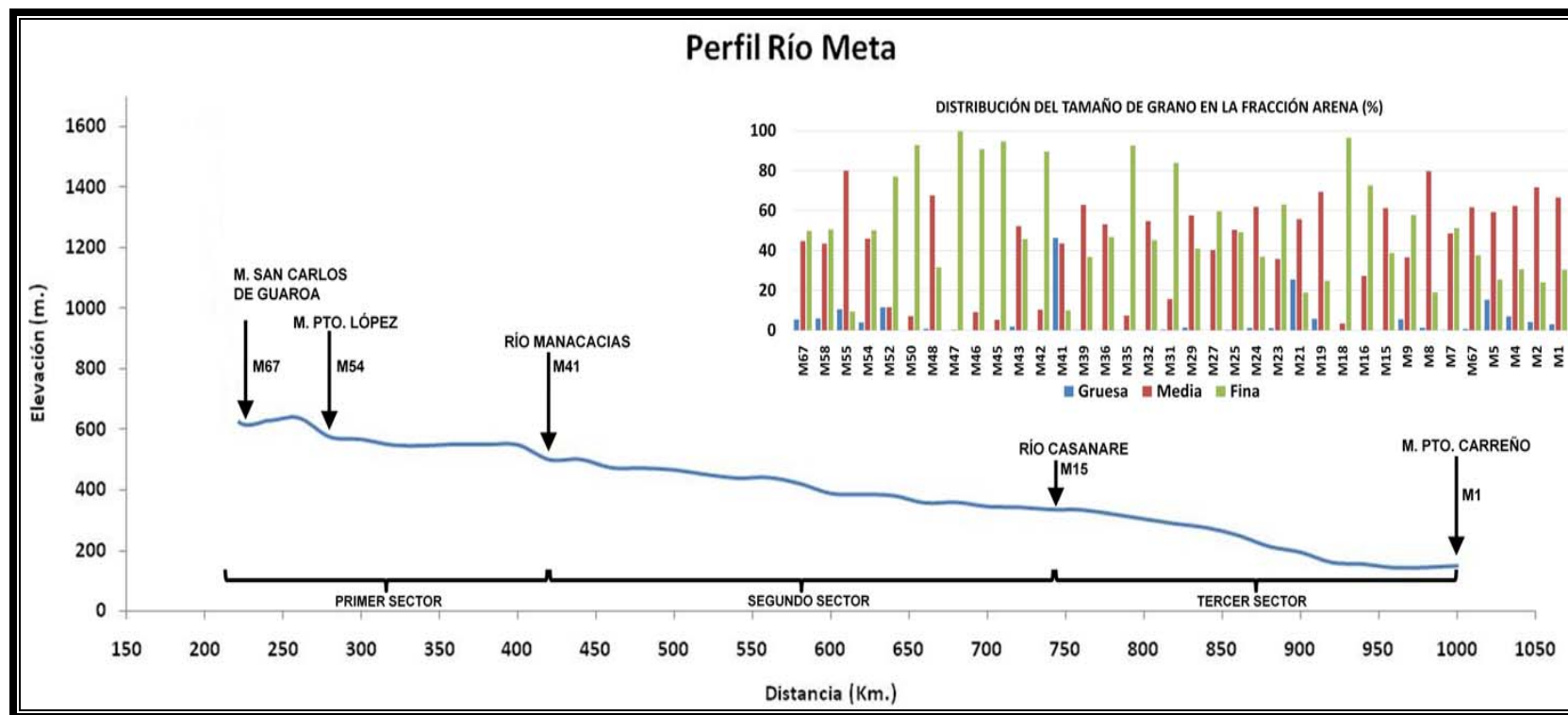


Figura 28. Perfil topográfico aproximado del cauce principal del Río Meta, ubicación de algunas muestras y valores porcentuales para los tres principales tamaños de arena en las muestras. Las muestras más cercanas al nacimiento están a la izquierda y las más distales a la derecha.



6.4 RESULTADOS DE LA PETROGRAFIA EN LAS MUESTRAS DE ARENA COLECTADAS EN LA CHRM

6.4.1 Identificación Composicional de los Tipos de Granos. En las 44 secciones delgadas analizadas (figura 29) se identificaron un total de 21 categorías de granos (ver tabla 11), los cuales se agrupan en granos monominerálicos y fragmentos de roca (granos poliminerálicos). En la categoría de granos monominerálicos se incluye granos donde más del 95% del grano está constituido por una sola especie mineral. La categoría de fragmento de roca (R) hace referencia a granos poliminerálicos donde cada especie mineral dentro del grano. Para determinar la procedencia y relación que tiene la composición de las muestras con las rocas aflorantes se elaboraron las tablas 7 y 11, donde se puede diferenciar claramente las categorías de granos que son producidos en sectores con rocas metamórficas y sedimentarias aflorantes, aunque en la tabla 11 no se hizo detalle sobre la clasificación composicional y textural de los granos poliminerálicos dentro de las categorías de fragmentos metamórficos y fragmentos sedimentarios, pero si se diferenció cada una de estas por separado, donde cada categoría agrupó las características composicionales de cada grano poliminerálico identificado y clasificado durante la petrografía; es decir, en la categoría de granos poliminerálicos de composición metamórfica con foliación (Rmsf), se agrupan fragmentos de rocas de esquistos, filitas o pizarras; así mismo, en la categoría de fragmentos de rocas sedimentarias como limolitas y areniscas (Rssilt), se agrupan los fragmentos de rocas de limolitas arcillosas, arcillolitas limosas, limolitas feldespáticas, limolitas feldespáticas con glauconita, limolitas silíceas con glauconita, limolitas arenosas feldespáticas, etc. (tabla 7)

Los resultados modales totales de cada una de las categorías para todas las muestras, se realizó con un conteo de 300 puntos por muestra. Los valores recalculados para QtFR, QmFRt y RsRmsRp en el total de las muestras se observan en el Anexo B. En los siguientes capítulos se presentan los resultados de

la petrografía realizada a las muestras por cuenca hidrográfica y por su afinidad con la composición dominante en el área fuente. Por último, se muestran los resultados a lo largo del Río Meta.

Figura 29. Ubicación de las 44 muestras de arena seleccionadas para petrografía.

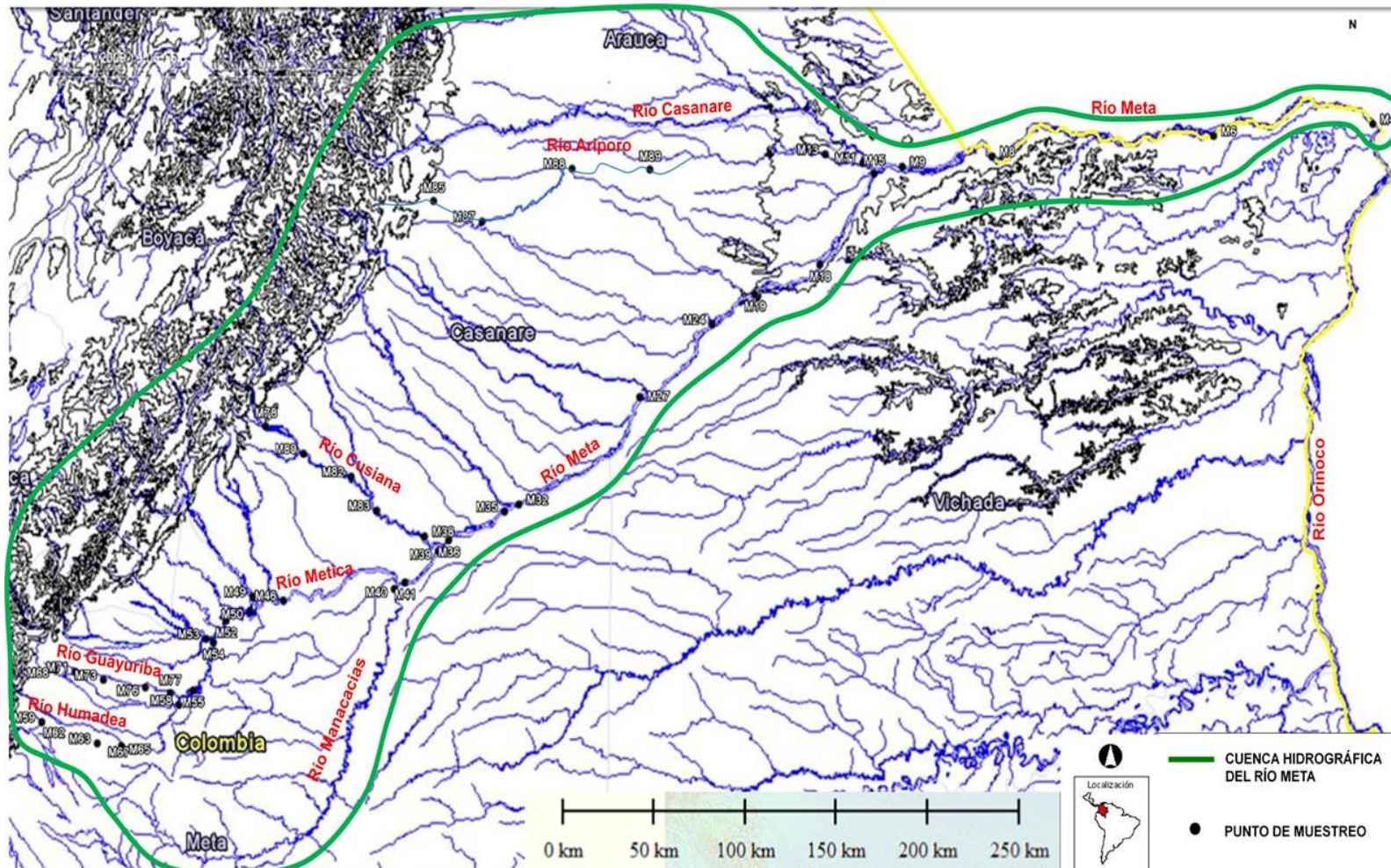


Tabla 11. Categorías, grupos composicionales, abreviaturas y criterios diagnóstico.

M =	Granos Monominerálicos (Granos con más del 95% de sólo una especie mineral):
Qt =	Cuarzo total (La cantidad de granos compuestos sólo por cristales de cuarzo en una muestra):
Qm =	Cuarzo monocristalino (granos los cuales están compuestos en más del 95% por un cristal de cuarzo):
Qms =	Cuarzo monocristalino con extinción recta (<5°)
Qmu =	Cuarzo monocristalino con extinción ondulosa (>5°)
Qp =	Cuarzo policristalino (granos que están compuestos en más del 95% por dos o más cristales de cuarzo):
Qp2-3 =	Cuarzo policristalino con dos o tres cristales por grano
Qp>3 =	Cuarzo policristalino con más de tres cristales por grano:
Qp>3f =	Cuarzo policristalino con más de tres cristales por grano, foliado (es decir, los cristales presentan orientación)
Qp>3m =	Cuarzo policristalino con más de tres cristales por grano, masivo (es decir, los cristales no presentan ningún tipo de orientación)
Qpc =	Chert
F =	Feldespatos (Granos monocristalinos y policristalinos)
Fk =	Feldespato potásico
Fp =	Feldespato plagioclasea
A =	Minerales accesorios (minerales presentes en pequeñas cantidades en las muestras como óxidos o minerales opacos y fosfatos)
R =	Fragmentos de Roca (especies minerales que no constituyen más del 95% del grano):
Rs =	Fragmentos de Rocas Sedimentarias:
Rssilt =	Fragmentos de limolitas y areniscas (Subgranos detríticos definibles)
Rms =	Fragmentos de Rocas Metamórficas y metasedimentarias:
Rmsf =	Fragmentos de roca metamórfica foliada (los subgranos presentan orientación)
Rmsm =	Fragmentos de roca metamórfica masiva (los subgranos no presentan una orientación preferencial pero hay indicios de procesos de deformación o neoformación de minerales)
Rp =	Fragmentos de Roca Plutónica
Alt =	Alteritas (se refiere a granos lo suficientemente alterados que no permiten identificar su origen)
Fer =	Ferricitas (son fragmentos de lateritas)
Bio =	Detritos biogénicos como materia orgánica o restos esquelatales

Fuente: Modificado de Johnsson et al., 1991.

6.4.2 Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Rocas Metamórficas y Metasedimentarias. En las muestras de los ríos Humadea y Guayuriba prevalece el contenido de fragmentos de roca metamórfica, aunque es importante resaltar que en las cuencas de estos afluentes también afloran rocas sedimentarias que transportan granos de cuarzo de varios ciclos de sedimentación. Los principales granos reconocidos durante la petrografía se observan en la figura 30. La forma de los granos es de subangulares a subredondeados. En el área fuente del río Guayuriba, las rocas sedimentarias expuestas representan más del 50% de las rocas aflorantes (Tablas 7, 8, 11, figuras 21 y 30).

El grado de meteorización química de algunos fragmentos de roca en las muestras de los Ríos Humadea y Guayuriba, se refleja por la presencia de alteritas (ver tabla 11, figura 31). Algunos granos poliminerálicos de composición sedimentaria contienen glauconita meteorizada, la cual se observa en los primeros 21 km de transporte aproximadamente, medidos desde el área fuente (piedemonte) (figura 32 y 33).

Los resultados composicionales obtenidos durante la petrografía en las muestras de arena de los ríos Humadea y Guayuriba muestran dos poblaciones, pero ambas en el campo de las litoarenitas. Esta composición depende principalmente del contenido de cuarzo y fragmentos de roca, tomando en cuenta que el contenido de feldespato en las muestras de arena es muy escaso (media del 0.59% para el Río Humadea y del 0,92% para el Río Guayuriba). Con los resultados modales de las muestras tomadas en cada afluente se realizó una estimación de la posible producción de fragmentos de roca en relación con la exposición de las formaciones rocosas para cada cuenca hidrográfica (tabla 12 y anexo B). El dato final depende del área de exposición de cada formación rocosa (tabla 8). Esto permite reconocer la posible influencia ejercida por el área fuente en los depósitos fluviales de arenas de la cuenca hidrográfica, así como la

influencia ejercida por la composición de las rocas expuestas, por el área expuesta de cada formación rocosa y por las condiciones climáticas en la zona.

Figura 30. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras de los ríos Humadea (muestras M59 y M65) y Guayuriba (muestra M76). Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. La muestra M59 es la más cercana al área fuente y las muestras M65 y M76 las más distales. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.

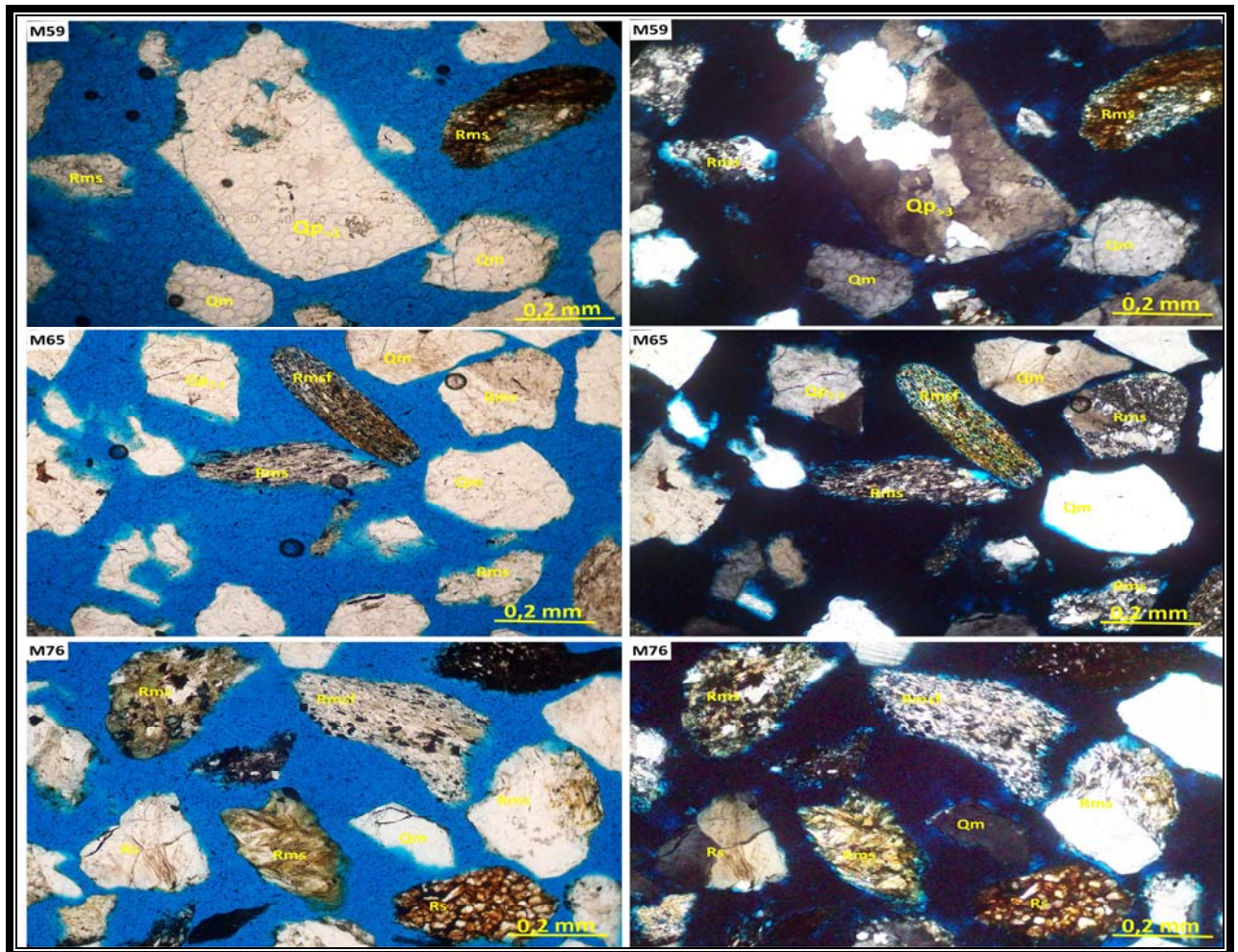


Tabla 12. Valores porcentuales de las rocas expuestas en el área fuente y de los granos contados en las muestras de arena. %FRms: Valores porcentuales de formaciones metamórficas aflorantes en el área fuente. %FRs: Valores porcentuales de formaciones sedimentarias aflorantes en el área fuente. %Rms: Valores modales de fragmentos de rocas metamórficas y metasedimentarias en la muestras más cercana al área fuente. %Rs: Valores modales de fragmentos de rocas sedimentarias en la muestras más cercana al área fuente.

Cuenca/Río	%FRms	%FRs	%Rms	%Rs
Humadea	67,92	32,08	56,90	43,10
Guayuriba	32,39	67,61	50,68	49,32

Para el Río Humadea, utilizando los valores de la tabla 8, se obtiene una relación aproximada de exposición y producción entre rocas metamórficas y sedimentarias de 2:1, al igual que la producción de cuarzo monocristalino comparado con el policristalino (anexo B). Para los aproximados 50 kilómetros que tiene el recorrido del Río Humadea desde el piedemonte, hasta la confluencia con el Río Guayabero (medidos en línea recta), se calculó una disminución de fragmentos de roca del 3% aproximadamente. Se les realizó petrografía a 4 muestras de arena tomadas en barras laterales a lo largo del río Humadea, cuyo pH del agua es ácido (promedio de 4,38). Estas muestras de arena son composicionalmente inmaduras, con una composición media entre litoarenitas a sublitoarenitas (composición media de **Qt**76,37**F**0,59**R**23,04; figura 34). El contenido de granos de chert y Qp es bajo en comparación con el contenido de Qm y R (composición media de **Qm**65,15**Qp**11,7**R**23,16; figura 35). Además, se observa que las muestras no presentan una marcada tendencia al aumento o disminución de granos de Qm, a

medida que aumenta la distancia al área fuente.

En la figura 36 se puede apreciar como la población de granos metamórficos es más abundante que la cantidad de granos sedimentarios presentes en la muestra, reflejado en la composición media de los diferentes tipos de fragmentos de roca (composición media de **Rs_{35,70}Rms_{64,30}Rp_{0,0}**; figura 36) . Nótese también, que los fragmentos de roca metamórfica y metasedimentaria no presentan una tendencia a disminuir o aumentar a medida que aumenta la distancia al área fuente.

Figura 31. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos granos de alterita en algunas muestras de los Ríos Humadea (M59) y Guayuriba (M68). Las muestras M59 y M68 son las más cercanas al área fuente. Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.

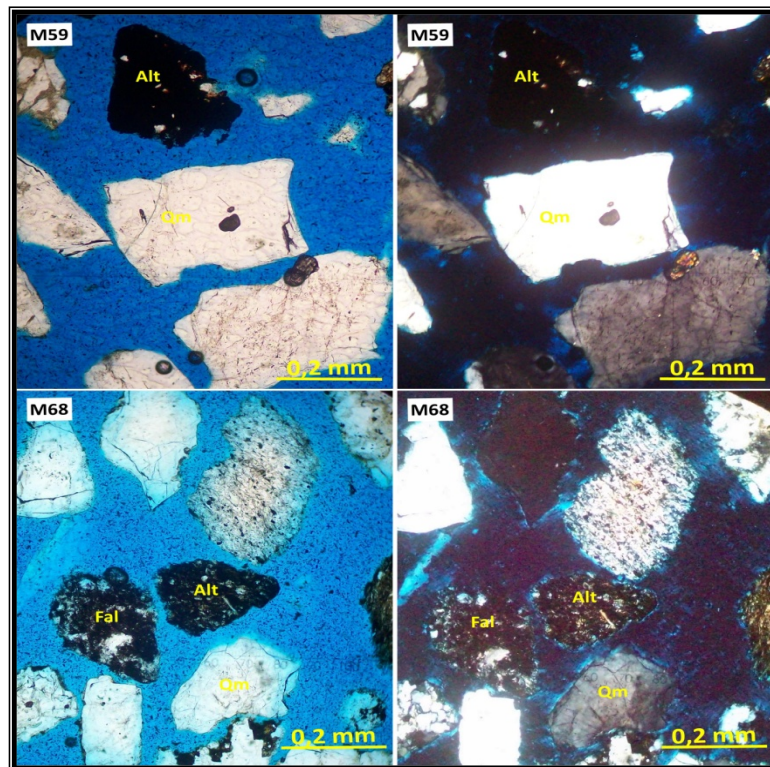
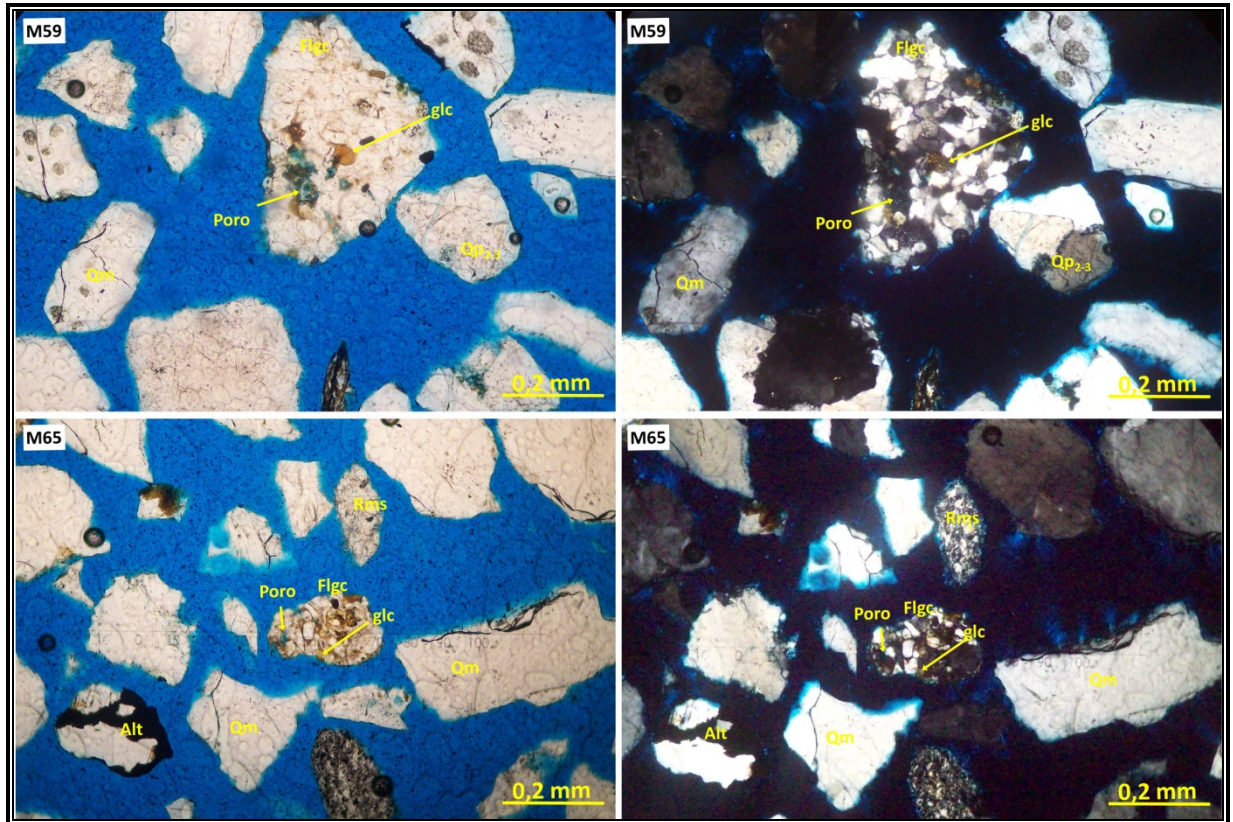


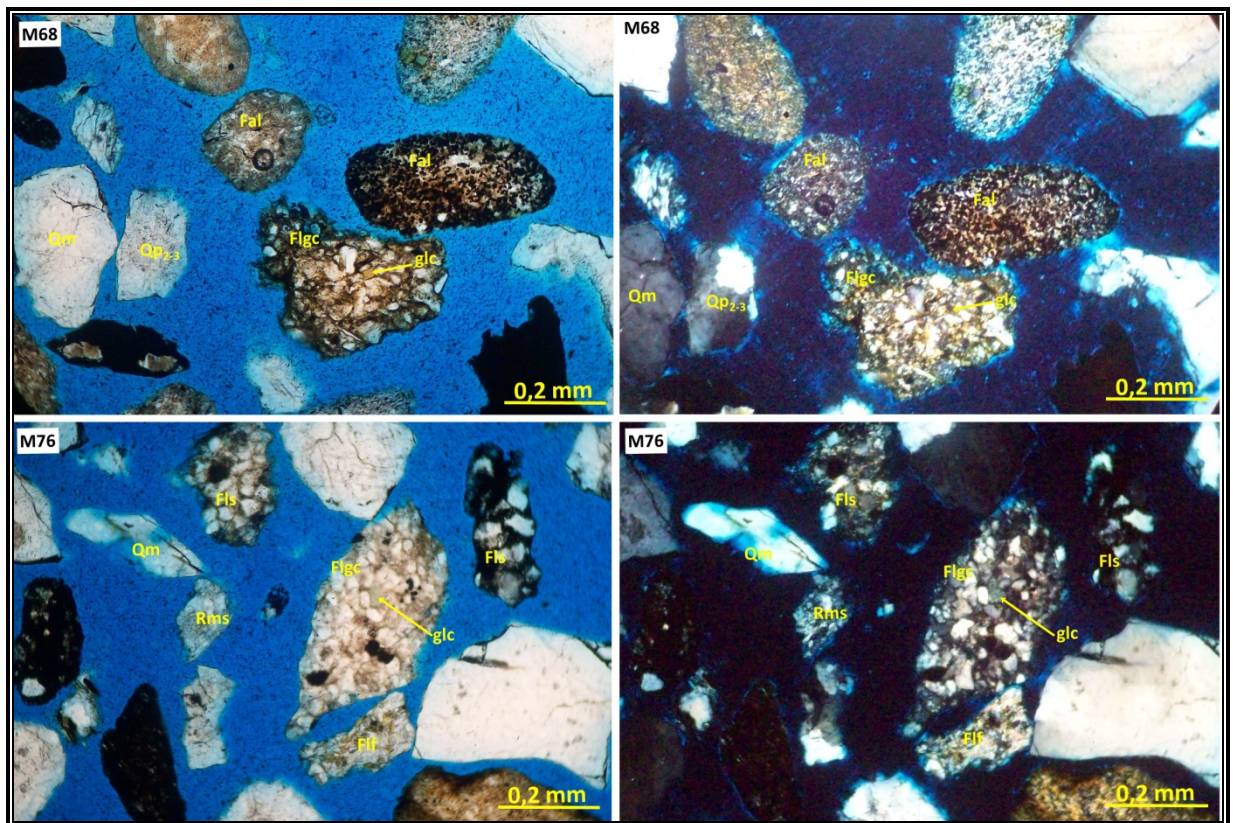
Figura 32. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Humadea. La muestra M59 es la más cercana al área fuente y la M65 es la más distal. Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



En la figura 37 se observa como en el Río Humadea la cantidad de granos de Qp y Rglc en las muestras de arena presentan una tendencia casi lineal a disminuir a medida que aumenta la distancia al área fuente, principalmente entre las muestras M59 (más cercana al área fuente), M62 y M65 (más lejana al área fuente). La muestra M63 se observa fuera de esta tendencia, pero tiene el mayor contenido en granos de Qp. En el caso de los granos de Rmsf, la tendencia es en aumento entre las muestras M59, M63 y M65, a medida que se está alejando del área

fuelle, pero la muestra fuera de tendencia es la M62, la cual tiene el menor contenido en granos de Rmsf.

Figura 33. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Guayuriba. La muestra M68 es la más cercana al área fuente y la M76 la más distal. Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



Para el Río Guayuriba la producción de fragmentos metamórficos con respecto a los sedimentarios está en una relación de 1:2, pero la relación en cuanto a la producción de cuarzo monocristalino y policristalino sigue siendo de 2:1. En los 70

kilómetros aproximadamente de recorrido, que tiene el Río Guayuriba desde el piedemonte hasta su confluencia con el Río Metica (medidos en línea recta), los fragmentos de roca disminuyen en un 5% aproximadamente (tabla 12).

De las muestras de arena tomadas a lo largo del río Guayuriba, se eligieron 5 muestras para petrografía. El pH del agua en este afluente se caracteriza por ser neutro (promedio de 7,1). Composicionalmente son muestras de arena inmaduras. La composición es de litoarenitas (**Qt**_{49,64}**F**_{0,92}**FR**_{49,45}; figura 34), con un contenido bajo en granos de chert y Qp (**Qm**_{34,52}**Qp**_{15,54}**R**_{49,95}; figura 35). En las cuatro muestras más cercanas al área fuente, la composición predominante de los fragmentos de roca es metamórfica (**Rs**_{47,73}**Rms**_{52,27}**Rp**_{0,0}), pero en la muestra más lejana, el contenido de fragmentos sedimentarios iguala el contenido de fragmentos metamórficos. La composición de los granos poliminerálicos en ambos ríos es principalmente metamórfica y metasedimentaria, como esquistos, filitas, metareniscas y metalimolitas (figura 36).

El contenido de fragmentos plutónicos es nulo en los dos ríos. En estos afluentes los resultados modales no muestran tendencias marcadas a disminuir o aumentar la presencia de ciertos granos a medida que aumenta la distancia al área fuente.

Figura 34. Composición de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente metamórfica y metasedimentaria. El chert es sumado al Qt. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores de las muestras individuales, a la derecha los valores medios. Las muestras M59y M68 son las más cercanas al área fuente, las muestras M65 y M77 las más distales.

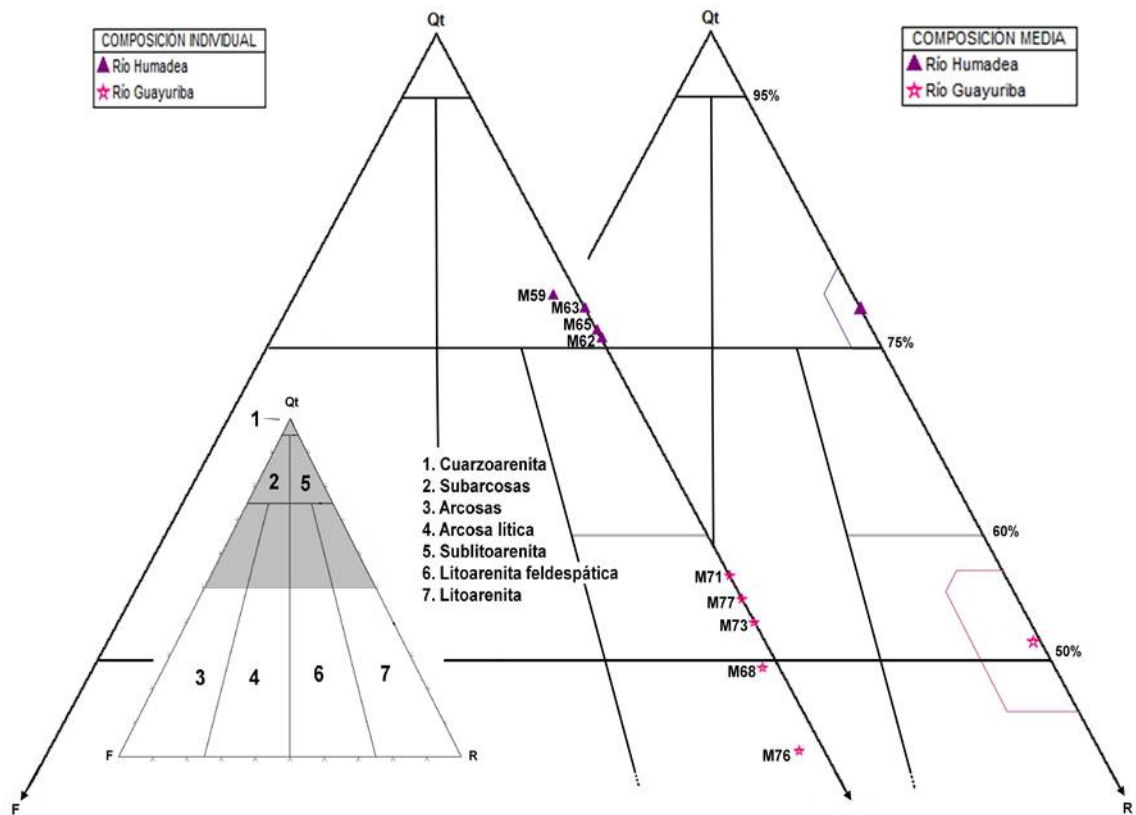
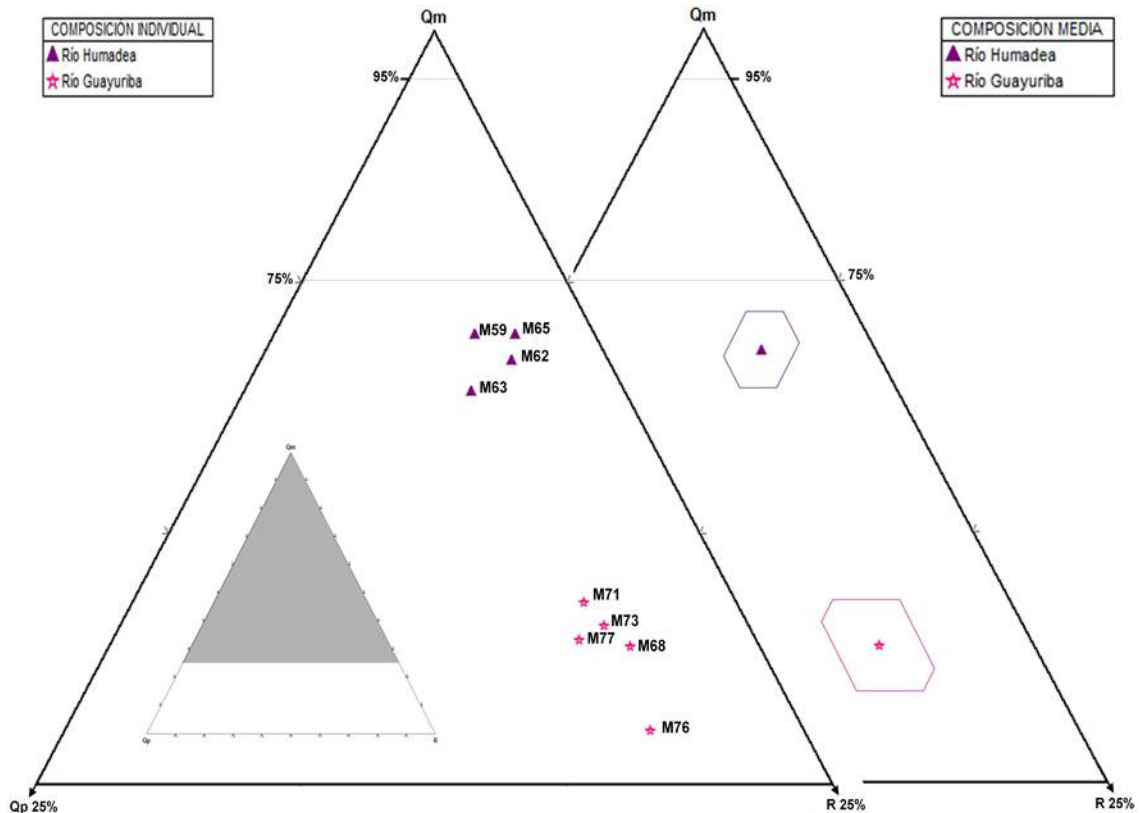


Figura 35. Madurez composicional de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente metamórfica y metasedimentaria. La región superior ha sido exagerada. En la izquierda los valores medios de las muestras, a la derecha los valores individuales. Las muestras M59y M68 son las más cercanas al área fuente, las muestras M65 y M77 las más distales.



En el Río Guayuriba la tendencia para los granos de Qp y Rglc es en aumento, esto se observa entre las muestras M68 (más cercana al área fuente), M71, M73 y M77 (más lejana al área fuente). Para estos granos, la muestra M76 está fuera de la tendencia. Los granos de Rmsf tienen una tendencia lineal hacia el aumento, pero en dos partes. La primera tendencia se observa entre las muestras M68 y M71, y la segunda tendencia es entre las muestras M73, M76 y M77 (figura 37).

Figura 36. Composición de los granos poliminerálicos en las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente metamórfica y metasedimentaria. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores medios de las muestras, a la derecha los valores individuales. Las muestras M59y M68 son las más cercanas al área fuente, las muestras M65 y M77 las más distales.

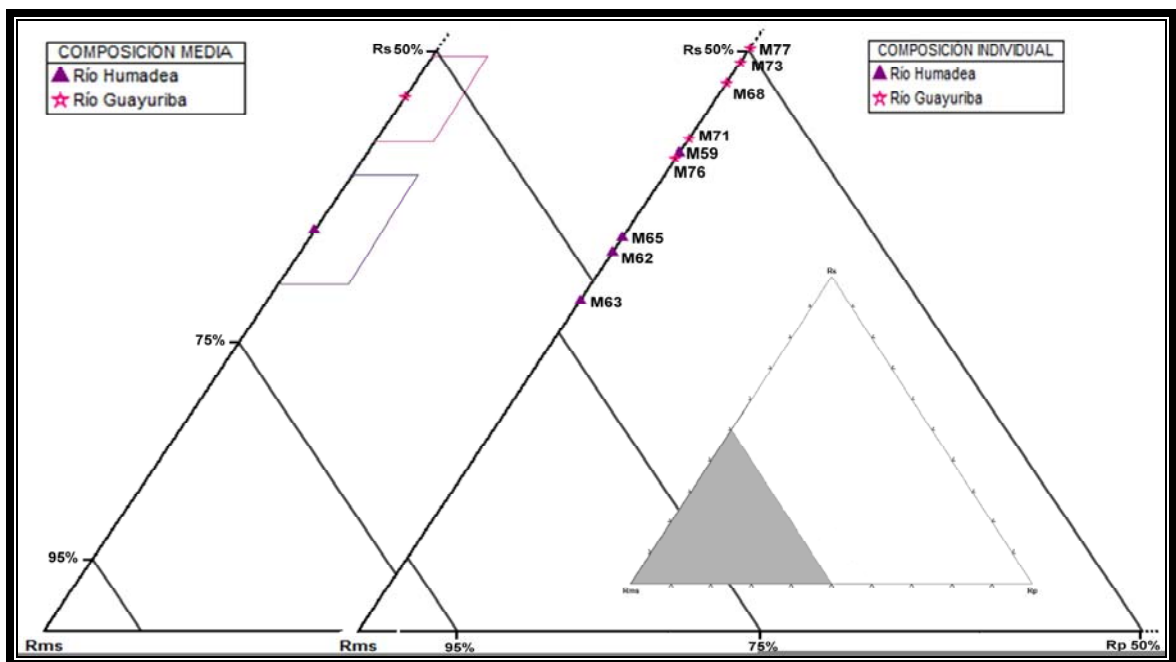
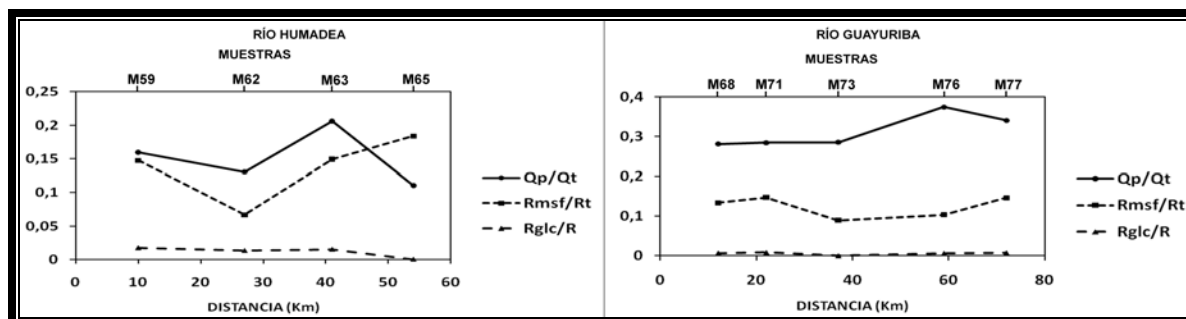


Figura 37. Variación en la relación de cuarzo policristalino (Q_p) y cuarzo total (Q_t), fragmentos de roca foliada (R_{msf}) y fragmentos de roca total (R_t), y fragmentos de roca con glauconita (R_{glc}) y fragmentos de roca (R), para los Ríos Humadea y Guayuriba. Las muestras de la izquierda son las más cercanas al área fuente y las de la derecha son las más distales.



6.4.3 Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Rocas Sedimentarias. La figura 39 muestra la abundancia de los diferentes tipos de granos que se observan en las muestras de arena colectadas en los ríos Cusiana y Ariporo. Estas muestras contienen fragmentos de rocas sedimentarias que se caracterizan por presentar granos de cuarzo de varios ciclos de sedimentación (Tablas 7, 8, 11, figuras 21 y 38). Los granos tienen formas subangulares a subredondeadas.

La composición de los granos poliminerálicos es preferencialmente de rocas sedimentarias, principalmente arcillolitas, limolitas cuarzosas y feldespáticas con glauconita, y areniscas cuarzosas (figura 38). En el Río Cusiana, la glauconita se observa inalterada aproximadamente en los primeros 20 kilómetros de recorrido, medidos en línea recta desde el área fuente (piedemonte). Superando esta distancia se observa meteorizada y en forma residual (figura 39). En el Río Ariporo, la glauconita se observa inalterada durante los primeros 15 kilómetros de recorrido aproximadamente (figura 40). También se observan algunos granos de

óxidos de hierro (ferricrita) y hematita, producto de los procesos de meteorización química (figura 41).

Figura 38. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria en algunas muestras de los ríos Cusiana (muestras M78 y M38) y Ariporo (muestras M85 y M13). Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Las muestras M78 y M85 son las más cercanas al área fuente y las muestras M38 y M13 las más distales. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11. Convenciones especiales: Qz: cuarzo; glc: glauconita; Pglc: poro por disolución de glauconita; F_k: feldespatos potásicos.

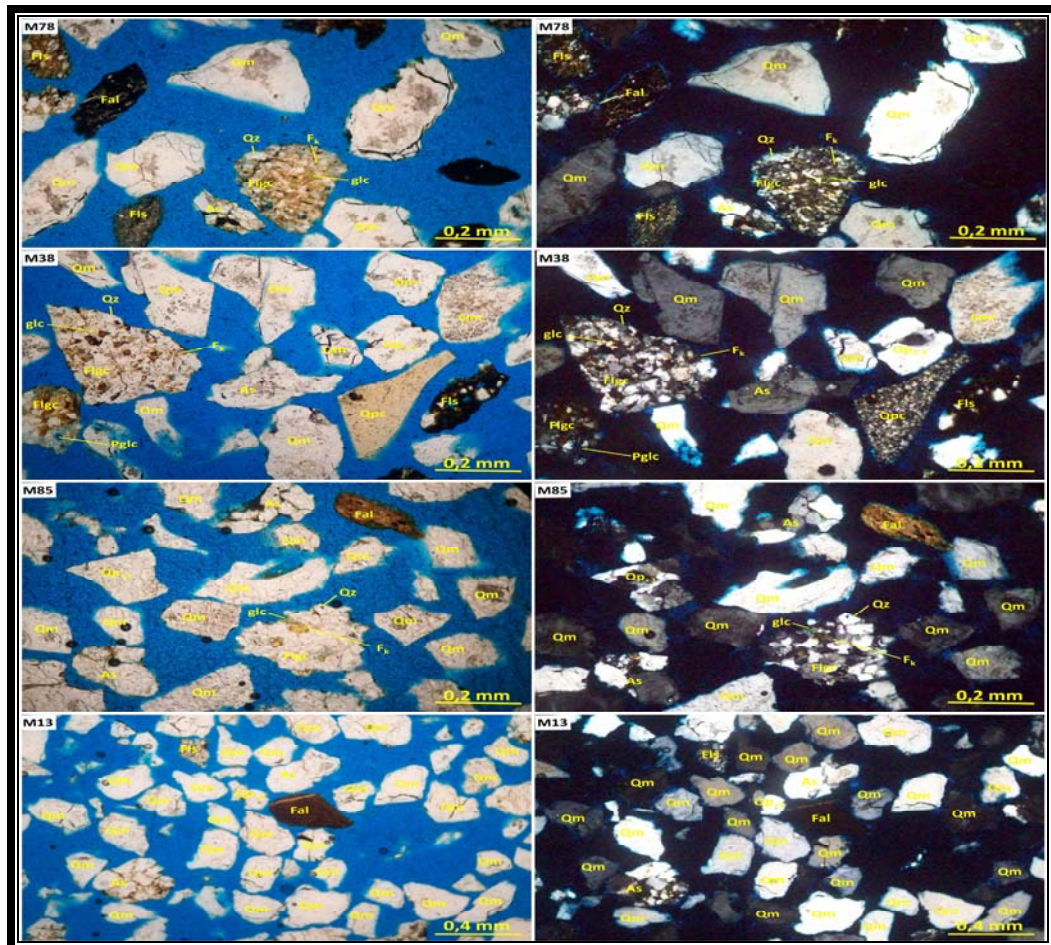
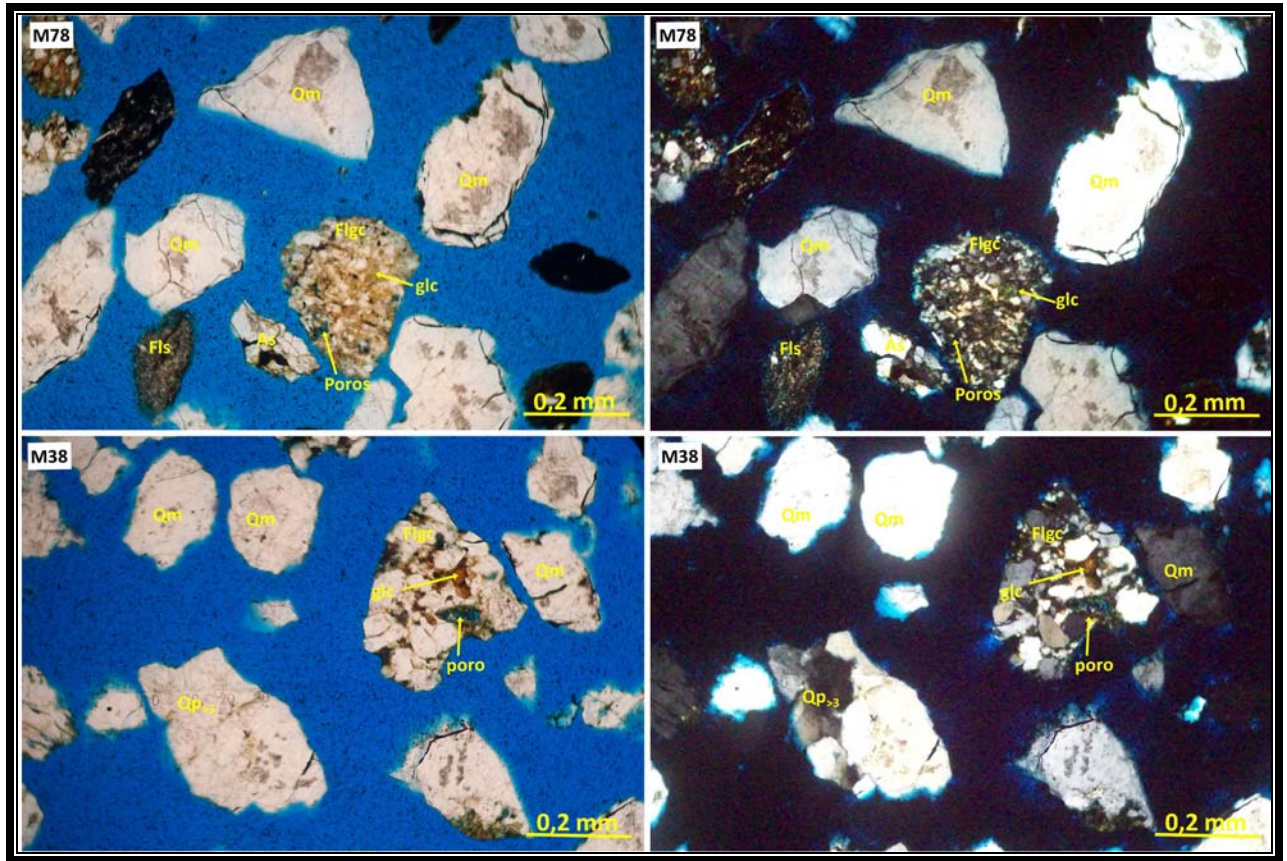
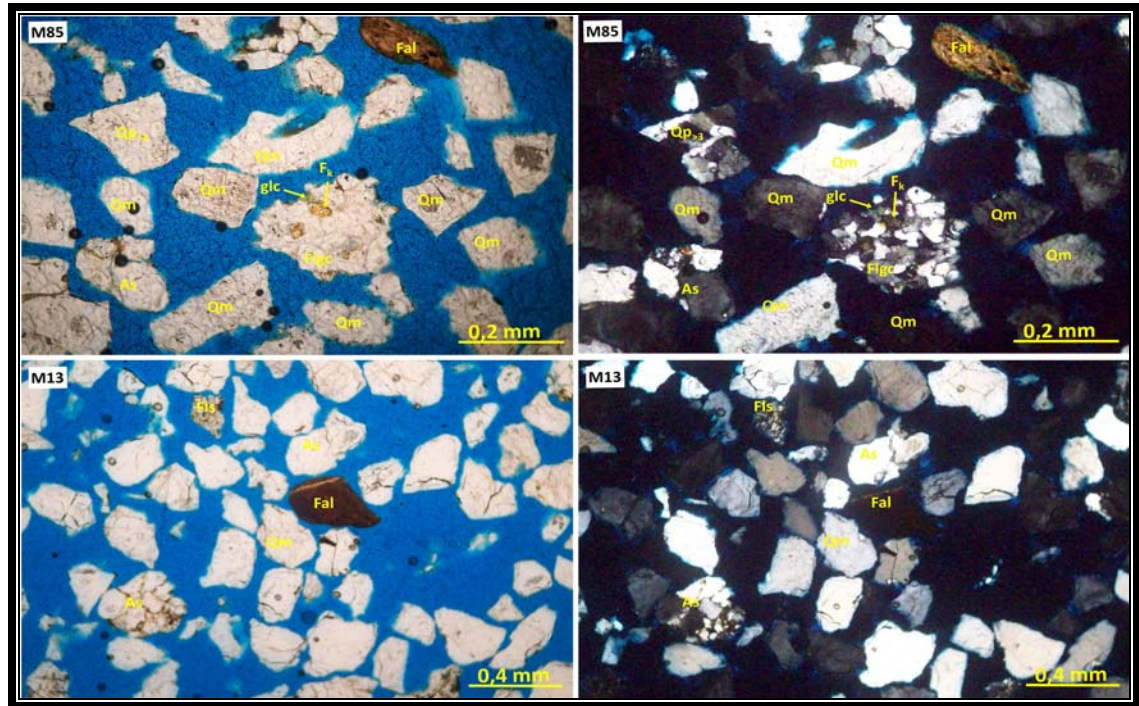


Figura 39. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Cusiana. La muestra M78 es la más cercana al área fuente y la M38 la más distal. Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



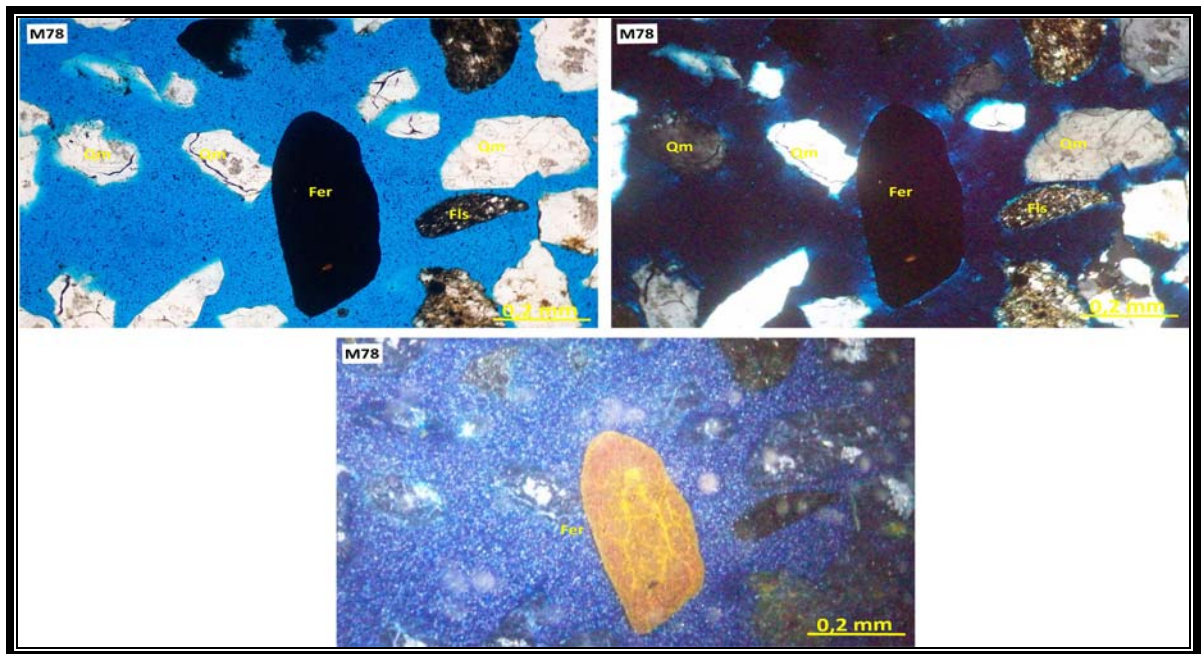
La porosidad presente en los fragmentos de roca sedimentaria, puede ser producto de la remoción de los granos de glauconita y/o de granos de feldespato.

Figura 40. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Ariporo. La muestra M85 es la más cercana al área fuente y la M13 la más distal. Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



En este sector los resultados composicionales obtenidos durante la petrografía en las muestras de arena muestran dos poblaciones diferentes. Para el Río Cusiana preferencialmente en el campo de las litoarenitas y para el Río Ariporo en el campo de las sublitoarenitas. Esta composición, de igual forma que en el sector donde afloran rocas metamórficas, depende principalmente del contenido de granos de cuarzo y fragmentos de roca, tomando en cuenta que el contenido de feldespato en las muestras de arena es muy escaso (media del 0,41% para el Río Cusiana y del 0,46% para el Río Ariporo).

Figura 41. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando granos de cuarzo, un fragmento de roca sedimentaria y un grano de ferricrita en una de las muestras del Río Cusiana. Imagen de la izquierda en N// y NX a la derecha. La fotografía de la parte inferior fue tomada colocando una fuente de luz externa, mostrando la presencia de material rico en óxido de hierro (limonita y hematita). Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



Utilizando la información modal resultante de la petrografía en las muestras de arena, es posible realizar una estimación inferida de la producción de fragmentos de roca en el área fuente de cada cuenca hidrográfica (tabla 8). También, se puede calcular la proporción en la cual estos granos disminuyen a medida que aumenta la distancia de transporte. Como resultado se obtiene para el Río Cusiana una producción inferida del 37%, la cual disminuye aproximadamente en un 15% durante el recorrido desde el piedemonte hasta la confluencia con el Río Meta (aproximadamente 100 kilómetros de transporte medidos en línea recta).

De las muestras de arena colectadas en barras puntuales a lo largo del Río Cusiana, donde el pH del agua es principalmente ácido (promedio de 6,1), se eligieron 5 muestras para petrografía, las cuales son composicionalmente inmaduras. Estas muestras de arena se caracterizan por tener dos poblaciones (litoarenitas y sublitoarenitas), pero se ubican principalmente en el campo de las litoarenitas (composición media de **Qt₇₃F_{0,41}R_{26,59}**; figura 42). Tienen un bajo contenido de granos de Qp y chert (composición media de **Qm_{63,13}Qp_{10,19}R_{26,69}**; figura 43). En estas muestras se observa una tendencia al aumento en el contenido de granos de Qm a medida que aumenta la distancia al área fuente (figura 43). Los fragmentos de rocas son principalmente sedimentarios (composición media de **Rs_{95,04}Rms_{4,66}Rp_{0,30}**; figura 44).

La figura 45 muestra como en el Río Cusiana la cantidad de granos de Qp en las muestras de arena presentan una tendencia casi lineal a disminuir a medida que aumenta la distancia al área fuente, principalmente entre las muestras M78 (más cercana al área fuente), M80, M82 y M83 (más lejana al área fuente). La muestra M38 se observa fuera de esta tendencia. En el caso de los granos de Rglc, no se observa una tendencia. Los granos de Rmsf presentan una tendencia al aumento entre las muestras M80 (más cercana al área fuente), M82, M83 y M38 (más lejana al área fuente). Aunque el contenido de granos poliminerálicos foliados en las muestras de arena del Río Cusiana es muy bajo.

En el Río Ariporo la producción inferida de fragmentos de roca es del 25,6%, y disminuye en un 12,6% durante el recorrido que tiene el río desde el piedemonte hasta la confluencia con el Río Casanare (aproximadamente 220 kilómetros medidos en línea recta). El pH del agua es principalmente ácido (promedio de 5). En este afluente se tomaron 8 muestras de arena, de las cuales fueron elegidas 6 para petrografía. Estas muestras son composicionalmente inmaduras, y según su composición media se clasifican como sublitoarenitas (**Qt_{82,14}F_{0,46}R_{17,40}**, figura 42). El contenido de Qp y R es el más bajo en comparación con los otros tres

afluentes estudiados, pero posee el mayor contenido de Qm, el cual se incrementa a medida que aumenta la distancia al área fuente (valores medios de **Qm70,8Qp11,3R17,9**; figura 43). El valor de Qm en la muestra más cercana al área fuente es de 60,9% y en la muestra más distal de 77,26%. Los fragmentos de roca en las muestras de arena son principalmente sedimentarias, el contenido de fragmentos metamórficos es el más bajo y no posee fragmentos plutónicos (valores medios de **Rs97,4Rms2,6Rp0,0**; figura 44). Las muestras de arena del Río Ariporo no muestran una tendencia marcada a disminuir o aumentar en el contenido de fragmentos de roca a medida que aumenta la distancia al área fuente. El contenido de feldespatos no representa más del 0,5% de la composición de las muestras.

Figura 42. Composición de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente sedimentaria. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores de las muestras individuales, a la derecha los valores medios. Las muestras M78y M85 son las más cercanas al área fuente, las muestras M38 y M11 las más distales.

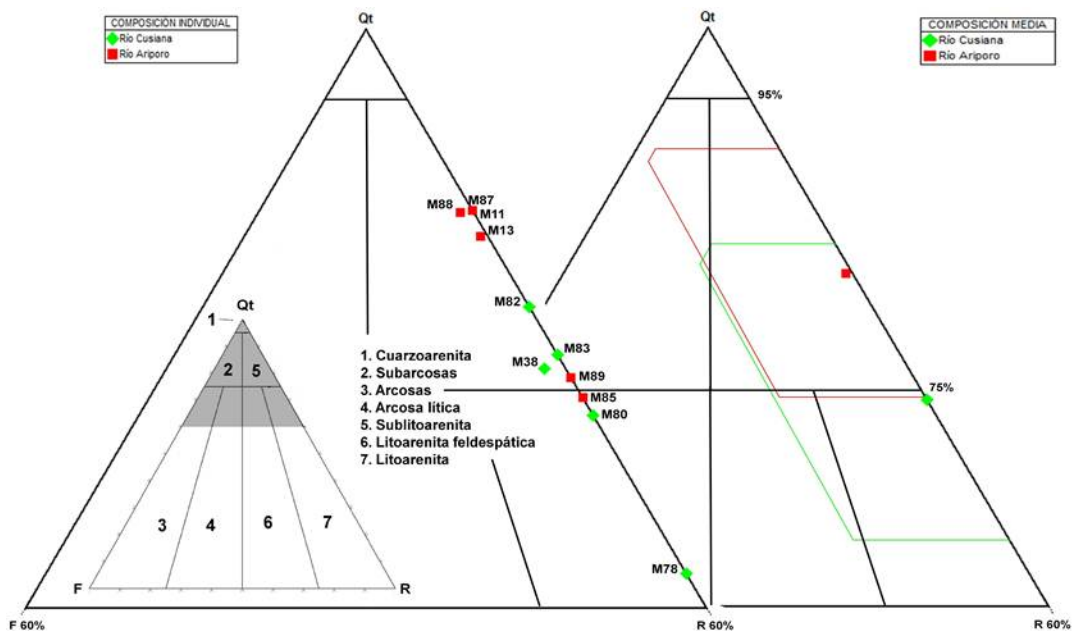
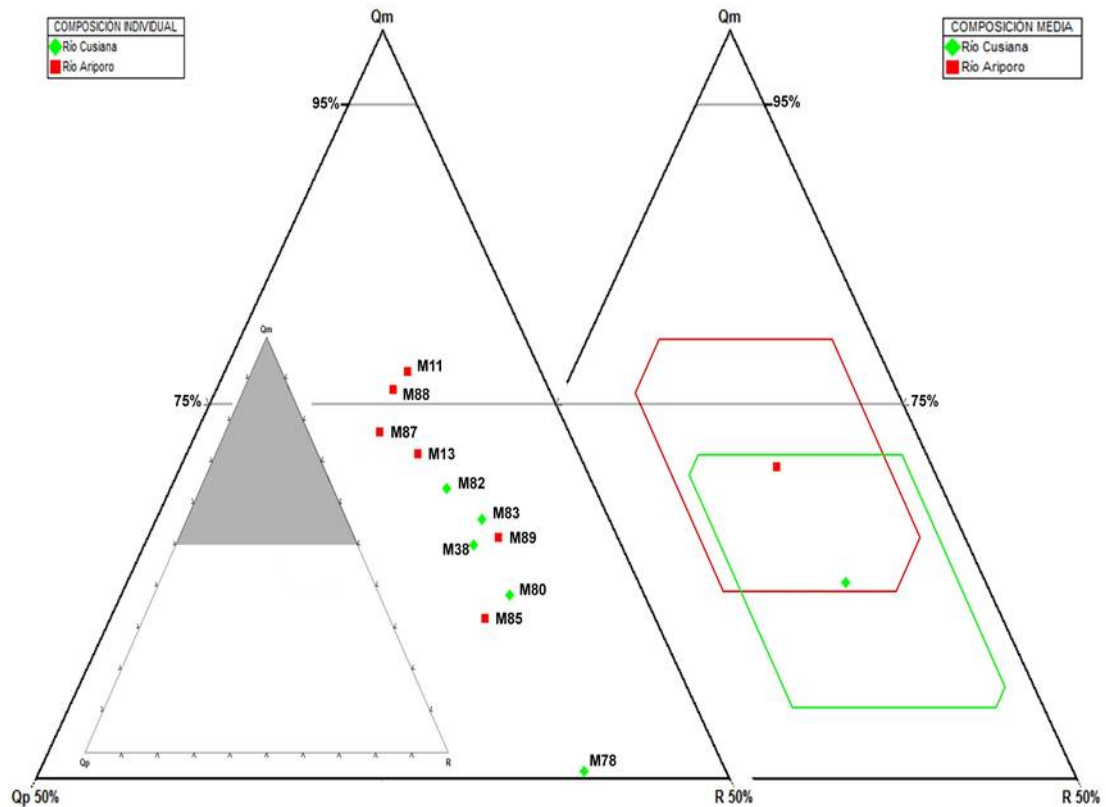


Figura 43. Composición de las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente sedimentaria. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores de las muestras individuales, a la derecha los valores medios. Las muestras M78 y M85 son las más cercanas al área fuente, las muestras M38 y M11 las más distales.



Para el Río Aripuro la tendencia en el contenido de granos de Qp y Rglc es a disminuir, aunque las muestras M87 y M13 se encuentran fuera de la tendencia (la muestra 85 es la más cercana al área fuente y la M11 es la más distal). El comportamiento en los granos poliminerálicos es irregular (figura 45).

Figura 44. Composición de los granos poliminerálicos en las muestras de arena tomadas en las regiones con área fuente sedimentaria. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores medios de las muestras, a la derecha los valores individuales. Las muestras M78y M85 son las más cercanas al área fuente, las muestras M38 y M11 las más distales.

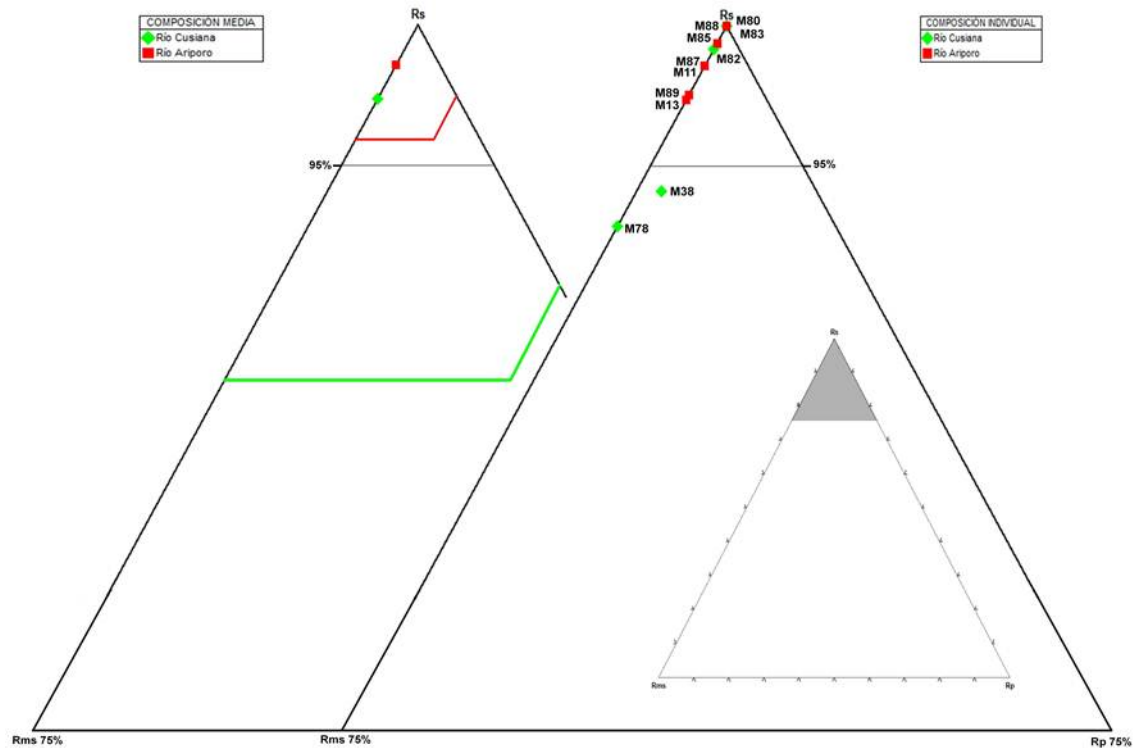
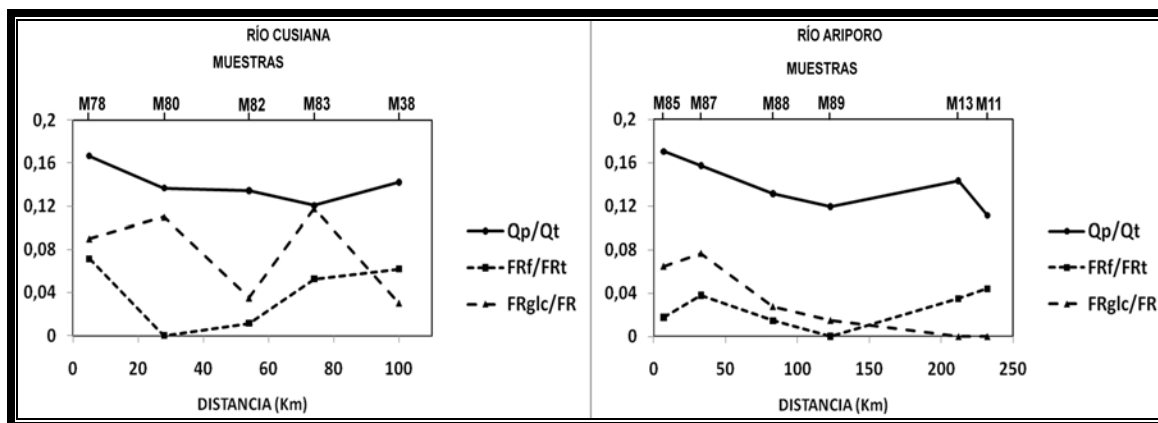


Figura 45. Variación en la relación de cuarzo policristalino (Q_p) y cuarzo total (Q_t), fragmentos de roca foliada (R_{msf}) y fragmentos de roca total (R_t), y fragmentos de roca con glauconita (R_{glc}) y fragmentos de roca (R), para los Ríos Cusiana y Ariporo. Las muestras de la izquierda son las más cercanas al área fuente y las de la derecha son las más distales.

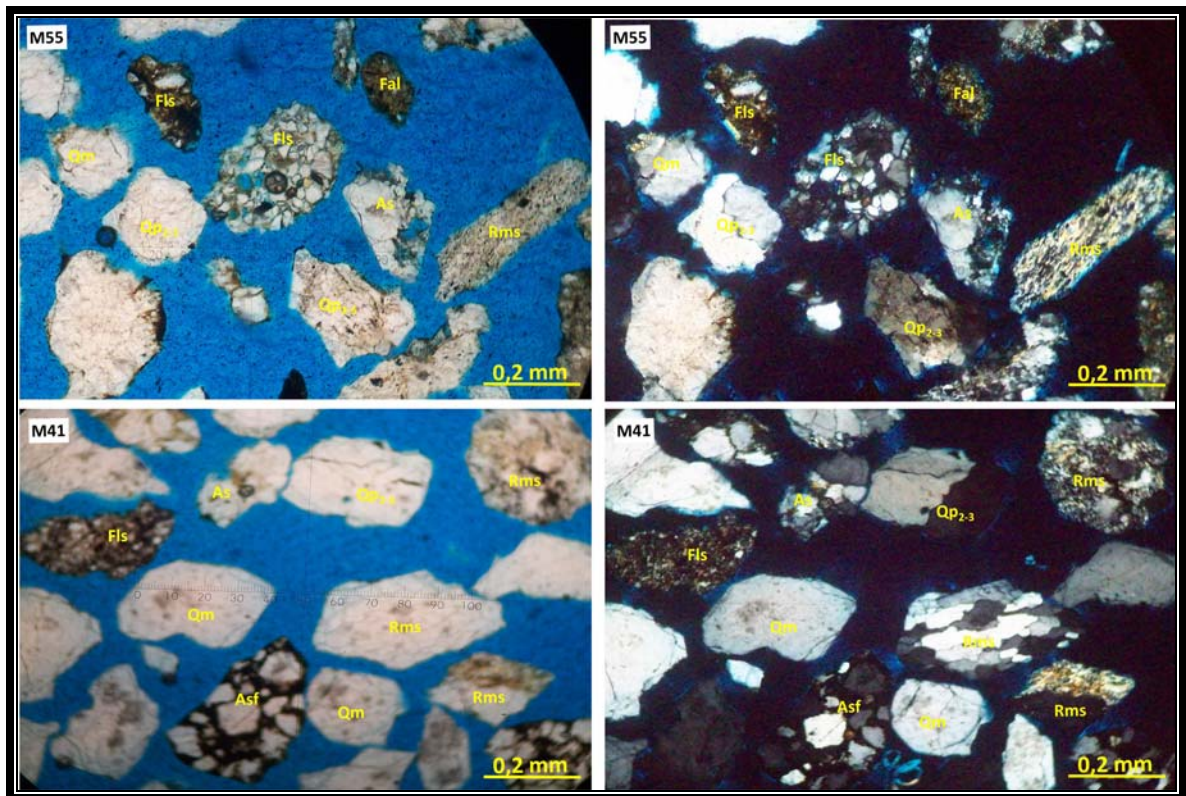


6.4.4 Composición de las Muestras Tomadas en el Cauce Principal del Río Meta. Los resultados composicionales en el cauce principal del Río Meta, se presentan tomando en cuenta la división por segmentos del mismo. Cabe destacar que en los tres segmentos la composición de las muestras de arena se agrupan en dos poblaciones, principalmente entre las sublitoarenitas y litoarenitas. Las sublitoarenitas están en los sectores más alejados de la cuenca y las litoarenitas en los sectores con menor distancia de transporte.

Los diferentes tipos de granos que se observan en las muestras de arena colectadas en el primer segmento del Río Meta se presentan en la figura 46. Estas muestras contienen fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias, estas últimas se caracterizan por presentar granos de cuarzo de varios ciclos de sedimentación (figuras 21 y 46; tablas 7, 8 y 11). Los granos tienen formas subangulares a subredondeadas.

La composición de los granos poliminerálicos es preferencialmente de rocas metamórficas y metasedimentaria, principalmente esquistos, filitas, metareniscas y metalimolitas; y sedimentarias, principalmente arcillolitas, limolitas cuarzosas y feldespáticas con glauconita, y areniscas cuarzosas. En el primer segmento del Río Meta la glauconita se observa con baja meteorización en los primeros 76 kilómetros de transporte aproximadamente, medidos desde Municipio de San Carlos de Guaroa. Superando esta distancia se observa meteorizada y de forma residual (figura 47). La porosidad presente en los fragmentos de roca sedimentaria, puede ser producto de la remoción de los granos de glauconita y/o de los granos de feldespato meteorizados. La composición de las muestras de arena, depende principalmente del contenido de granos cuarzo y fragmentos de roca, tomando en cuenta que el contenido de feldespato en las muestras de arena es muy escaso (media del 0,05%).

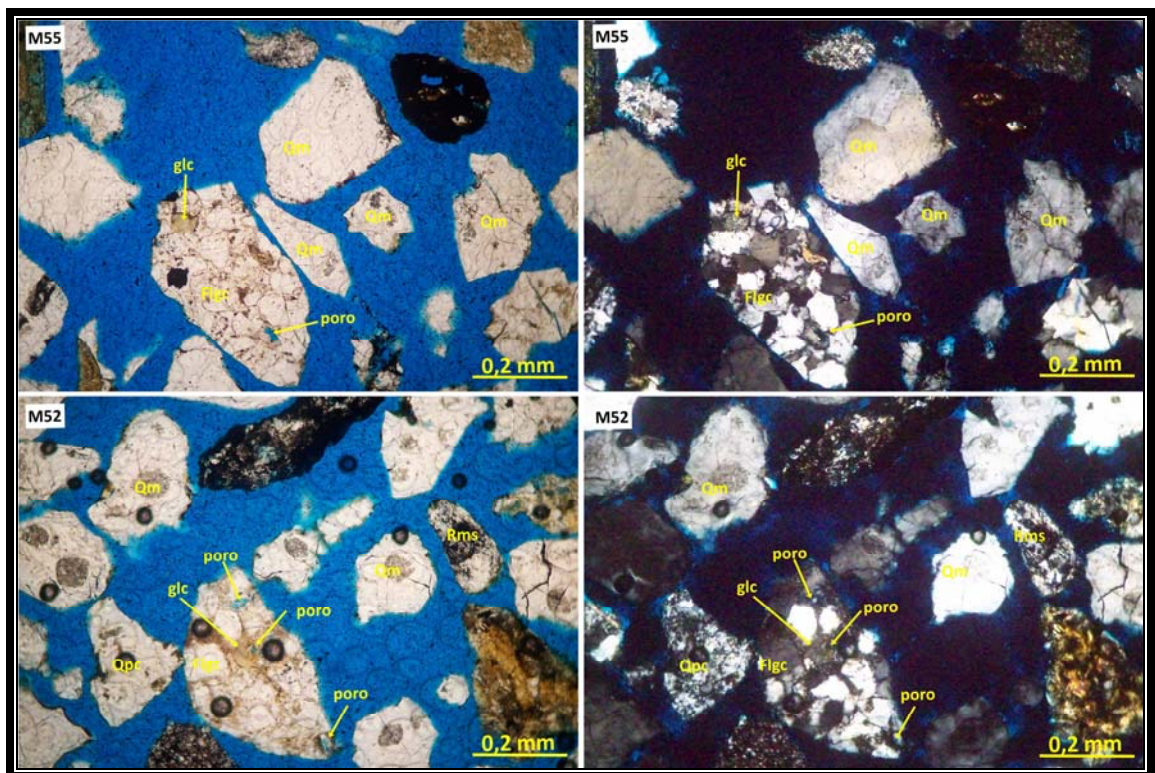
Figura 46. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria, metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Metica (primer segmento del Río Meta). Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Las muestras M55 es la más cercana al área fuente (confluencia del Río Guayuriba con el Río Metica) y la muestra M41 la más distal (confluencia del Río Metica con el Río Manacacias). Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



De las muestras de arena colectadas en barras puntuales a lo largo del Río Metica, donde el pH del agua es principalmente ácido (promedio de 5,29), se eligieron 7 muestras para petrografía, las cuales son composicionalmente inmaduras. Estas muestras de arena son de composición litoarenita principalmente

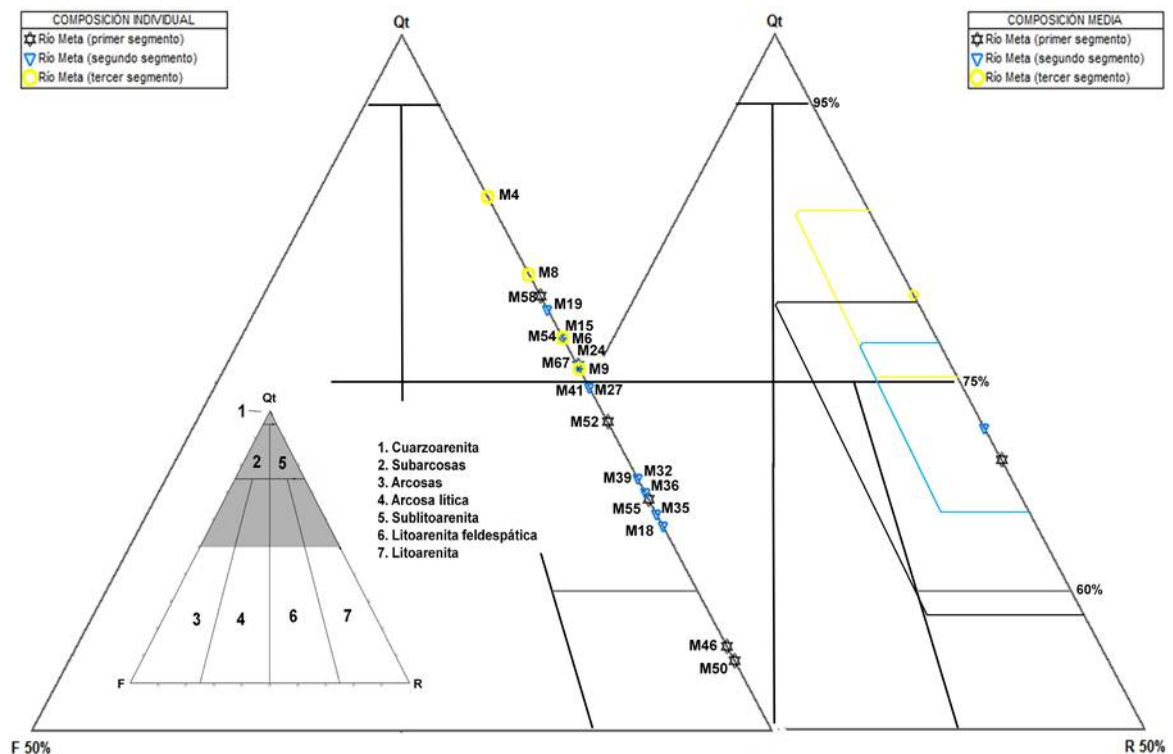
(composición media de **Qt_{69,46}F_{0,05}R_{30,49}**; figura 48). En este segmento se encuentra el contenido más abundante en granos de Qp y chert (composición media de **Qm_{57,26}Qp_{12,23}R_{30,50}**; figura 49). En estas muestras se observa una tendencia a disminuir en el contenido de granos de Qm a medida que aumenta la distancia de transporte y disminuye la pluviosidad (figura 49). Los fragmentos de roca son principalmente metamórficos y metasedimentarios, los cuales reflejan la composición en el área fuente (composición media de **Rs_{43,62}Rms_{56,38}Rp_{0,0}**; figura 50). En este segmento no se encontraron granos de fragmentos plutónicos.

Figura 47. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando algunos fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en el Río Metica. La muestra M55 es la más cercana al nacimiento y la M52 es la más distal. Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



En el primer segmento, con los resultados modales de la petrografía en las muestras de arena, se calculó un aumento aproximado del 19,69% en granos poliminerálicos, para aproximadamente 200 Km de transporte, medidos desde el Municipio de San Carlos de Guaroa (en línea recta), hasta la confluencia entre los río Metica y Manacacias.

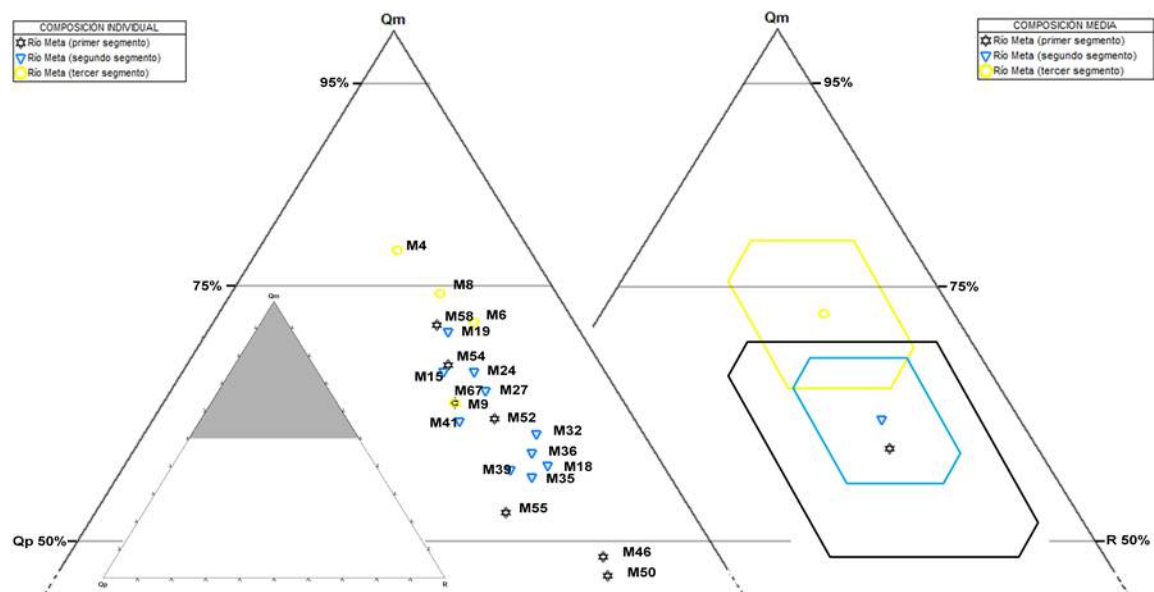
Figura 48. Composición de las muestras de arena tomadas en el cauce principal del Río Meta. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores de las muestras individuales, a la derecha los valores medios.



La figura 51 muestra como en el primer segmento del Río Meta, el contenido de granos de Qp en las muestras de arena no presentan ninguna tendencia. En el caso de los granos de Rmsf y Rglc, se observa una tendencia hacia la disminución

con el aumento en la distancia de transporte. Las muestras M55 y M52 están fuera de la tendencia para los granos de Rmsf. En el caso de los granos de Rglc, las muestras M52 y M46 son las que no siguen la tendencia.

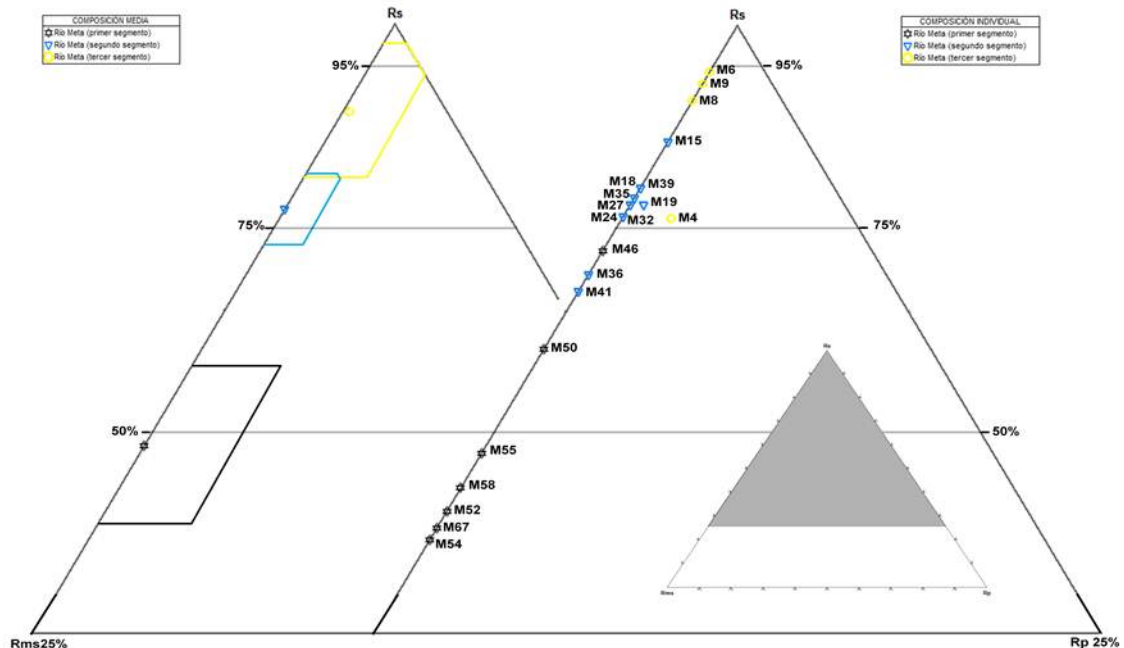
Figura 49. Madurez composicional de las muestras de arena tomadas en el cauce principal del Río Meta. La región superior ha sido exagerada. En la izquierda los valores individuales de las muestras, a la derecha los valores medios.



En el segundo segmento del Río Meta se reconocieron granos procedentes de áreas metamórficas y sedimentarias (figura 52). La composición de los granos poliminerálicos es preferencialmente de esquistos, filitas, metareniscas y metalimolitas; y sedimentarias, principalmente arcillolitas, limolitas cuarzosas y feldespáticas con glauconita, y areniscas cuarzosas. Los granos tienen forma subangular a redondeada. En el segundo segmento del Río Meta la glauconita se observa con moderado nivel de meteorización en 200 kilómetros de transporte aproximadamente, medidos desde la confluencia de los ríos Metica y Manacacias.

Superando esta distancia se observa muy meteorizada y su reconocimiento es difícil (figura 53). La porosidad que presentan algunos granos de fragmentos sedimentarios pudo generarse por la remoción de glauconita y/o feldespato. La composición en este segmento, depende principalmente del contenido de granos cuarzo y fragmentos de roca, tomando en cuenta que el contenido de feldespato en las muestras de arena es muy escaso (media del 0,1%). Además, el cambio composicional se produce a medida que aumenta la distancia de transporte y cambia el régimen de precipitación.

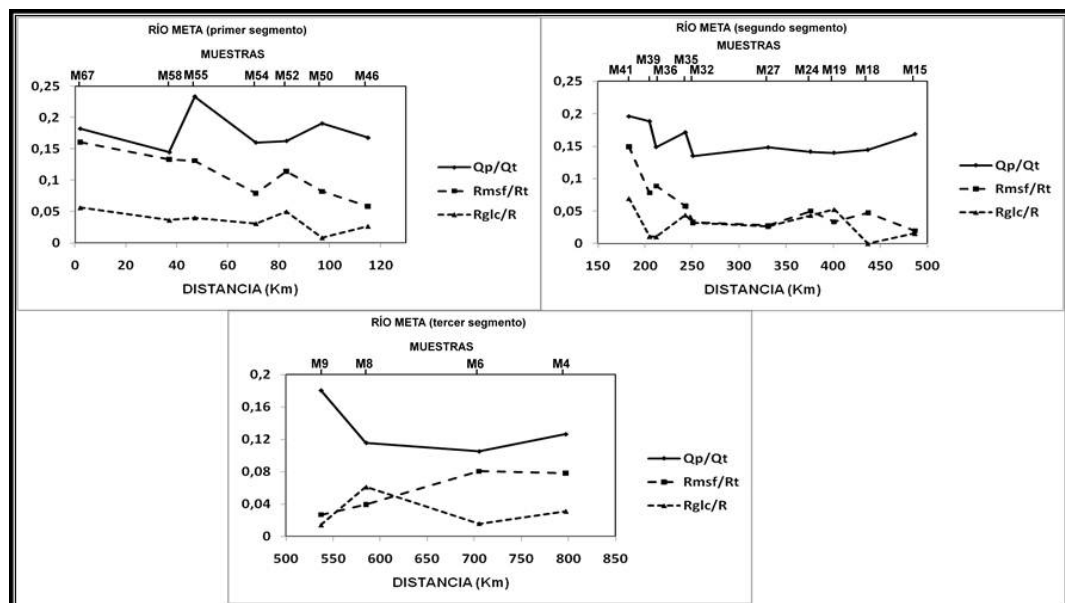
Figura 50. Composición de los granos poliminerálicos en las muestras de arena tomadas en el cauce principal del Río Meta. La región superior ha sido exagerada; a la izquierda los valores medios de las muestras, a la derecha los valores individuales.



En el segundo segmento del Río Meta donde el pH del agua es principalmente ácido (promedio de 5,3), se tomaron 15 muestras de arena, de las cuélgas se

eligieron 10 para petrografía. Composicionalmente son muestras inmaduras, principalmente litoarenitas (composición media de **Qt_{71,78}Fo₁₀R_{28,11}**; figura 48). En este segmento el contenido de granos de Qp y chert disminuye ligeramente con respecto al primer segmento (composición media de **Qm_{60,46}Qp_{11,35}R_{28,19}**; figura 49). En estas muestras se observa un incremento en el contenido de granos de Qm a medida que aumenta la distancia de transporte (figura 50). Los fragmentos de roca son metamórficos y en mayor contenido sedimentarios (composición media de **Rs_{74,74}Rms_{25,08}Rp_{0,17}**; figura 51). En este segmento los granos de fragmentos plutónicos son muy escasos.

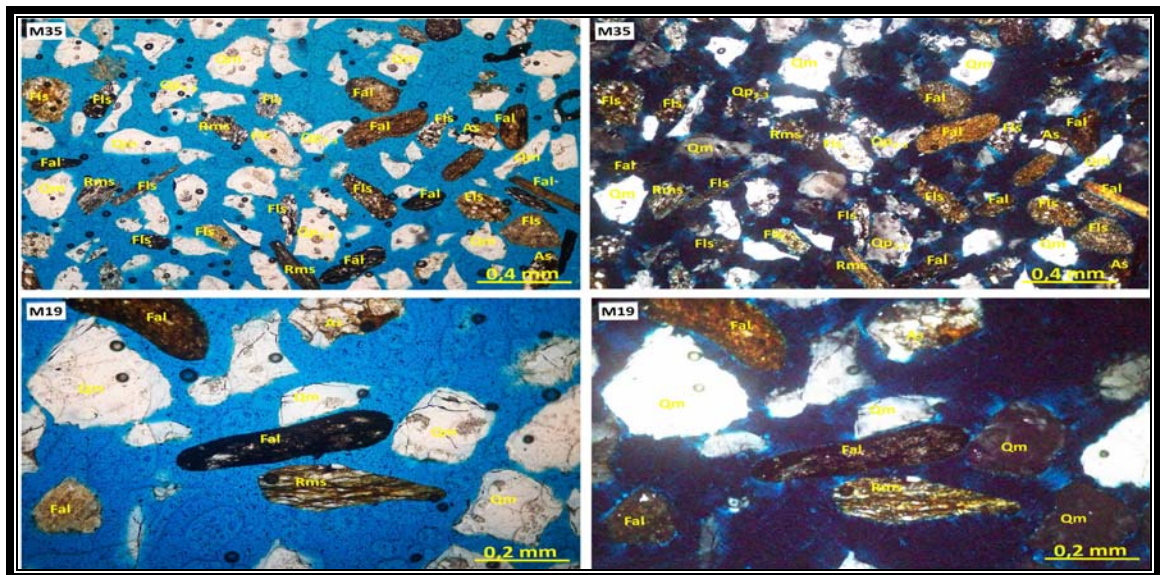
Figura 51. Variación en la relación de cuarzo policristalino (Qp) y cuarzo total (Qt), fragmentos de roca foliada (Rmsf) y fragmentos de roca total (Rt), y fragmentos de roca con glauconita (Rglc) y fragmentos de roca (R), para los tres segmentos del Río Meta. Las muestras de la izquierda son las más cercanas al sector del nacimiento del río y a la derecha las más distales.



Con base en los resultados modales de la petrografía en las muestras de arena del segundo segmento del Río meta, se calculó una reducción aproximada del

3,55% para los fragmentos de roca, en aproximadamente 310 Km de transporte, medidos desde la confluencia de los río Metica y Manacacias (en línea recta), hasta la confluencia entre los ríos Meta y Casanare. La reducción acumulada entre el primer y segundo segmentos es de 2,36%.

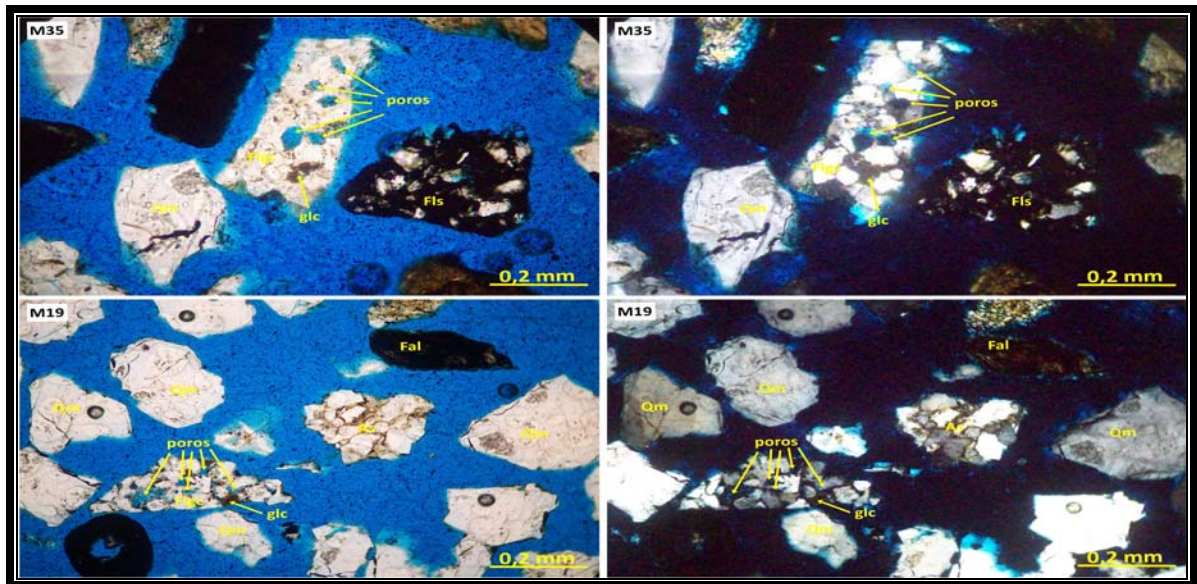
Figura 52. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria, metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (segundo segmento). Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Las muestras M35 es la más cercana a la confluencia del Río Metica con el Río Manacacias y la muestra M19 la más cercana a la confluencia del Río Casanare con el Río Meta. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



En el segundo segmento no se observan tendencias marcadas en el contenido de granos de Qp, Rmsf y Rglc, aunque se observa por intervalos un comportamiento lineal sin presentar disminución o aumento constante a medida que aumenta la

distancia de transporte y el régimen de precipitación, principalmente entre las muestras M32, M27, M24 y M19. El comportamiento de los granos de Rmsf y Rglc es similar entre las muestras M32, M27 y M24 (figura 51).

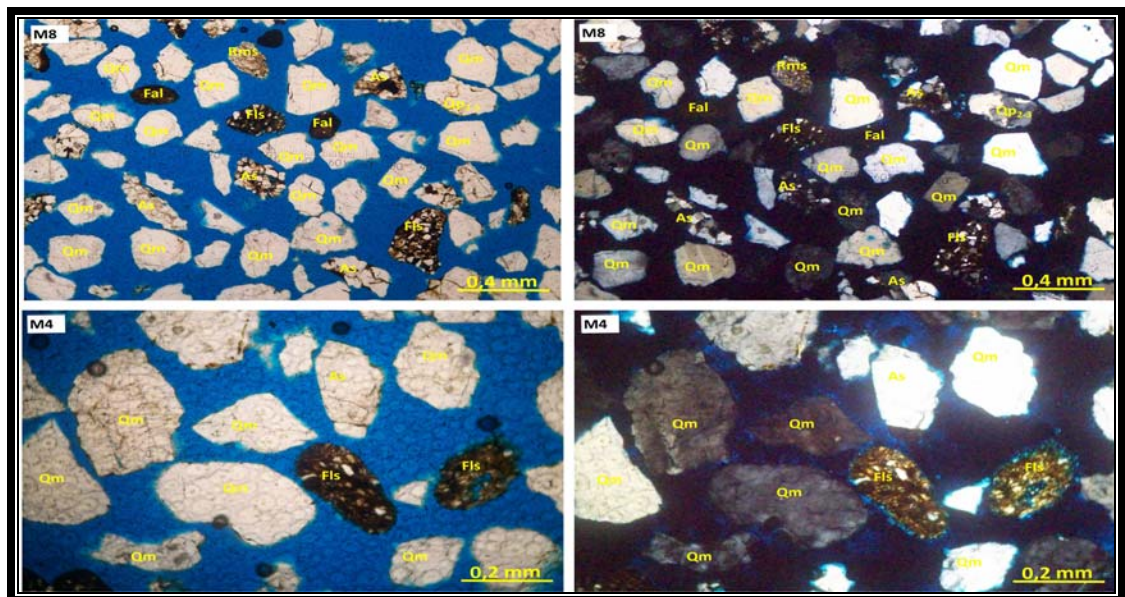
Figura 53. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (segundo segmento). Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Las muestras M35 es la más cercana al área fuente y la muestra M19 la más distal. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



En el tercer segmento del Río Meta se reconocieron principalmente fragmentos de rocas sedimentarias (figura 54). La composición de los fragmentos de roca es preferencialmente arcillolitas, limolitas cuarzosas y feldespáticas con glauconita muy meteorizada, y areniscas cuarzosas. La matriz en algunos fragmentos sedimentarios finos ha sufrido reemplazamiento por óxidos de hierro, como hematita o limonita. Los granos tienen forma subangular a redondeada. La

glauconita es ausente o se observa en un estado de meteorización muy avanzado (figura 55). La porosidad presente en algunos granos de fragmentos sedimentarios pudo generarse por la remoción de glauconita y/o feldespato. La composición en el tercer segmento, depende principalmente del contenido de granos cuarzo y fragmentos de roca, tomando en cuenta que el contenido de feldespato en las muestras de arena es muy escaso, pero es el más alto en comparación con los dos primeros segmentos (media del 0,17%). El cambio composicional se observa a medida que aumenta la distancia de transporte.

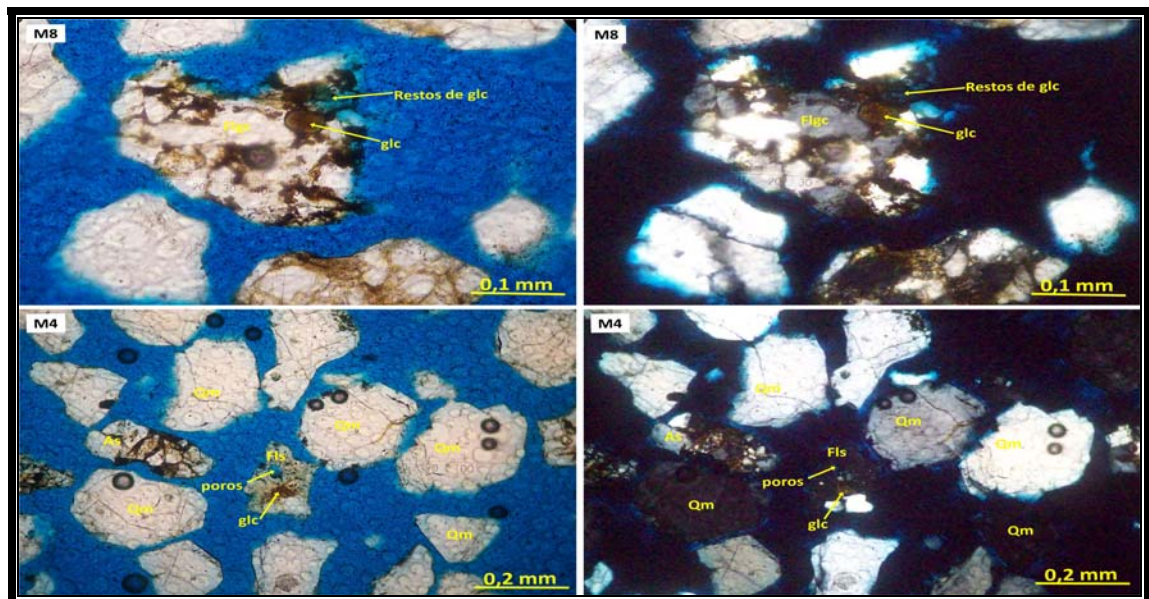
Figura 54. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria, metamórfica y metasedimentaria en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (tercer sector). Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Las muestras M8 es la más cercana a la confluencia del Río Meta con el Río Casanare y la muestra M4 la más cercana a la confluencia del Río Meta con el Río Orinoco). Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



En este sector del Río Meta donde el pH del agua es principalmente ácido (promedio de 5,3), se tomaron 15 muestras de arena, de las cuales se eligieron

10 para petrografía. Composicionalmente son muestras submaduras, principalmente sublitoarenitas (composición media de **Qt**81,19**F**0,17**R**18,64; figura 48). Este segmento tiene el contenido más bajo de granos de Qp y chert (composición media de **Qm**70,64**Qp**10,68**R**18,67; figura 49). Estas muestras tienen el mayor contenido de granos de Qm en comparación con los dos primeros segmentos. Los fragmentos de roca son principalmente sedimentarios (composición media de **Rs**87,13**Rms**21,4**Rp**0,1,47; figura 50). En este segmento se observa el mayor contenido de fragmentos plutónicos.

Figura 55. Fotografías bajo microscopio de luz transmitida, mostrando las diferentes categorías de granos de cuarzo y fragmentos de roca sedimentaria con glauconita en algunas muestras tomadas en el cauce del Río Meta (tercer sector). Imagen de la izquierda en nicoles paralelos y nicoles cruzados a la derecha. Las muestras M8 es la más cercana al área fuente y la muestra M4 la más distal. Convenciones utilizadas en las tablas 7 y 11.



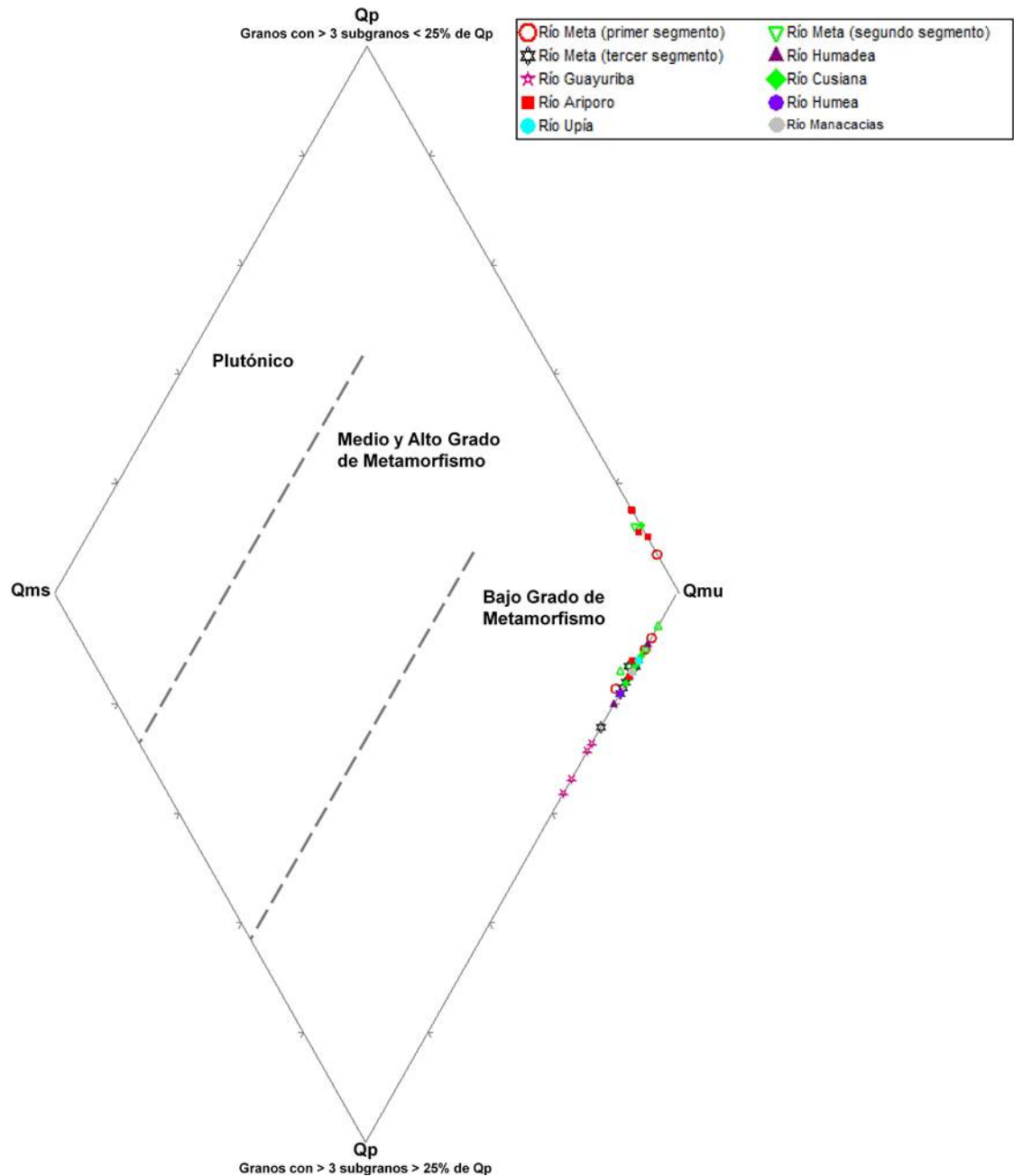
La reducción en el contenido de fragmentos de roca en el tercer segmento es aproximadamente del 11,9%, para aproximadamente 270 Km de transporte,

medidos desde la confluencia de los ríos Metica y Manacacias (en línea recta), hasta la confluencia entre los ríos Meta y Orinoco. La reducción acumulada entre el segundo y tercer segmentos es del 13,33%. Finalmente, la reducción acumulada entre el primer y tercer segmento es del 12,14%.

En la figura 51 no se observa una tendencia lineal marcada en la variación del contenido de granos de Qp, Rmsf y Rglc. Aunque, para los granos de Qp, hay una disminución entre las muestras M9, M8 y M6 a medida que aumenta la distancia de transporte. La muestra M4 está fuera de esta tendencia. Los granos de Rmsf presentan una tendencia al aumento con el aumento del transporte, aunque esto no es lineal. El contenido de granos de Rglc no muestra ningún tipo de tendencia, su comportamiento es errático.

Utilizando los resultados modales obtenidos en la petrografía realizada al total de las muestras, se construyó un diagrama de procedencia de cuarzos (figura 56). En este diagrama las muestras de los ríos Humadea y Guayuriba se ubican en la región de rocas de bajo grado de metamorfismo, mientras las demás son ricas en cuarzo monocristalino con extinción ondulante. Lo anterior indica que el origen de los cuarzos es principalmente de regiones fuente con rocas metamórficas de bajo grado. Además, el diagrama permite determinar la procedencia de granos de cuarzo que han sido re TRABAJADOS de antiguos aluviones (caso de la muestra de arena del Río Manacacias).

Figura 56. Diagrama propuesto por Basu y otros (1975), donde se muestra la procedencia de los diferentes granos de cuarzo en las muestras de arena de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta.



La variación composicional (QtFR) en la Cuenca Hidrográfica del Río Meta, utilizando los resultados modales de las 44 muestras de arena, indica que el rango de distancia en la variación de composición de litoarenita a sublitoarenita sucede entre los 20 y 120 Km (Figura 57). Esta figura se construyó tomando en cuenta la distancia horizontal desde el frente montañoso hasta la confluencia del Río Meta con el Río Orinoco. El valor de las líneas de distancia aumenta a medida que se aleja del frente montañoso (ver metodología).

La cantidad de fragmentos de roca disminuyen a medida que aumenta la distancia de transporte y cambia el régimen de pluviosidad en la cuenca (Figura 57), pero no es una disminución lineal o que siga un patrón predeterminado. En el Río Ariporo, por ejemplo, la muestra M85 comienza con 73% de Qt, pasa en 20 Km al 87%, se mantiene en 86% por 40 Km, y disminuye a 74% en los siguientes 40 Km, como resultado de la influencia de otros tributarios que confluyen en ese sector y aportan granos de fragmentos de roca al río (anexo B).

Siguiendo el cauce de los ríos Guayuriba y Meta (primer segmento), la composición de litoarenitas se mantiene en los primeros 250 Km. En este trayecto, el régimen de pluviosidad disminuye de 3000 mm a 1000 mm al año. Sin embargo, en el Río Humadea donde la pluviosidad es alta, la composición de litoarenitas se mantiene sólo en los primeros 40 Km.

La presencia de glauconita es utilizada como otro indicador de la variación de la madurez composicional de las arenas fluviales (Figura 58). El estado inalterado de este mineral se observa a menos de 20 Km del frente de la cordillera; a partir de esta distancia, el estado de meteorización es avanzado, y a partir de los 140 Km su presencia es nula.

Figura 57. Mapa composicional (QtFR) para los 4 afluentes y el cauce principal del Río Meta.

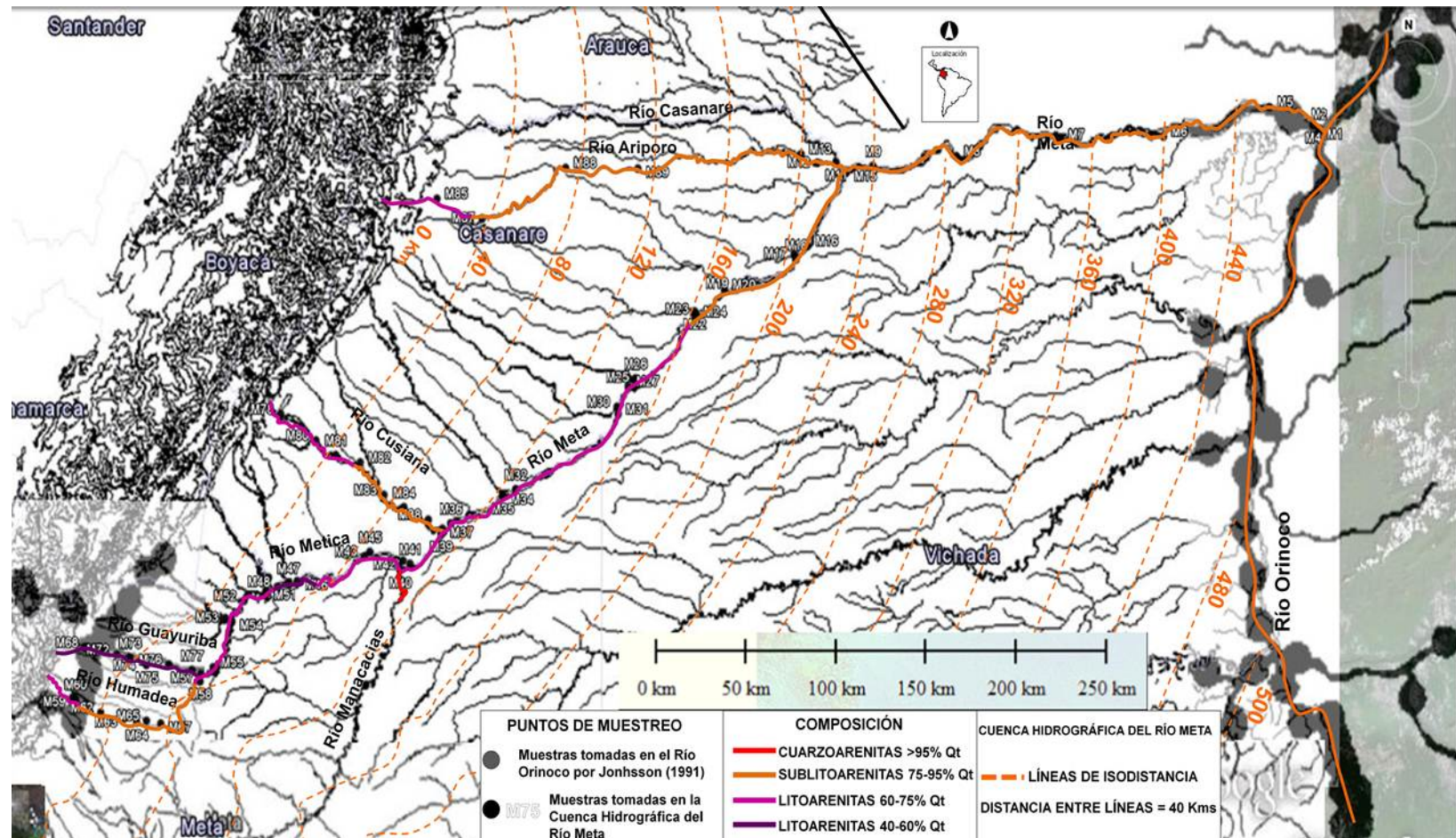
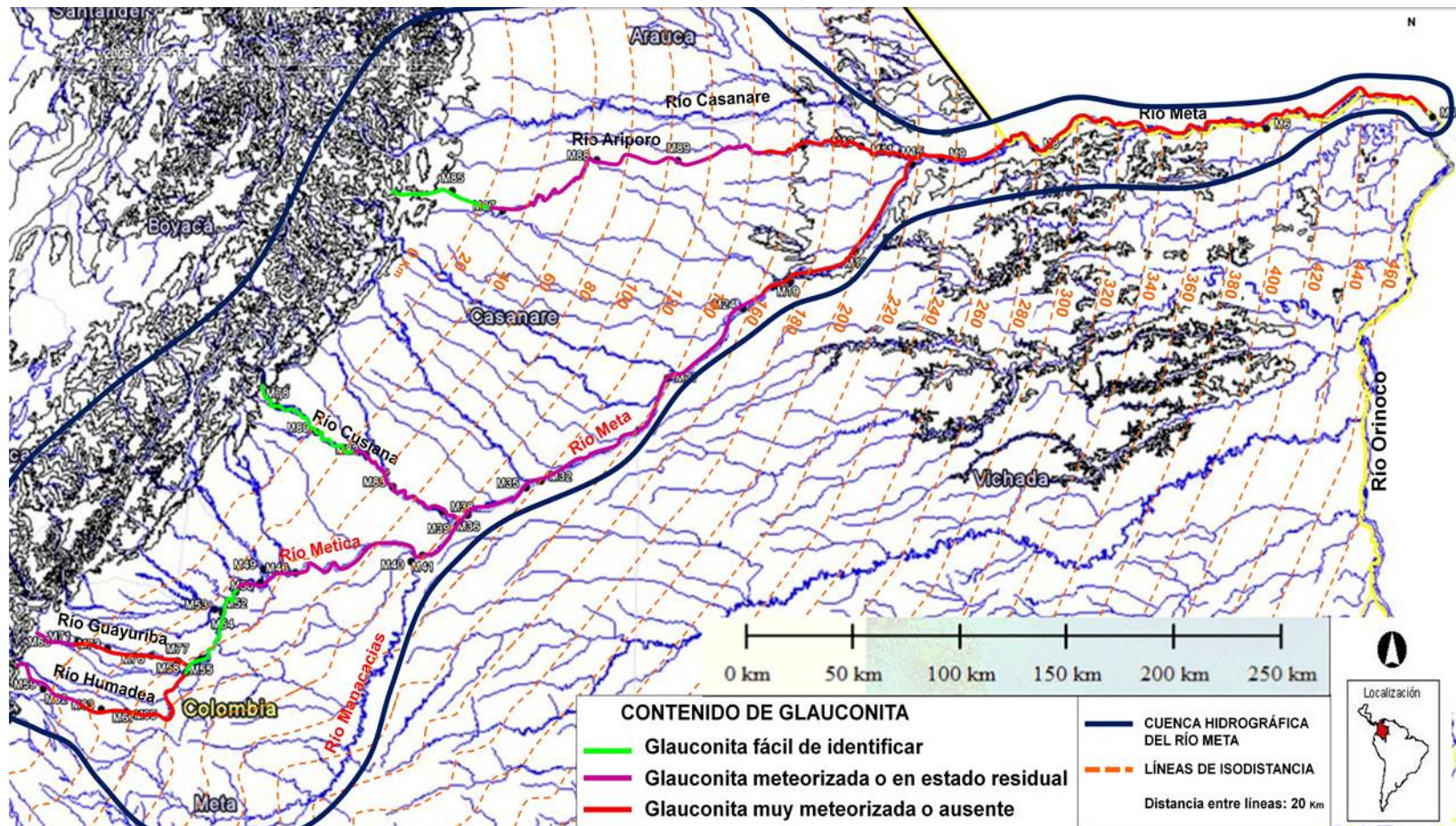


Figura 58. Mapa donde se marca la presencia de la glauconita por sectores.



6.5 RESULTADOS DE LAS IMÁGENES TOMADAS EN GRANOS DE CUARZO CON EL MICROSCOPIO DE ESCANEEO ELECTRÓNICO (SEM)

Los granos de cuarzo en las muestras seleccionadas muestran principalmente superficies de disolución y abrasión, generadas durante los eventos de sedimentación y transporte.

Los resultados de las imágenes SEM, son presentadas por cuencas y por segmentos (en el caso del Río Meta).

6.5.1 Resultados del Análisis SEM en las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Metamórfica y Metasedimentaria.

Para el Río Humadea, donde la composición es sublitoarenita en todo su trayecto, los granos de cuarzo seleccionados son subangulares a angulares. Los cuarzos presentan superficies abrasivas generadas durante el transporte (como las reportadas Welton (1984)), como en la muestra M67 (figura 59).

La forma de los granos de cuarzo seleccionados de las muestras tomadas en el Río Guayuriba son angulares a redondeados, presentado superficies de disolución y sobrecrecimientos (Figura 60). Los granos de cuarzo corresponden a granos de cuarzo con evidencias de desprendimiento de escamas generadas por disolución, similar a lo reportado por Johnsson et al., (1991) para el Río Orinoco.

Figura 59. Imágenes tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras tomadas en el Río Humadea. Las muestras se ordenan de arriba abajo, de la más próxima a la más lejana al área fuente. A, C y E: Cuarzo subangular a angular, de primer ciclo. B, D y F: Detalle de la parte del grano indicada en (A, C y E).

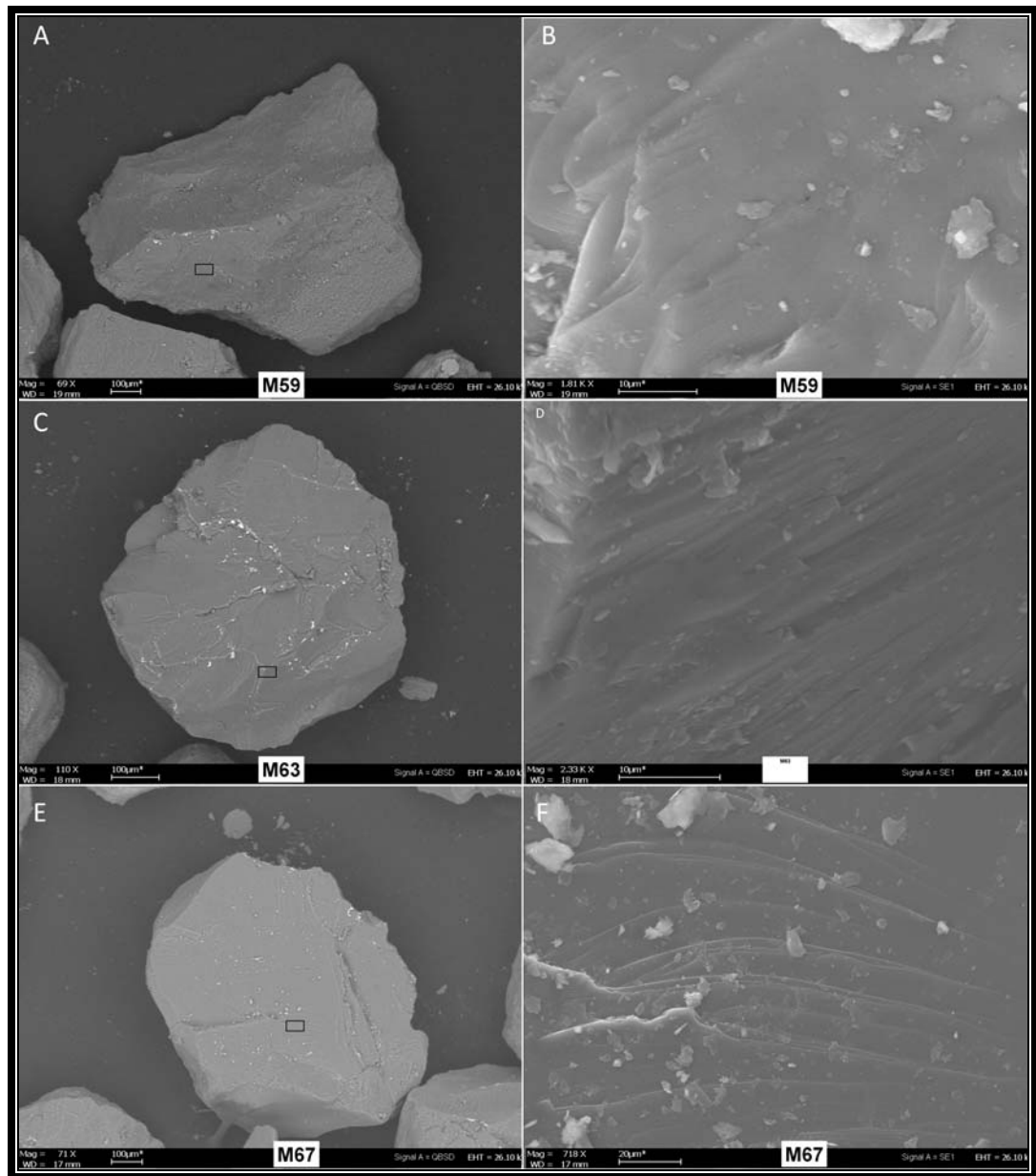
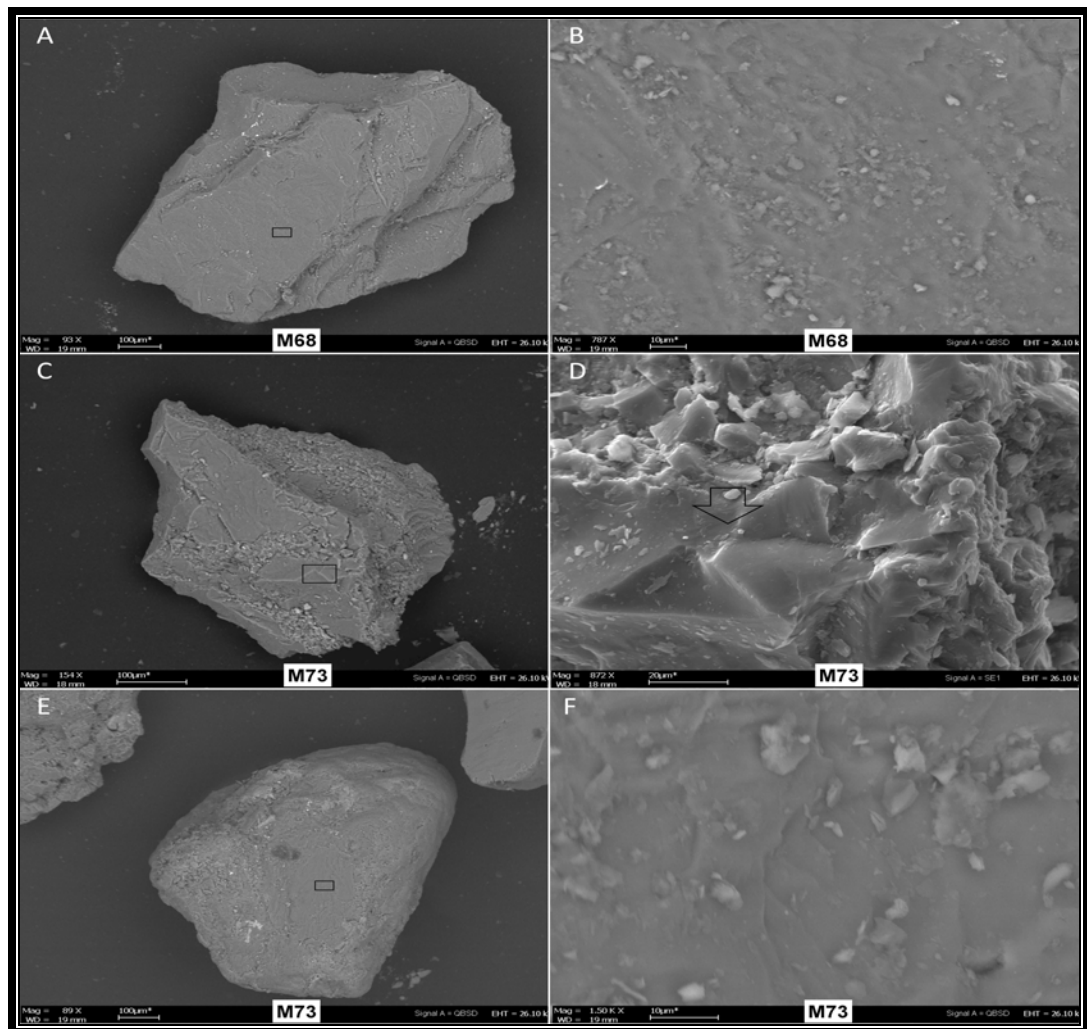


Figura 60. Imágenes tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas algunos granos de cuarzo en las muestras tomadas en el Río Guayuriba. Las muestras se ordenan de arriba abajo de la más próxima a la más lejana al área fuente. A: Cuarzo subangular con evidencia de fracturación mecánica. C: Cuarzo angular con sobrecrecimientos. E: Cuarzo redondeado. B, D y F: Detalle de la parte del grano indicada en A, C y E. Estos granos de cuarzo muestran: evidencias de disolución (B), sobrecrecimiento (flecha en D) y disolución fósil (F) probablemente como resultado de un ciclo de meteorización temprano o disolución durante procesos diagenéticos (Johnsson et al., 1991; Welton, 1984).



6.5.2 Resultados del Análisis SEM en las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Sedimentaria. La forma de los granos de cuarzo seleccionados de las muestras tomadas en el Río Cusiana son angulares a subredondeados, presentando superficies de disolución y sobrecrecimientos (figura 61). Estos granos de cuarzos presentan evidencias de desprendimiento de escamas generadas por disolución y sobrecrecimiento, como lo reporta Johnsson et al., (1991) para el Río Orinoco.

La forma de los granos de cuarzo seleccionados de las muestras de arena tomadas en el Río Aripuro son angulares a bien redondeados, presentando superficies con disolución (figura 62). Los granos de cuarzo presentan fractura concoide y evidencias de desprendimiento de escamas generadas por disolución, como lo reporta Johnsson et al., (1991) en el Río Orinoco.

Figura 61. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el Río Cusiana. Las muestras se ordenan de arriba abajo de la más próxima a la más lejana al área fuente. A: Fragmento de cuarzo policristalino muy angular con sobrecrecimientos. C: Cuarzo subangular a subredondeado. E: Cuarzo subredondeado. B, D y F: Detalle de la parte del grano indicada en A, C y E, mostrando: sobrecrecimiento (flechas en D), evidencias de disolución fósil (B) como resultado de un ciclo de meteorización temprano o disolución durante procesos diagenéticos y escamas por disolución (F) (Johnsson et al., 1991; Welton, 1984).

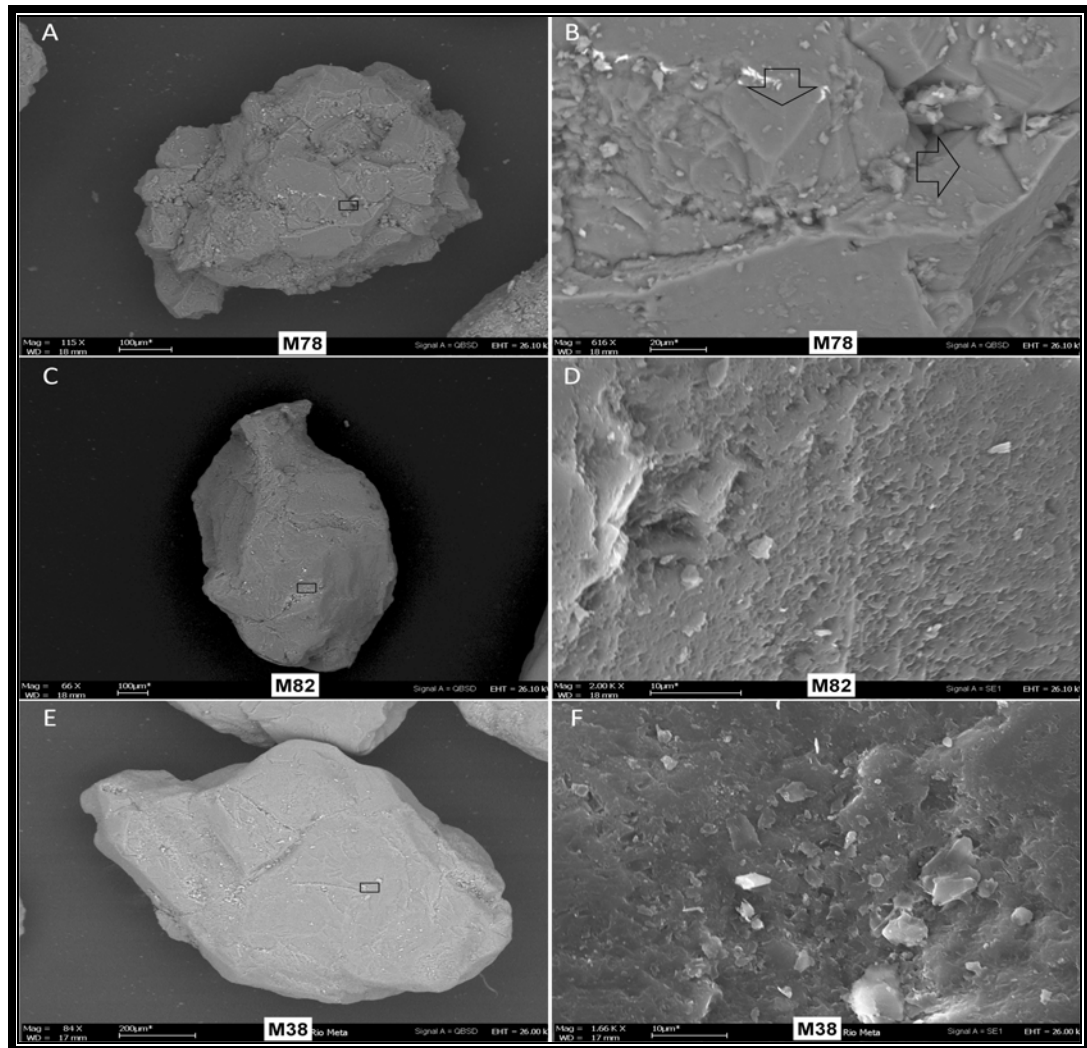
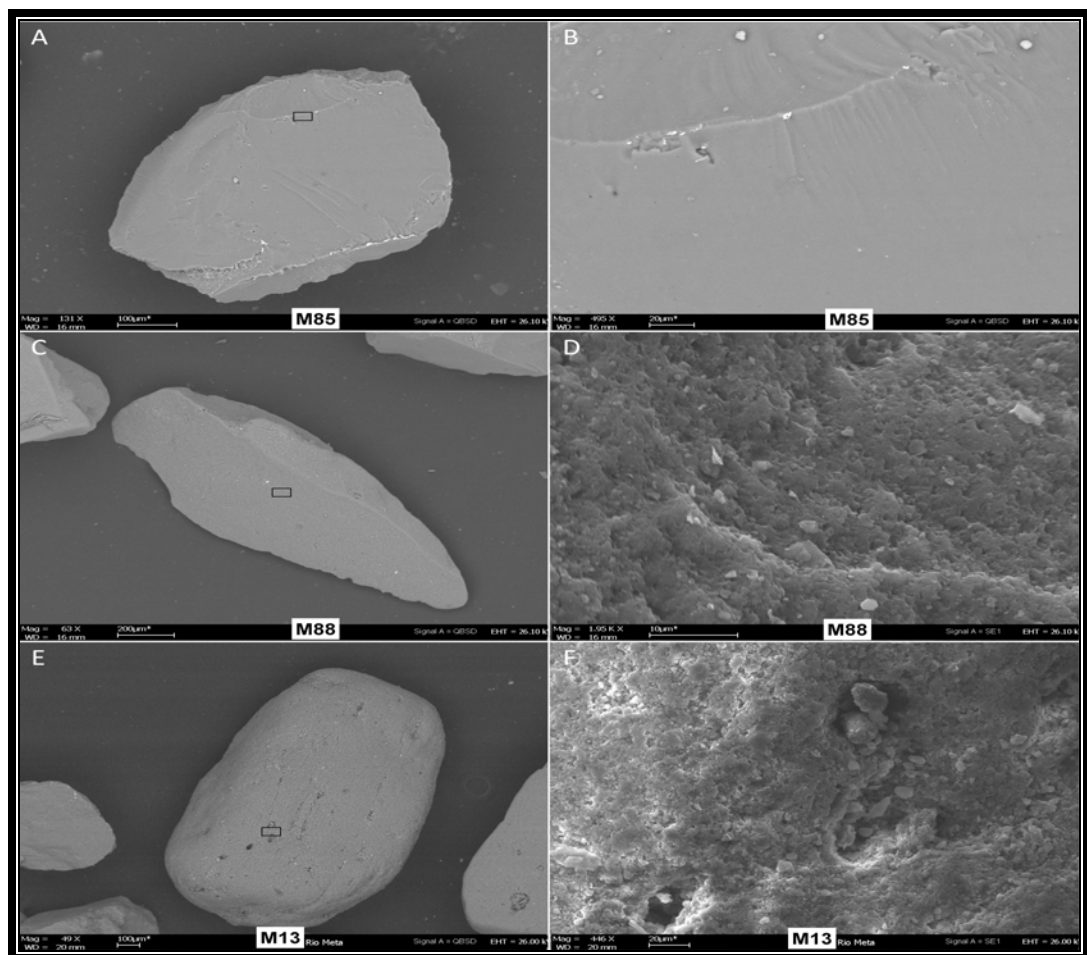


Figura 62. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas algunos granos de cuarzo en las muestras tomadas en el Río Ariporo. Las muestras se ordenan de arriba abajo de la más próxima a la más lejana al área fuente. A: Cuarzo subangular. C: Cuarzo subredondeado. E: Cuarzo bien redondeado. B, D y F: Detalle de la parte del grano indicada en A, C y E, mostrando: evidencias de fractura concoide (B), desprendimiento de escamas como resultado de un ciclo de meteorización temprano o disolución fósil generada durante procesos diagenéticos (D), y pequeñas depresiones indicando posiblemente ligera compactación y presencia de soluciones a presión en las regiones de contacto entre granos (F) (Johnsson et al., 1991; Welton, 1984).



6.5.3 Resultados del Análisis SEM en las Muestras Colectadas en el Cauce Principal del Río Meta.

En las muestras del primer segmento del Río Meta (Río Metica) se tomaron imágenes con el microscopio de escaneo electrónico en algunos granos de cuarzo. La forma de los granos de cuarzo seleccionados de las muestras tomadas son angulares a subredondeados, mostrando superficies de disolución y sobrecrecimiento (figura 63). Estos granos de cuarzos presentan evidencias de desprendimiento de escamas generadas por disolución como lo reporta Johnsson et al., (1991) para el Río Orinoco.

La forma de los granos de cuarzo seleccionados de las muestras de arena tomadas en el segundo segmento del Río Meta son subangulares a bien redondeados, presentando superficies con disolución (figura 64). Los granos de cuarzo presentan fractura concoide y evidencias de desprendimiento de escamas generadas por disolución, como lo reporta Johnsson et al., (1991) en el Río Orinoco.

En el tercer segmento del Río Meta los granos de cuarzo seleccionados presentan formas subangulares a redondeadas, con superficies de disolución (figura 65). Se observan desprendimiento de escamas, y generación de pequeñas depresiones por la presencia de soluciones a presión en el contacto entre granos, como lo ha reportado Johnsson et al., (1991) en el Orinoco.

Figura 63. Imágenes tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el primer segmento del Río Meta. Las muestras se ordenan de arriba abajo de la más próxima a la más lejana al nacimiento. A: Cuarzo subangular. C: Cuarzo subredondeado. E: Cuarzo angular. B, D y F: Detalle de la parte del grano indicada en A, C y E, mostrando: evidencias de disolución (B), desprendimiento de escamas como resultado de un ciclo de meteorización temprano o disolución fósil generada durante procesos diagenéticos (D), y sobrecrecimiento acompañado con superficies de disolución (F) (Johnsson et al., 1991; Welton, 1984).

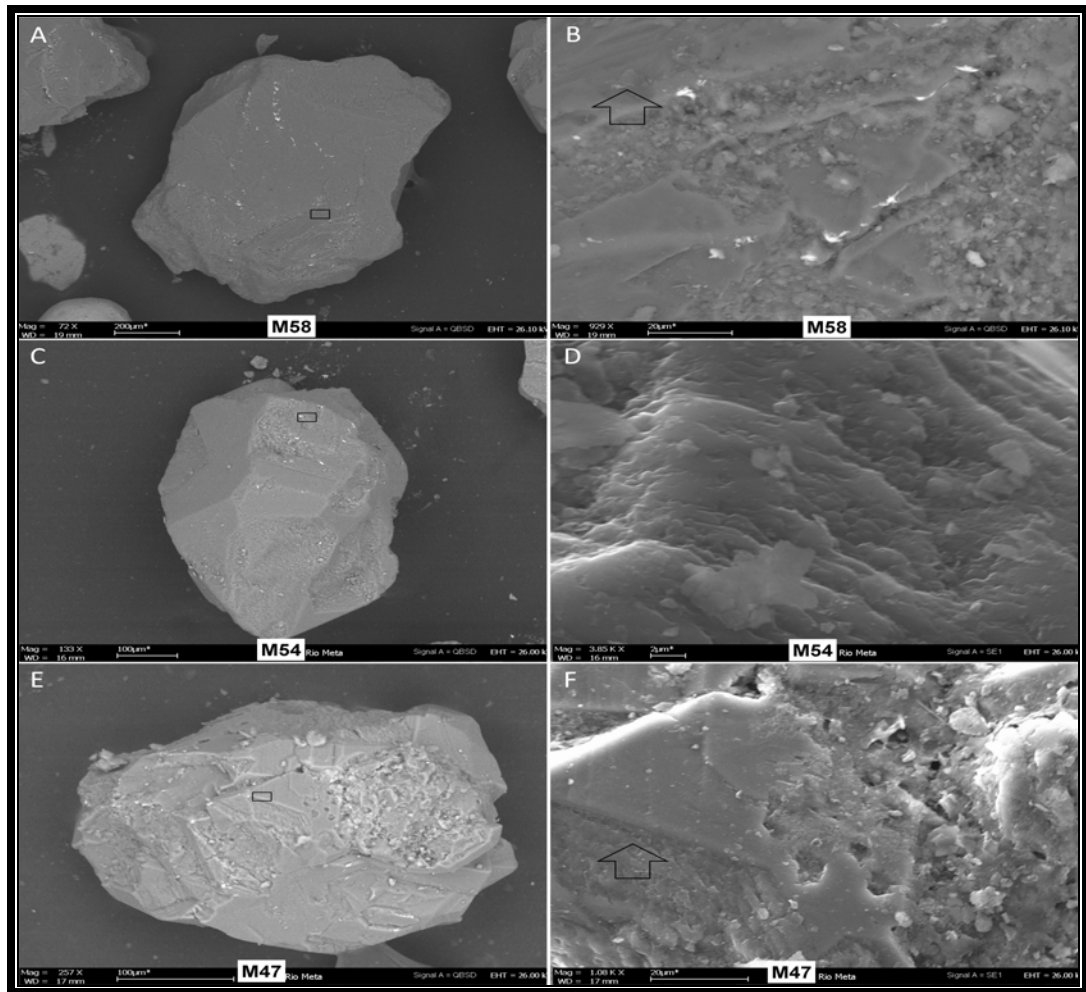


Figura 64. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el segundo segmento del Río Meta. Las muestras se ordenan de arriba abajo de la más próxima al nacimiento a la más lejana al nacimiento. A: Fragmento de cuarzo subangular. C: Cuarzo subredondeado. E: Cuarzo subredondeado. B, D y F: Detalle de la parte del grano indicada en A, C y E, mostrando: desprendimiento de escamas como resultado de un ciclo de meteorización temprano o disolución fósil generada durante procesos diagenéticos (B y D) y abrasión producto de la fricción durante el transporte (F) (Johnsson et al., 1991; Welton, 1984).

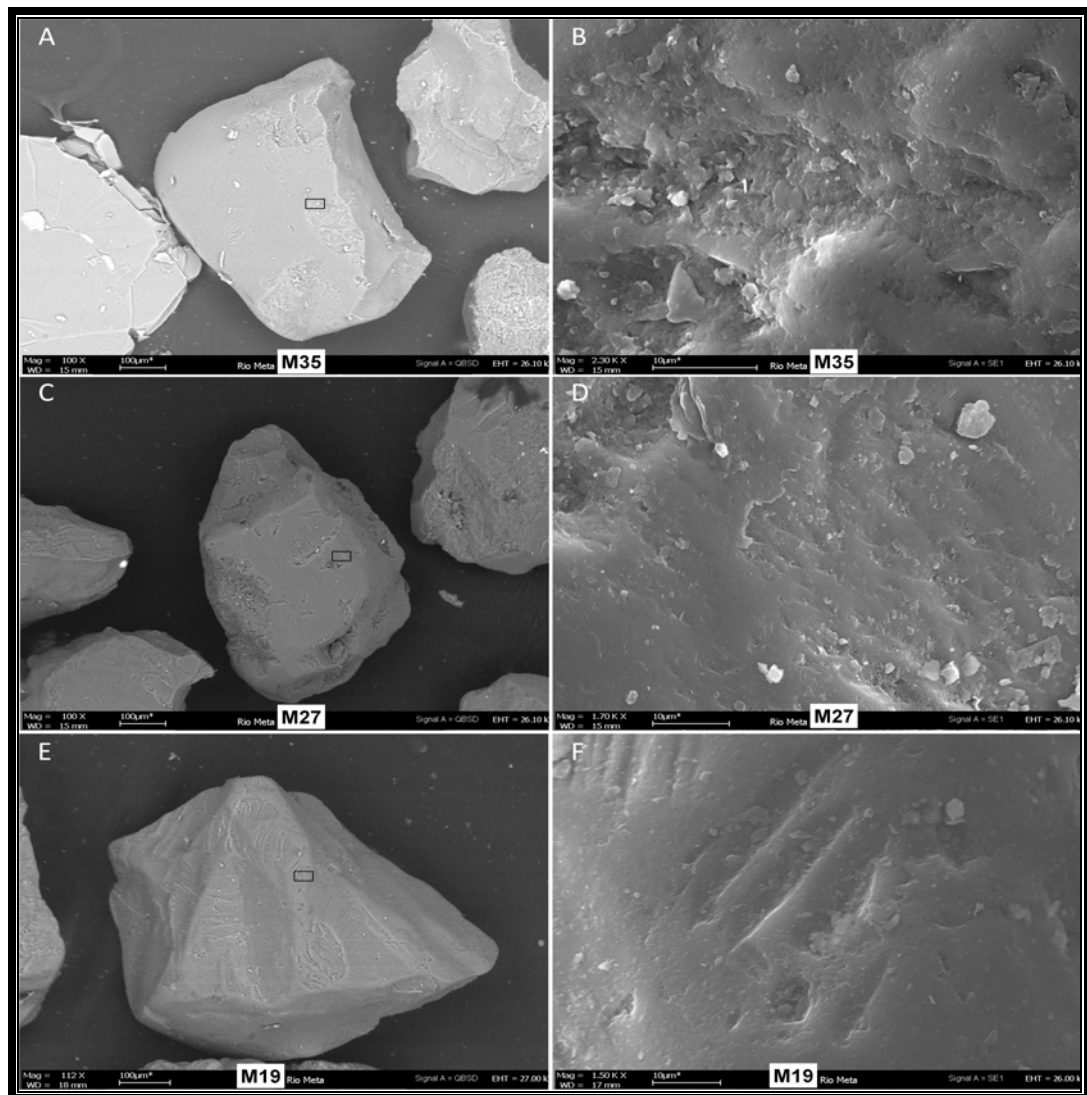
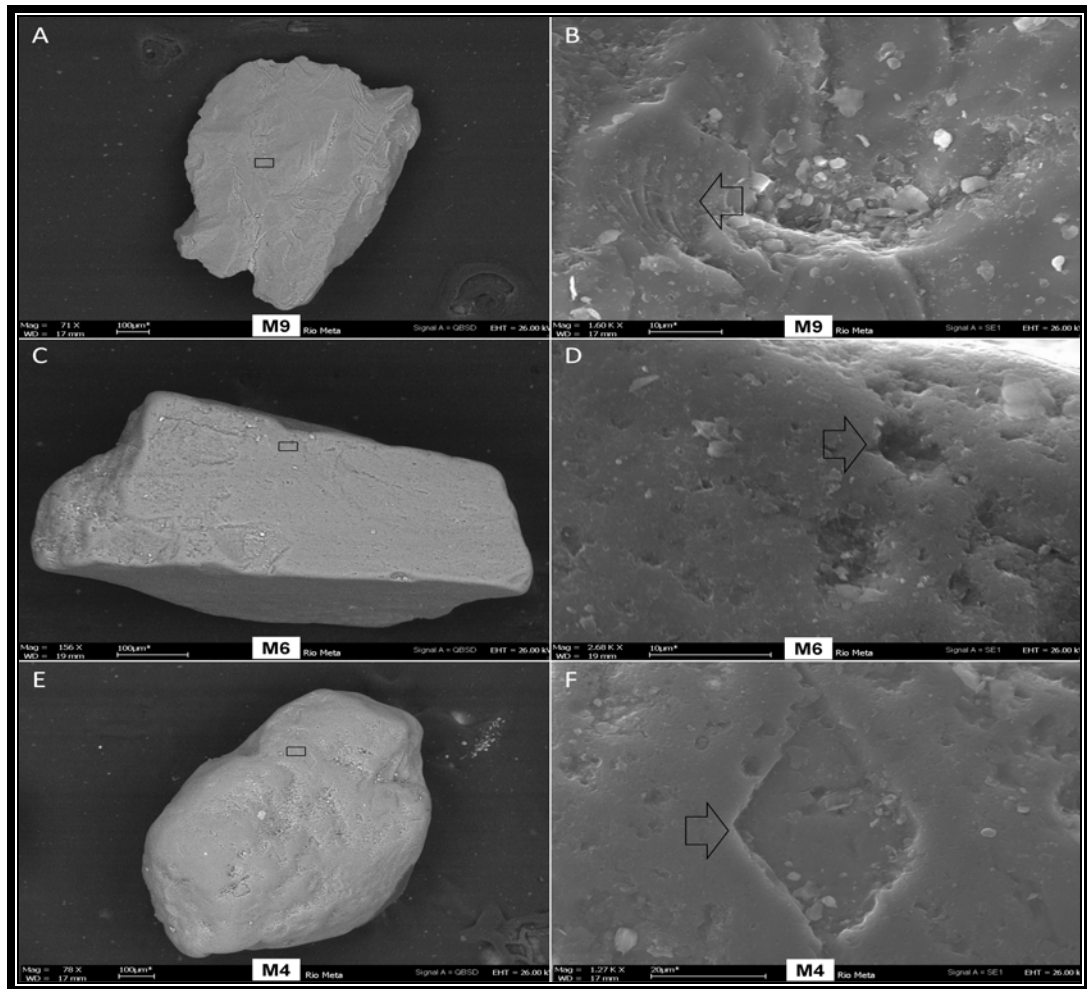


Figura 65. Fotomicrografías tomadas con el microscopio de escaneo electrónico mostrando la forma y las superficies típicas de algunos granos de cuarzo en las muestras de arena tomadas en el tercer segmento del Río Meta. Las muestras se ordenan de arriba abajo de la más próxima a la más lejana al nacimiento. A: Fragmento de cuarzo subangular. C: Cuarzo subredondeado. E: Grano de cuarzo redondeado. B, D y F: Detalle de la parte del grano indicada en A, C y E, mostrando: huellas por abrasión (flecha en B) y evidencias de desprendimiento de escamas como resultado de un ciclo de meteorización temprano o disolución fósil generada durante procesos diagenéticos con pequeñas depresiones indicando posiblemente ligera compactación y presencia de soluciones a presión en las regiones de contacto entre granos (D y F) (Johnsson et al., 1991; Welton, 1984).



6.6 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DR-X)

6.6.1 Muestras de Lodo en los Afluentes con Área Fuente de Composición Metamórfica y Metasedimentaria. Se analizaron dos muestras de lodo en el Río Humadea (M61, M66, tablas 13 y 14), una en el Río Guayuriba (M70), y una en el sector proximal de Río Metica (M56, tablas 15 y 16), indicando que la arcilla más abundante en este sector es la Illita, la cual está siempre por encima del 50% del total de los minerales de arcilla presentes en las muestras. Note como aumenta el contenido de caolinita y cuarzo a medida que aumenta la distancia de transporte (figuras 66 y 67).

Tabla 13. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Humadea (M66 más cercana al área fuente) y cerca de la confluencia del Río Humadea y el Río Guayabero (M61 más distal al área fuente). La columna otros, hace referencia a minerales accesorios como el feldespatos potásicos y/o sódicos, y pirita. La muestra M66 es la más cercana al área fuente y la M61 la más lejana. Los difractogramas se observan en el anexo C.

RÍO	No. MUESTRA	Arcillas	Cuarzo	Otros
		%Peso	%Peso	%Peso
Río Humadea	M61	47	48	<5
	M66	25	70	<5

Tabla 14. Valores porcentuales en la fracción $<2\mu$, obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Humadea (M66) y cerca de la confluencia del Río Humadea y el Río Guayabero (M61).

RÍO	Descripción	Arcillas					Cuarzo
		Cloritas %Peso	Interestrat %Peso	Illita %Peso	Caolinita %Peso	Pirofilita %Peso	
Río Humadea	M61	13	ND	53	25	ND	9
	M66	15	ND	39	30	ND	16

Figura 66. Composición de las muestras de arcilla (fracción $<2\mu$) en el Río Humadea.

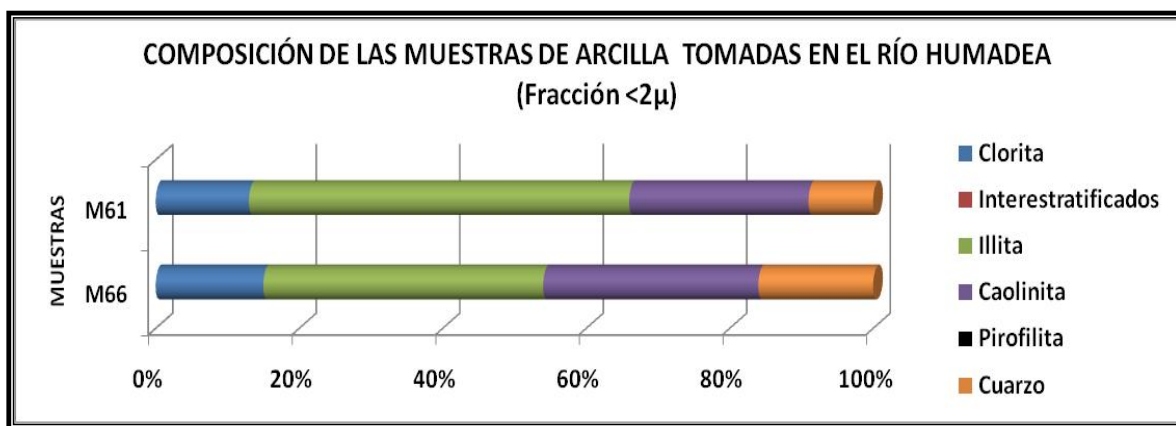


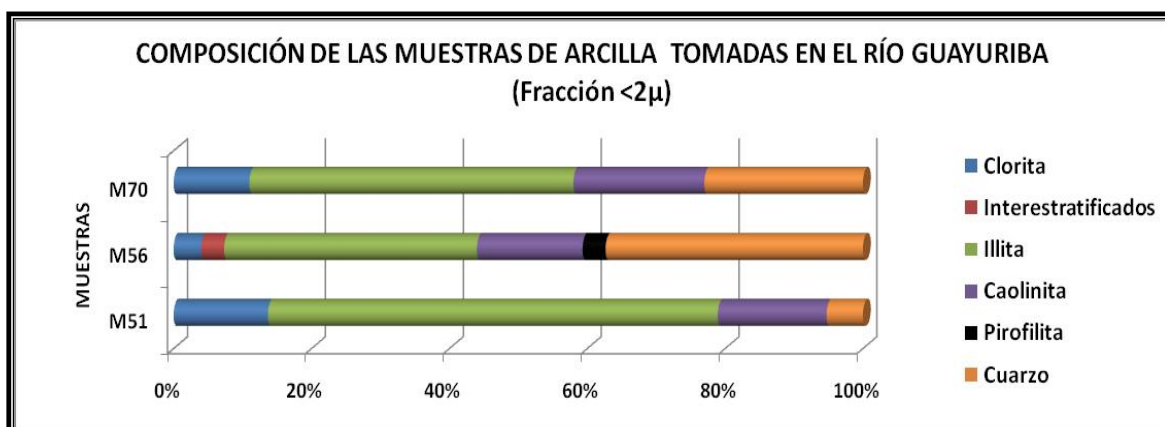
Tabla 15. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Guayuriba (M70) y cerca de la confluencia entre los ríos Guayuriba y Metica (M56). La muestra M70 es la más cercana al área fuente y la M56 la más distal. Los difractogramas se observan en los anexos D y G.

RÍO	No. MUESTRA	Arcillas %Peso	Cuarzo %Peso	Otros %Peso
Río Guayuriba	M70	33	62	<5
Río Metica	M56	63	32	<5
	M51	36	59	<5

Tabla 16. Valores porcentuales en la fracción <2 μ , obtenidos a partir de DR-X en las muestras de lodo tomadas en el Río Guayuriba (M70) y cerca de la confluencia entre los ríos Guayuriba y Metica (M56).

RÍO	Descripción	Arcillas					Cuarzo %Peso
		Cloritas %Peso	Interestrat %Peso	Illita %Peso	Caolinita %Peso	Pirofilita %Peso	
Río Guayuriba	M70	11	0	47	19	0	23
Río Metica	M56	6	5	55	23	5	56
	M51	13	<5	62	15	ND	5

Figura 67. Composición de las muestras de arcilla (fracción $<2\mu$) tomadas en el Río Guayuriba (M70) y cerca de la confluencia del Río Guayuriba con el Río Metica (M56).



6.6.2 Muestras de Lodo Tomadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Sedimentaria. Se les realizó DR-X a cinco muestras de lodo, una tomada en el Río Cusiana (M79) y otra en el Río Ariporo (M86), en el sector proximal de los llanos (tablas 17, 18, 19 y 20), las otras dos muestras fueron tomadas en el Río Meta (M28, M14, y M3). Los resultados indican que en las zonas más cercanas al área fuente al sur predomina el contenido de illita y al norte predomina el contenido de interestratificados en las muestras de lodo. Note que a medida que aumenta la distancia de transporte y disminuye el régimen de pluviosidad, en el sector norte el contenido de illita aumenta, y el contenido de caolinita es casi constante en las tres muestras (figuras 68 y 69).

Tabla 17. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Cusiana (M79) y cerca de la confluencia con el Río Meta (M28). La muestra M79 es la más cercana al área fuente y la M28 la más lejana. Los difractogramas se observan en los anexos E y G.

RÍO	No. MUESTRA	Arcillas %Peso	Cuarzo %Peso	Otros %Peso
Río Cusiana	M79	30	65	<5
Río Meta	M28	43	52	<5

Tabla 18. Valores porcentuales en la fracción <2 μ , obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Cusiana (M79) y cerca de la confluencia con el Río Meta (M28).

RÍO	Descripción	Arcillas					Cuarzo %Peso
		Cloritas %Peso	Interestrat %Peso	Illita %Peso	Caolinita %Peso	Pirofilita %Peso	
Río Cusiana	M79	5	ND	63	22	ND	10
Río Meta	M28	5	12	43	32	ND	8

Figura 68. Composición de las muestras de arcilla (fracción $<2\mu$) tomadas en el Río Cusiana (M79) y cerca de la confluencia con el Río Meta (M28).

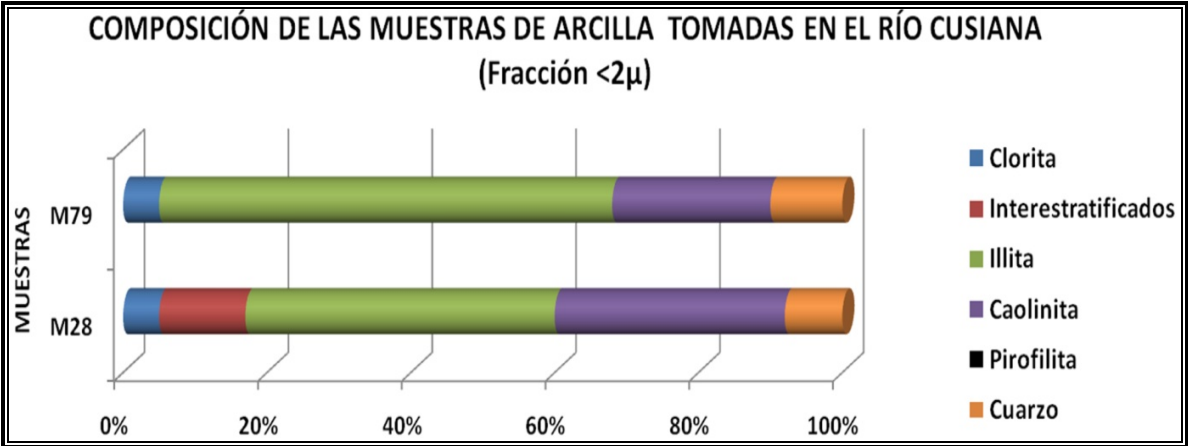


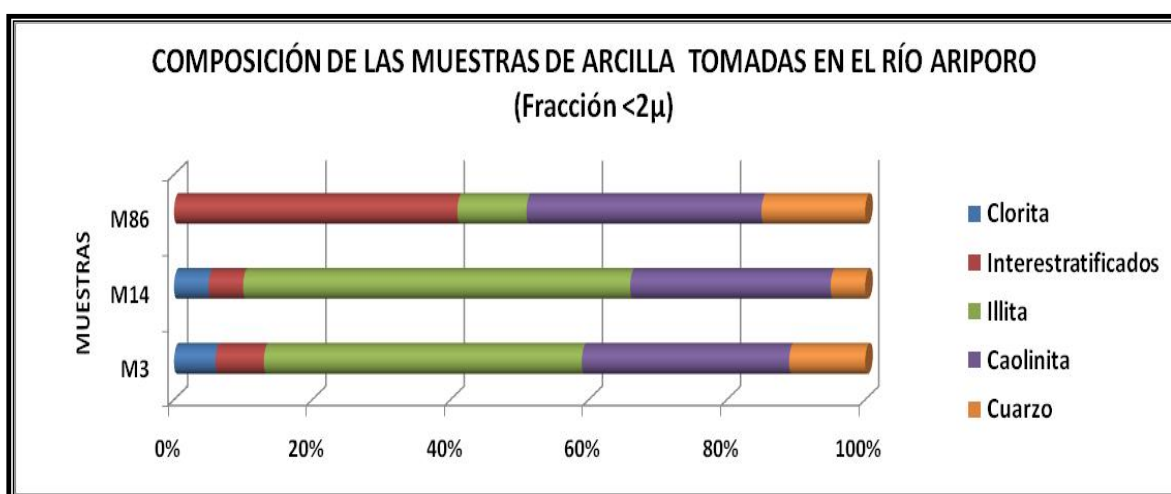
Tabla 19. Valores porcentuales en muestra total (bulk) obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Ariporo (M86) y en el Río Meta (M14 y M3). La muestra M86 es la más cercana al área fuente y la M3 la más distal. Los difractogramas se observan en los anexos F y G.

RÍO	No. MUESTRA	Arcillas %Peso	Cuarzo %Peso	Otros %Peso
Río Ariporo	M86	10	85	<5
Río Meta	M14	52	43	<5
Río Meta	M3	35	60	<5

Tabla 20. Valores porcentuales en la fracción <2 μ , obtenidos a partir de DR-X en las muestras tomadas en el Río Ariporo (M86) y en el Río Meta (M14 y M3).

RÍO	Descripción	Arcillas					Cuarzo
		Cloritas	Interestrat	Illita	Caolinita	Pirofilita	
		%Peso	%Peso	%Peso	%Peso	%Peso	%Peso
Río Ariporo	M86	0	41	10	34	0	15
Río Meta	M14	5	5	56	29	0	5
Río Meta	M3	6	7	46	30	0	11

Figura 69. Composición de las muestras de arcilla (fracción <2 μ) tomadas en el Río Ariporo (M86) y en el Río Meta (M14 y M3).



7. INFLUENCIA DEL ÁREA FUENTE, TRANSPORTE Y CLIMA EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META

Para realizar el análisis de la Cuenca del Río Meta, se utiliza la clasificación de sistemas fluviales propuesta por Schumm (1977) y Niño (2004), de esta forma se dividió la cuenca en tres zonas (figura 15). La Zona 1 es el sector de la estribación oriental de la Cordillera Oriental, la cual es el área productora de sedimentos para la cuenca. La Zona 2 es el sector de los llanos proximales, donde las pendientes sufren un cambio brusco y los afluentes transportan el sedimento hacia el Río Meta. La Zona 3 es la zona de pendientes más bajas en el sistema principal del Río Meta (tercer segmento), después de la confluencia entre los ríos Meta y Casanare, donde se generan extensos depósitos de barras longitudinales y barras puntuales.

Para determinar la influencia que ejerce la composición del área fuente, el transporte y el clima en la composición de las muestras tomadas en la Cuenca Hidrográfica del Río Meta, se realizó un análisis por separado de estos factores tomando en cuenta las características composicionales de cada una de las áreas fuente que son drenadas por los afluentes estudiados en el presente trabajo. Éste análisis también fue hecho en el cauce principal del Río Meta. En este capítulo se hace referencia al contenido de fragmentos de roca (R) sin tener en cuenta el cuarzo policristalino (Qp) y el chert (Qpc). Además, las distancias mencionadas son medidas en línea recta, perpendicular al trazo del frente de deformación.

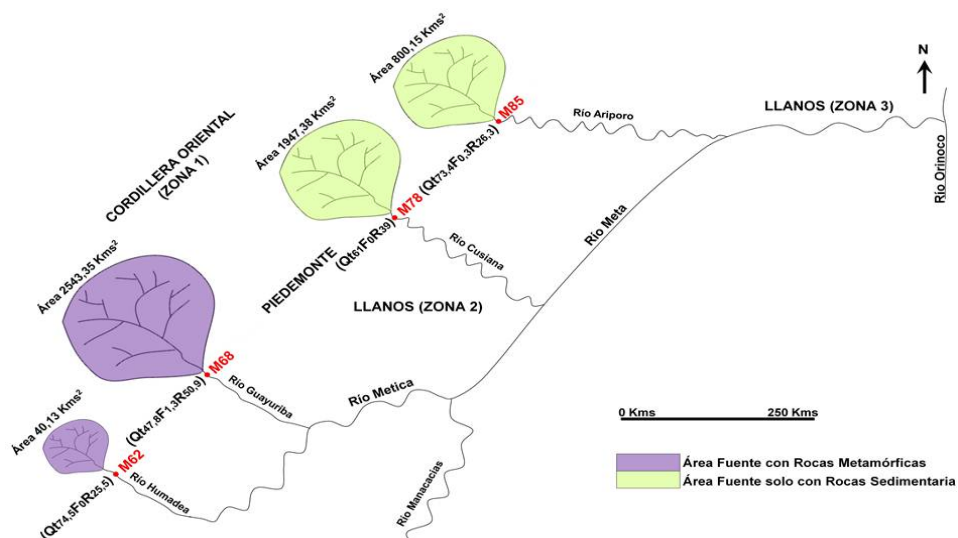
7.1 INFLUENCIA DEL ÁREA FUENTE

Esta es la Zona 1 en la clasificación propuesta por Schumm (1977) y Niño (2004) (figuras 15 y 70). Existen dos factores importantes que se deben tener en cuenta

para determinar la influencia de un área fuente en la composición de depósitos fluviales: 1) La composición de las rocas que sirven de fuente de sedimentos; y 2) el porcentaje de área expuesta para cada composición, que es drenada por los distintos afluentes que nacen en el sector.

A continuación se hace el análisis por separado de las dos áreas fuente presentes en el sector de estudio y en el cauce principal del Río Meta. Para suprimir los efectos del transporte y el clima en los depósitos de arena generados por los cuatro afluentes, solo se tiene en cuenta para éste análisis la composición de la muestra tomada en el sector más próximo al área fuente (figura 70).

Figura 70. Esquema donde se muestran las zonas en la Cuenca Hidrográfica del Río Meta según la clasificación de Schumm (1977) y Niño (2004). También se ubica la muestra de arena tomada en el sector más cercano al área fuente.



En el caso del Río Humadea se tomaron los resultados composicionales de la muestra M62, debido a que los resultados en la muestra M59 son anómalos, esto posiblemente está relacionado con la influencia de la actividad antropogénica, la

cual genera que las condiciones meteóricas en el sector sean diferentes a las encontradas en otros sitios del cauce del río (Restrepo, 2005).

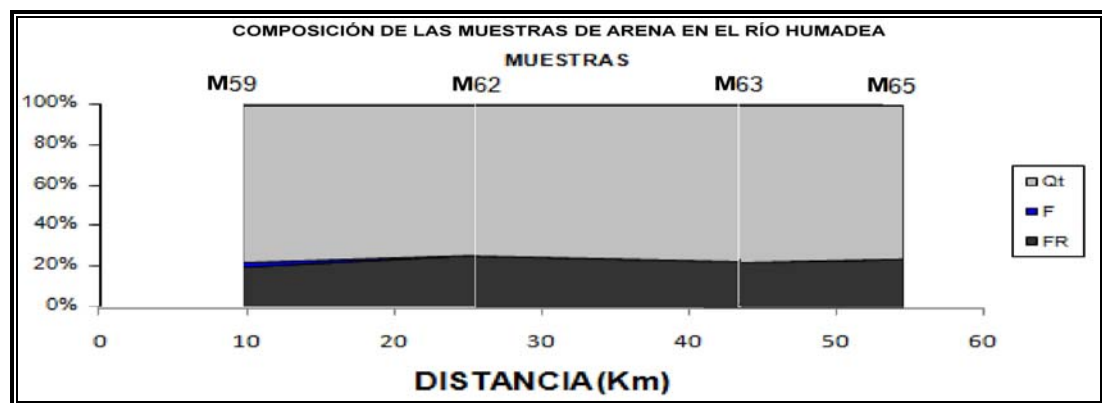
7.1.1 Influencia del Área Fuente en la Composición de las Muestras Tomadas en los Afluentes que Drenan el Sector con Rocas Metamórficas y Metasedimentarias. El porcentaje de área expuesta para las rocas metamórficas y metasedimentarias aflorantes en la cuenca del Río Humadea, al sur, es del 67,9% aproximadamente (tabla 8). La composición de la muestra de arena M62 en el Río Humadea se caracteriza por tener un contenido en fragmentos de roca metamórfica (Rms) del 65,8% aproximadamente (figuras 36 y 71; anexo B). En el Río Guayuriba, al norte, la exposición de rocas metamórficas y metasedimentarias aflorantes en el área fuente es del 32,4% aproximadamente (tabla 8). El contenido de fragmentos de roca en la muestra más cercana al área fuente (M68) es del 50,7% aproximadamente (figuras 36 y 72; anexo B).

Estos resultados no reflejan una relación directa entre la composición de las rocas en el área fuente, el área de exposición de rocas aflorantes y la producción de fragmentos rocosos. Considerando que las condiciones climáticas son similares en los dos afluentes; las diferencias entre las dos fuentes son: 1) la pendiente en el sector fuente al sur es mayor que al norte, y 2) el área del sector fuente para el Río Guayuriba es mucho mayor en comparación con el área del sector fuente del Río Humadea (tabla 8; figura 21).

La comparación de los datos de fragmentos de roca entre lo esperado en el área fuente versus lo documentado en las arenas fluviales, indica una mayor susceptibilidad de las rocas aflorantes de composición metamórfica a proporcionar granos poliminerálicos en comparación con las rocas sedimentarias (tabla 8, figura 36). En el Río Humadea la proporción de exposición entre rocas metamórficas y sedimentarias aflorantes es aproximadamente de 2:1, respectivamente. La proporción entre fragmentos de roca metamórfica y fragmentos de roca

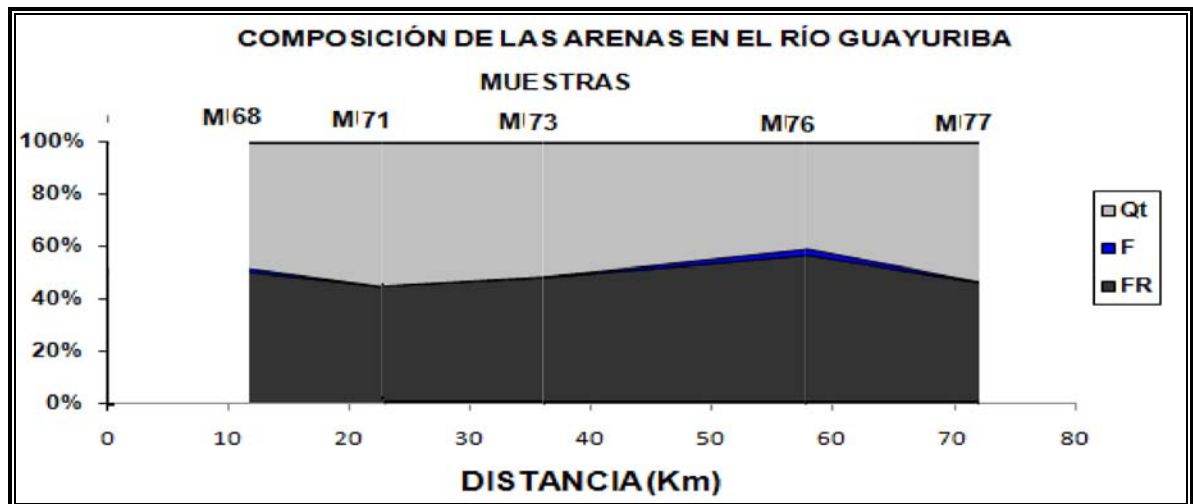
sedimentaria en la muestra de arena seleccionada (M62) es aproximadamente de 2:1 respectivamente, según los resultados de petrografía modal. En el Río Guayuriba la proporción de exposición entre rocas metamórficas y sedimentarias aflorantes es aproximadamente de 1:2, respectivamente. Utilizando los datos de composición modal de la muestra M68 se estimó la proporción de producción de los fragmentos de rocas metamórficas y los fragmentos sedimentarios, la cual es aproximadamente de 1:1, respectivamente (tabla 12; anexo B). Estas relaciones entre los resultados composicionales esperados y los obtenidos en los fragmentos de roca, muestran que para el análisis de procedencia el área total de un sector fuente es menos relevante que la información sobre el área de exposición de las diferentes composiciones rocosas que afloran en el sector fuente, tomando en cuenta que el área total del sector fuente del Río Humadea es de 40,13 Km² y el área total del sector fuente del Río Guayuriba es de 2543,35 Km² (tabla 8).

Figura 71. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de feldespatos (F) a medida que aumenta la distancia de transporte con el área fuente. El chert es sumado al cuarzo total. La muestra M59 es la más cercana al área fuente y la muestra M65 es la más distal (ubicada en el sector cercano a la confluencia entre el Río Humadea y el Río Guayabero).



Otro factor importante con el cual se podría determinar la influencia del área fuente es la granulometría obtenida en las muestras de arena para los dos afluentes (figuras 24 y 25). Note como en las muestras más cercanas al área fuente el contenido de arena gruesa y media representan más del 50% de la distribución granulométrica. Esto es un reflejo de la textura y composición de las rocas aflorantes en el área fuente (Folk, 1974; Boggs, 1987). Esto podría interpretarse como una mayor influencia de las rocas metamórficas aflorantes en los sectores fuente de los ríos Humadea y Guayuriba para generar granos de mayor tamaño o simplemente es el reflejo de la inestabilidad de algunos granos para mantener su tamaño a medida que se alejan de la fuente de sedimentos.

Figura 72. Variación irregular de cuarzo total (Qt), feldespatos (F) y fragmentos de roca (FR) a medida que aumenta la distancia con el área fuente. El chert es sumado al cuarzo total. La muestra M68 es la más cercana al área fuente y la muestra M77 es la más distal.



Como los resultados composicionales no presentan una tendencia clara en

ninguno de los dos afluentes (figuras 34, 71 y 72), se considera que la cuantificación e identificación composicional de los minerales de arcilla en los suelos (tablas 14 y 15), la información adicional extraída de las características físicas de los granos de cuarzo (figura 56), sumado con la presencia de clorita y pirofilita en los suelos es un aceptable indicador de procedencia para áreas con rocas metamórficas de bajo grado (Frey and Robinson, 1999). Se debe tener en cuenta que el análisis de procedencia en los granos de cuarzo para tratar de identificar la composición del sector fuente es útil en muestras de arena que no han sido transportadas por más de 100 Kms, tomando en cuenta que las muestras que se tomaron en el cauce principal del Río Meta y superan los 100 Kms de transporte no aportan información precisa sobre la composición del área fuente de sedimentos (figuras 56, 57, 71 y 72).

El cálculo de la proporción entre el contenido de cuarzo y los fragmentos de roca, el cual es aproximadamente de 3:1 para el Río Humadea y 1:1 para el Río Guayuriba, respectivamente (figuras 71 y 72; anexo B), indican que las rocas metamórficas producen más granos de Qp en comparación que las rocas sedimentarias (figura 35).

7.1.2 Influencia del Área Fuente en la Composición de las Muestras Tomadas en los Afluentes que Drenan el Sector con Rocas Sedimentarias. En el caso de estos afluentes es difícil establecer una relación entre la composición de la rocas en el área fuente y la producción de fragmentos rocosos, tomando en cuenta que las rocas aflorantes en el área fuente son principalmente sedimentarias (López, 2004). Pero es posible definir una relación a partir de la procedencia de los fragmentos de roca y los granos de cuarzo, si se tiene en cuenta la edad y la composición de las formaciones aflorantes en este sector. De esta forma, en el Río Cusiana la exposición de formaciones Cretácicas aflorantes en el área fuente es mucho mayor en comparación con el sector fuente del Río Aripuro donde la

exposición de formaciones Terciarias es más importante (tabla 8; figura 21). Otras consideraciones que permiten realizar esta comparación es que las condiciones climáticas y las pendientes en el sector fuente son similares para los dos afluentes. En algunos trabajos se ha establecido la procedencia de las rocas terciarias como el producto de la denudación de las formaciones cretácicas preexistentes en este sector (Ramírez, 2010; Quintero, 2010; Parra, 2008; Mora, 2007). Esto se puede interpretar como una mayor producción esperada de fragmentos de roca (R) por las formaciones Cretácicas en comparación con la producción de R por las formaciones Terciarias, la cual debería ser mayor en granos de Qm. Tomando en cuenta que las rocas de edad Terciaria son el resultado de depósitos que han sufrido más de un ciclo de sedimentario.

El área total de exposición para el sector fuente del Río Cusiana es aproximadamente de 1947,38 Km². En el sector fuente del Río Cusiana las formaciones Cretácicas aflorantes ocupan aproximadamente el 65,2% del área total, por tanto la proporción de exposición entre rocas de edad Cretácica y Terciaria es aproximadamente de 2:1, respectivamente. La composición de la muestra de arena más cercana al sector fuente (M78) en el Río Cusiana se caracteriza por tener un contenido en R del 39% aproximadamente (figuras 42 y 73). La proporción entre granos de Rt versus granos de Qm en la muestra de arena más próxima al área fuente (M78) es aproximadamente de 1:1 respectivamente, según los resultados de petrografía modal (tabla 8; anexo B).

En el Río Ariporo el área total del sector fuente es de 800,15 Km² aproximadamente. En el Río Ariporo las formaciones Cretácicas aflorantes ocupan aproximadamente el 25,61% del área total, por tanto la proporción de exposición entre rocas de edad Cretácica y Terciaria es aproximadamente de 1:3, respectivamente (tabla 8; anexo B). El contenido de R en la muestra más cercana al área fuente en este afluente es del 26,3% aproximadamente (figura 74; anexo B). Utilizando los datos de composición modal de la muestra M85, se estimó la

proporción en la producción de granos de Qm versus granos de Rt, la cual es aproximadamente de 2:1, respectivamente (tabla 12; anexo B).

La comparación de los datos de granos de R entre lo esperado en el área fuente versus lo documentado en las arenas fluviales para los dos afluentes, indica una mayor susceptibilidad de las rocas de edad Cretácica a proporcionar granos poliminerálicos en comparación con las rocas de edad Terciaria (tabla 8; figuras 44 y 45; anexo B). Estos datos también indican que para el análisis de procedencia la información sobre el área total de un sector fuente es menos relevante que la información sobre el área de exposición de cada formación rocosa aflorante.

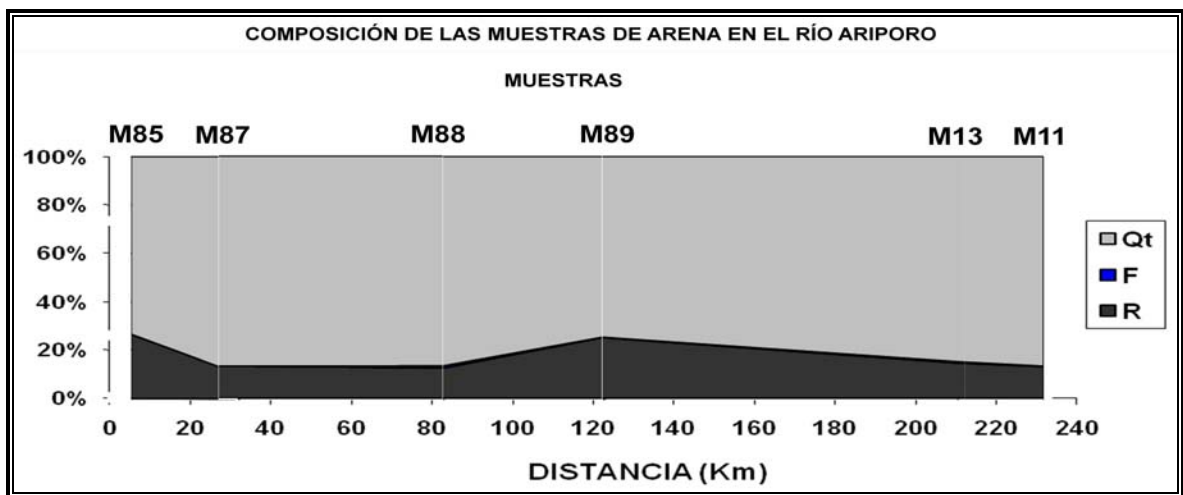
Figura 73. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte con el área fuente. El chert es sumado al cuarzo total. La muestra M78 es la más cercana al área fuente y la muestra M38 es la más distal.



Para este sector también se analiza la influencia del área fuente en la granulometría obtenida en las muestras de arena (figuras 26 y 27). Note como en

las muestras más cercanas al área fuente el contenido de arena media y fina representan más del 50% de la distribución granulométrica. Esto es un reflejo de la textura y composición de las rocas en el área fuente (Folk, 1974; Boggs, 1987). Esto también indica que las rocas metamórficas aflorantes en los sectores fuente generan granos de mayor tamaño debido al contenido de minerales más estables física y químicamente, en comparación con las rocas sedimentarias (figura 43).

Figura 74. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte con el área fuente. El chert es sumado al cuarzo total. La muestra M85 es la más cercana al área fuente y la muestra M11 es la más distal.



7.1.3 Influencia del Área Fuente y/o Contaminación de Afluentes en la Composición de las Muestras en el Cauce Principal del Río Meta. Para realizar el análisis en el Río Meta se seguirá con la división por segmentos que se ha mencionado con anterioridad en el capítulo de resultados.

Primer Segmento

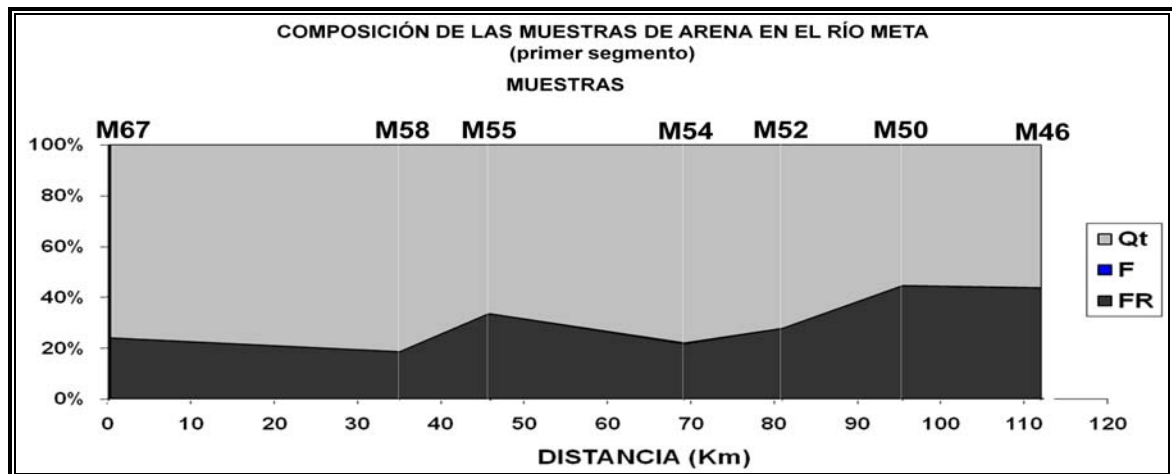
Con el análisis hecho en los ríos Humadea y Guayuriba se hace una interpretación de la influencia del área fuente en la composición de las muestras del primer segmento del Río Meta. Como se estableció con anterioridad, los ríos procedentes de área fuente con rocas metamórficas aportan en mayor proporción granos de Rms a las aguas del primer segmento del Río Meta, reflejado en los resultados modales donde el valor medio de los granos de Rms es de 56,4% (anexo C) del total de los granos de R en las muestras (figura 50). Además, en este sector las muestras tienen el mayor contenido de granos con tamaño arena gruesa en comparación con otros sectores del río, lo cual sigue siendo una característica que sólo se observa en las muestras que tienen influencia de los sectores fuente con rocas metamórficas (tablas 1 y 10, figuras 21 y 28).

Los granos de R en este sector del Río Meta son principalmente granos de Rms, a medida que el río avanza hacia el nororiente los granos de R aumentan y su composición es principalmente de Rs (figura 50 y 75). Tomando en cuenta que en el área fuente las rocas hacia el suroccidente son principalmente de composición metamórfica y hacia el nororiente son de composición sedimentaria (López, 2004) (figura 21).

Otro tipo de información importante es la obtenida en los granos de arena de la muestra tomada en el Río Manacacias. Este río se caracteriza por no tener influencia directa de los sedimentos procedentes de la Cordillera Oriental, por tanto los depósitos son el producto del retrabajamiento de los aluviones (figura 57). Las muestras de este afluente se caracterizan por ser de composición cuarzoarenita, por tanto el contenido de Qm es el más alto encontrado en las muestras estudiadas. En la figura 56 se observa que el análisis de procedencia realizado a los granos de cuarzo muestran afinidad con un área fuente de composición metamórfica de bajo grado, lo cual implica que en alguna época el

sector de la Cordillera Oriental donde afloran rocas metamórficas de bajo grado, aportó sedimentos a los depósitos que se encuentran en el área de influencia del Río Manacacias.

Figura 75. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte en el primer segmento del Río Meta (Río Metica). El chert es sumado al cuarzo total. La muestra M67 es la más cercana al sector donde nace el Río Metica y la muestra M46 es la más distal.



Segundo Segmento

Utilizando el análisis realizado en el Río Cusiana se hace una interpretación de la influencia del área fuente en la composición de las muestras de arena del segundo segmento del Río Meta. Este segmento del río se caracteriza por tener depósitos de arenas con menor población de tamaños de grano grueso y mayor población de granos de tamaño fino a medio, lo cual permite establecer una posible relación con la composición de las rocas en el sector fuente, tomando en cuenta que

principalmente este sector recibe los sedimentos procedentes del sector fuente con rocas sedimentarias que se caracterizan en su mayoría por ser limolitas y areniscas (López, 2004) (tabla 1 y 10, figuras 21 y 28).

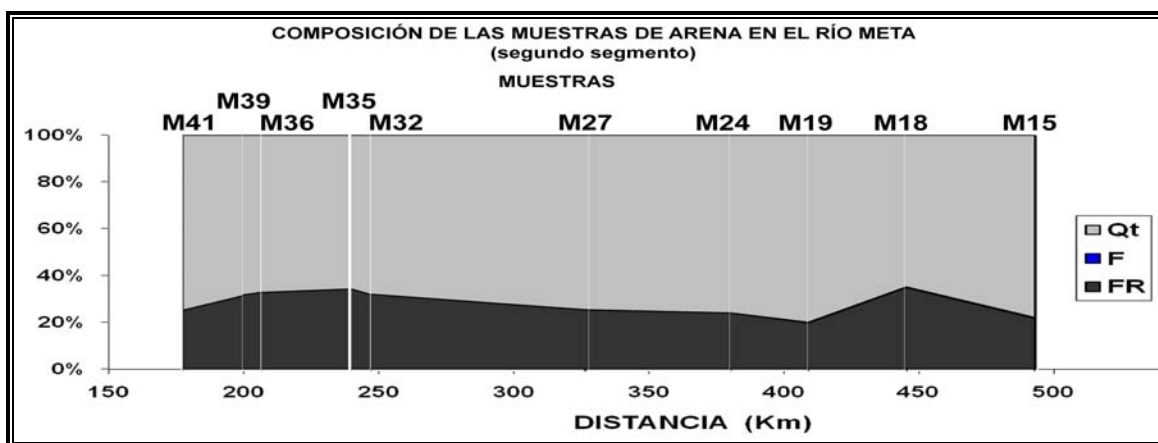
Composicionalmente se diferencia del primer segmento porque los R son principalmente granos de Rs, aunque aún se siguen encontrando granos de Rms. Esto principalmente es el resultado de la cercanía de este segmento con el sector fuente de composición sedimentaria la cual tiene una mayor influencia en la composición de los depósitos de arena (figuras 21, 48 y 50). La muestra M41 es la más cercana al área fuente de composición metamórfica y se caracteriza por tener un contenido en granos de Rs del 63,9% aproximadamente; en contraste, la muestra M15 es la muestra que más ha sido influenciada por los sedimentos procedentes del sector fuente con rocas sedimentarias y tiene un contenido en granos de Rs del 84,4% aproximadamente (anexo B). Además, note como el contenido de Qm en la muestra M46 (primer segmento) es del 46,7% y cuando el Río Manacacias confluye con el Río Meta al inicio del segundo segmento el contenido de Qm en la muestra M41 es del 60,1%, lo cual indica una influencia sustancial de la composición de los sedimentos aportados por el Río Manacacias en la composición de los depósitos de arena del segundo segmento del Río Meta (figura 21, anexo B).

Estos resultados composicionales muestran como los depósitos de arena del segundo segmento a pesar de tener una mezcla de composiciones de fragmentos de roca, pueden reflejar la composición dominante en el sector fuente y esto permite relacionar también la composición de los depósitos con la distancia al área fuente, como se analizará más adelante. El contenido de R en este segmento es muy variable y no muestra una tendencia clara (figura 76).

Con el análisis de procedencia en los granos de Qm se puede discriminar que no existe una influencia directa entre la composición de los depósitos de arena y un

sector fuente donde afloren rocas metamórficas (figura 56). Pero también se puede utilizar el contenido de glauconita y feldespato en algunos granos de R para establecer relaciones de procedencia tomando en cuenta que las principales formaciones en el área fuente que producen fragmentos de roca con glauconita y feldespato son las Formaciones Une y Guayabo (Ramírez, 2010; Quintero, 2010). Infortunadamente estos minerales se alteran fácilmente y no es posible realizar un análisis de procedencia más exacto en este sector de la cuenca.

Figura 76. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los fragmentos de roca (R) a medida que aumenta la distancia de transporte en el segundo segmento del Río Meta. El chert es sumado al cuarzo total. La muestra M41 es la más cercana al sector donde nace el Río Metica y la muestra M15 es la más distal.



Otra característica composicional que tienen los depósitos de este segmento del Río Meta se observa en las muestras de lodo, donde se puede apreciar como el contenido de clorita en el segundo segmento disminuye sustancialmente en comparación con las muestras de lodo del primer segmento donde la muestra M66 tiene un contenido de clorita del 15% en comparación con la muestra M28 en el segundo segmento, que es del 5%, lo cual indica que el segundo segmento tiene

una menor influencia del área fuente con rocas de composición metamórfica (tablas 18 y 14; figura 21).

En este segmento también se nota que los granos de cuarzo procedentes de sectores metamórficos son angulares y no presentan sobrecrecimientos como los granos de cuarzo procedentes de rocas sedimentarias, además algunos granos presentan redondez debido a que han sufrido varios ciclos de sedimentación, estos granos también presentan algunas marcas, generadas durante los procesos de litificación por sobrepresiones en la superficie del grano (Welton, 1984) (figuras 59, 60, 61, 62, 63 y 64).

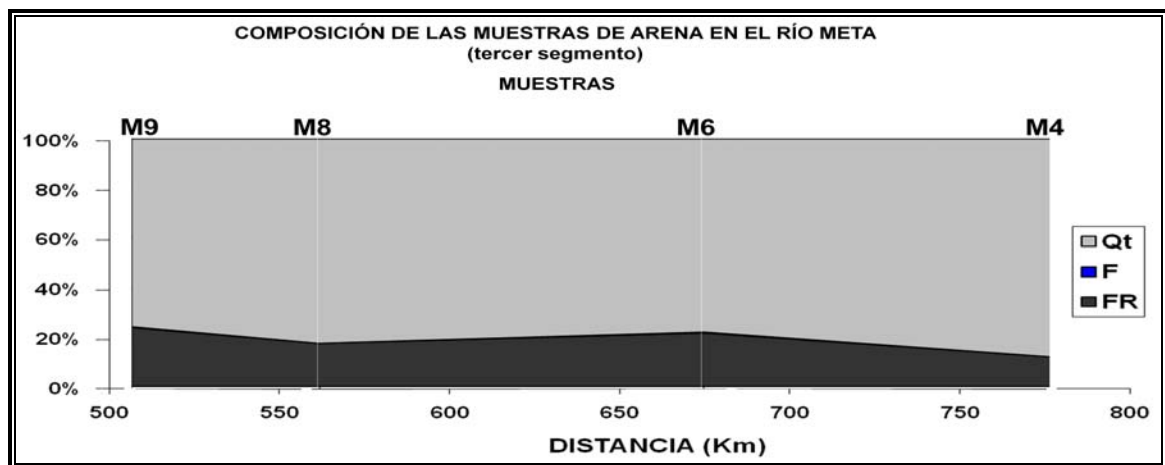
Tercer Segmento

Este segmento es el más distal al área fuente y se caracteriza por tener la influencia de los sedimentos transportados desde el primero y segundo segmento del Río Meta y también por los sedimentos aportados por el Río Casanare, los cuales proceden de un sector fuente con rocas sedimentarias (López, 2004). Los granos en este sector se caracterizan por ser principalmente de tamaños arena media a fina, aunque la fracción gruesa también está presente pero en menores proporciones y su disminución puede relacionarse con la resistencia fisicoquímica de algunos granos como los de Qp y Qm (tabla 10, figura 28).

En este segmento como en los dos anteriores, se aprecia que la composición de los depósitos varía sustancialmente al confluir con un tributario que transporta sedimentos desde el área fuente. Esto se refleja al comparar la composición de la última muestra del segundo segmento (M15), donde el contenido de Qm era del 73,6% y al llegar los sedimentos transportados por el Río Casanare baja al 62,2% aproximadamente en la muestra M9. Este cambio en la composición indica que el Río Casanare aporta la mayor cantidad de los granos de R en los depósitos de arena del tercer segmento (figura 21, anexo B). En el tercer segmento los granos

de R son principalmente de composición Rs, en muy baja proporción Rms con avanzado estado de meteorización y Rp (figuras 21 y 51). También el contenido de granos de R es el más bajo en las muestras del cauce principal del Río Meta, lo cual indica que en las zonas más distales de la cuenca, los granos de R procedentes de áreas fuente de composición metamórfica no tienen una influencia importante en la composición de los depósitos de arena (figura 48, 50 y 77).

Figura 77. Relativa estabilidad de cuarzo total (Qt), y disminución de los granos de R a medida que aumenta la distancia de transporte en el tercer segmento del Río Meta. El chert es sumado al cuarzo total. La muestra M9 es la más cercana al sector donde nace el Río Metica y la muestra M4 es la más distal.



La composición de la muestra de lodo tomada en este segmento (M3) se caracteriza por tener un aumento en el contenido de caolinita y cuarzo (30% y 11%, respectivamente), en comparación con la muestra más cercana a la confluencia con el Río Casanare (M14), la cual tiene un contenido del 29% y 5% respectivamente. Tratar de establecer una relación entre la composición de las muestras de lodo y la composición del área fuentes en estas muestras es muy

difícil, tomando en cuenta que estos materiales han pasado por varios ciclos de intemperismo y la caolinita refleja un avanzado estado de meteorización de los depósitos de finos, tomando en cuenta que es un mineral resultante de la intensa meteorización en zonas lluviosas y donde el agua es predominantemente ácida (Boggs, 1987).

7.2 INFLUENCIA DEL TRANSPORTE EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS DE ARENA COLECTADAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META (CHRM)

Según el esquema de clasificación de los sistemas fluviales propuesto por Schumm (1977) y Niño (2004), este factor tiene mayor importancia en la Zona 2 (figura 70). Además, la influencia del transporte en la composición de los depósitos fluviales de arenas es mayor en climas húmedos y tropicales, donde la meteorización mecánica juega un papel importante (Miall, 1996). La influencia del transporte es también controlada por el relieve, el cual depende de las pendientes en las zonas 1 y 2. La influencia del transporte en la composición de los depósitos de arena es controlada por la capacidad que tiene un río de transportar sedimentos y depende también de la cantidad, textura y composición de sedimentos producidos en el área fuente. La pendiente controla la morfología que toman los ríos, que a su vez determina la forma de los depósitos fluviales. Por ejemplo, los ríos en pendientes altas y moderadas pueden tomar formas rectas generando depósitos de barras longitudinales y laterales. La composición de los depósitos es controlada por la meteorización mecánica generada en los sedimentos durante el transporte, principalmente en granos de tamaño arena, donde las partículas se mueven principalmente por saltación y tracción (Folk, 1974; Schumm, 1977; Boggs, 1987; Miall, 1996; Niño, 2004).

La influencia del transporte en la composición de las muestras de arena tomadas

en la CHRM se analiza tomando en cuenta la morfología de los afluentes estudiados; principalmente se han descrito dos tipos: primero, afluentes de morfología recta, a los cuales pertenecen los ríos con área fuente de composición metamórfica (figuras 17 y 70); y segundo, afluentes de morfología meandriforme, como los ríos con área fuente de composición sedimentaria (figuras 18 y 70). Finalmente se realiza un análisis en el cauce principal del Río Meta. El análisis se realizó comparando las características texturales y composicionales de las muestras tomadas en cada afluente y en el cauce principal del Río Meta, considerando que el muestreo se trato de hacer sistemático (ver metodología).

7.2.1 Influencia del Transporte en la Composición de las Muestras de Arena Colectadas en los Afluentes con Morfología Recta. Los afluentes con morfología recta estudiados en el presente trabajo son los Ríos Humadea y Guayuriba, los cuales se describen de sur a norte.

Río Humadea

Este río se encuentra en el extremo suroccidental de la CHRM. La muestra más cercana al área fuente es la M59, a 14 Km aproximadamente. Esta muestra se tomó en el corregimiento de Humadea por la vía que conduce del Municipio de Acacias a Granada, Meta. A partir de este sitio cada muestra se tomo en promedio, aproximadamente a 14 km (ver metodología).

La pendiente en el área fuente es principalmente abrupta con algunos escalonamientos, esto genera que la meteorización química sea baja debido a que en este sector el ángulo de la pendiente sobrepasa el ángulo de reposo del sedimento y la meteorización es básicamente física; por tanto se genera una rápida remoción y un transporte eficiente para trasladar el sedimento (Basú, 1985). Esto se puede apreciar principalmente en la composición de la muestra M62,

donde los R han sufrido principalmente meteorización física asociada a los procesos de transporte. Por tanto, esta muestra conserva las características composicionales del área fuente. Además, como se mencionó en el capítulo sobre la influencia del área fuente en la composición de las arenas, la comparación de los granos de R entre lo esperado y lo encontrado en la muestra, guarda una relación de proporcionalidad entre la composición de los depósitos de arena y la composición de las rocas aflorantes en el área fuente. Aunque las pendientes escalonadas permiten un tiempo de residencia del sedimento estacionario, lo cual ocasiona que minerales muy inestables adquieran una meteorización avanzada, como la glauconita en los fragmentos de roca sedimentaria, aunque este afluente posee la menor área de exposición de rocas sedimentarias y el contenido de glauconita más bajo en comparación con los otros tres afluentes estudiados (figuras 24, 32, 37, 58 y 71). Por esto no se realizó un análisis amplio a la presencia de este mineral como si se hizo en los ríos de morfología meandriforme.

Cuando este afluente abandona el piedemonte para iniciar su recorrido por el sector de los llanos, la pendiente cambia de forma abrupta, y a partir del corregimiento de Humadea se hace moderada. Se aprecia como algunos fragmentos de rocas metamórficas en los depósitos de arena han sufrido una leve meteorización química, reflejada en la oxidación de algunos granos limoarcillosos (figura 30, muestras 59 y 65). La composición de las muestras de arena en el Río Humadea cambia de litoarenitas en el sector más cercano al área fuente a sublitoarenitas, con aproximadamente 45 Km de transporte desde el piedemonte, lo cual se observa en la composición de la muestra M63 ($Qt_{77,3}Fo_{R22,7}$) (figuras 34, 57 y 71). Si se compara la composición de las muestras M62, la cual para este análisis se tomó como la muestra más cercana al área fuente de sedimentos ($Qt_{74,5}Fo_{R25,5}$), y la M65 ($Qt_{75,6}Fo_{R24,4}$) la cual es la más distal al sector fuente, durante los casi aproximadamente 55 kilómetros de recorrido en línea recta que tiene el Río Humadea en la zona 2 desde el piedemonte hasta su confluencia con el Río Guayabero, la composición no tiene una variación marcada (figuras 35 y

71; anexo B). Este leve cambio en la composición sugiere un transporte rápido del sedimento sin permitir que las arenas permanezcan prolongados periodos de tiempo en los depósitos (figura 58). Lo anterior también se refleja en las relaciones de Q_p/Q_t y R_{lgc}/R , para las muestras M62 (0,13 y 0,01 respectivamente) y M65 (0,11 y 0 respectivamente), las cuales no muestran un cambio abrupto (figura 37).

La influencia del transporte también se aprecia en la forma como algunos fragmentos de rocas sedimentarios ganan porosidad debido a la remoción de la glauconita y los feldespatos meteorizados (figuras 34). Además, este afluente tiene una tasa de precipitación alta, que junto a las pendientes moderadas permiten la fácil movilidad de sedimento a través del sector de los llanos (figuras 4 y 24). Otra característica que se puede apreciar en algunos granos de cuarzo es la forma angular a subangular y las superficies abrasivas que se generan durante el movimiento en tracción o saltación a medida que son transportados (figura 59). Con este análisis se puede determinar que en el sector del Río Humadea la erosión es limitada por la meteorización.

Río Guayuriba

El Río Guayuriba se encuentra hacia el nororiente del Río Humadea. La primera muestra de este afluente es la M68, que se tomó en cercanías al Municipio de Acacias a 10 Km aproximadamente del piedemonte, por la vía que conduce del Municipio de Villavicencio al Municipio de Acacias, Meta; a partir de este sitio cada muestra se tomo aproximadamente en promedio a 14 km (ver metodología).

El relieve en el área fuente es básicamente de pendientes altas, con escalonamientos (figura 25), esto genera que la meteorización química ejerza cierta influencia en la composición de los depósitos de arenas en esta zona, tomando en cuenta que la tasa de precipitación es muy alta, y no se necesitaría un tiempo de residencia prolongado para generar meteorización en minerales

inestables como la glauconita, que adquieren una meteorización avanzada. En este afluente el contenido de glauconita es moderado, en comparación con los afluentes que nacen en áreas fuentes con rocas sedimentarias (figuras 25, 33, 37 y 58). Además, el análisis realizado entre lo esperado en la producción de granos de R y lo obtenido en la muestra tomada en el sector más cercano al área fuente, muestra como algunos granos de Rs son menos resistentes y fácilmente meteorizados, tanto física como químicamente. Pero, en el sector fuente la principal causa de meteorización es el transporte, ocasionando que los sedimentos que llegan a la zona 2 tengan aún las características composicionales del área fuente. Sin embargo, la meteorización química tiene efecto solo en algunos minerales inestables (e.g. glauconita y feldespatos), en los sectores donde la pendiente cambia y tiende a ser escalonada (figuras 25, 34 y 58).

Cuando este afluente abandona el piedemonte para iniciar su recorrido por el sector de los llanos, la pendiente disminuye en forma moderadamente abrupta, y a partir del Municipio de Acacias es moderada (figura 25). En este sector se aprecia como en la muestra M68, que es la más cercana al área fuente, algunos granos han sido meteorizados químicamente, como fragmentos de limolitas feldespáticas con glauconita y arcillolitas (figura 33). La figura 72 muestra que en los aproximadamente 80 Km de recorrido que tiene el Río Guayuriba desde el piedemonte hasta la confluencia con el Río Meta, no se observa una tendencia marcada en la composición de las muestras de arena. La composición en la muestra M68 es de **Qt_{47,8}F_{1,3}R_{50,9}** y en la muestra M77, que es la más distal es de **Qt_{53,3}F_{0,4}R_{46,3}**, lo cual muestra una disminución con el aumento en la distancia de transporte. El contenido de granos de R a medida que aumenta la distancia de transporte es variable, inicia en la muestra M68 con un contenido del 50,9%, después de 15 Km de transporte aproximadamente en la muestra M71 pasa a 45%. La disminución en la muestra M71 es atribuida al transporte y la meteorización química, pero a 30 km de transporte aproximadamente medidos desde la muestra M68, el contenido de R en la muestra 73 aumenta a 48,3%,

generando probablemente por el aporte de sedimentos procedentes de otro afluente que desemboca en el Río Guayuriba o por cambios en el volumen y la velocidad del caudal. Esta tendencia al aumento solo se presenta en las muestras M73 y M76 (anexo B).

La relación de Q_p/Q_t entre las muestras M68 (0,28), M71 (0,28) y M73 (0,28) muestra una mayor influencia de la meteorización física en la composición de los depósitos de arena, debido probablemente a un rápido transporte. Entre las muestras M73 (0,28) y M77 (0,14) la relación entre estos tipos de granos muestra una mayor influencia de la meteorización química, tomando en cuenta que en este sector el río tiene la pendiente más baja y el tiempo de residencia de las arenas en los depósitos es mayor (figura 37). La distribución granulométrica refleja una mayor heterogeneidad en las muestras M68, M71 y M73, por el contrario en las muestras M73, M76 y M77 la distribución es más homogénea hacia los tamaños finos, posiblemente los sedimentos menos resistentes a la meteorización química han sido reducidos en tamaño a medida que son transportados (figuras 25 y 35).

Considerando que la tasa de precipitación es alta en este afluente, el transporte podría movilizar sedimento por todo el sector de los llanos, sin permitir que permanezca por prolongados periodos de tiempo en los depósitos (figuras 4, 57 y 58). Aunque, es posible apreciar superficies de disolución en algunos granos de cuarzo y sobrecrecimiento en otros, estos granos tienen formas entre subangulares a subredondeados (figura 60). Por consiguiente lo anterior refleja que la meteorización mecánica actúa alternamente con la meteorización química.

Con el análisis anterior se puede clasificar el Río Guayuriba principalmente como un afluente donde la erosión es controlada principalmente por la meteorización.

7.2.2 Influencia del Transporte en la Composición de las Muestras de Arena Colectadas en los Afluentes con Morfología Meandriforme. Los afluentes con

morfología meandriforme estudiados en el presente trabajo son los Ríos Cusiana y Ariporo, los cuales se caracterizan por tener rocas sedimentarias en el área fuente, además algunos granos de R contienen glauconita que es susceptible a la meteorización física y química durante el transporte. A continuación se describen estos afluentes de sur a norte.

El relieve en el área fuente de los ríos Cusiana y Ariporo es abrupto, con pendientes altas y algunos escalonamientos; el cambio de la pendiente entre el piedemonte y los llanos es rápido, suavizándose en el sector de los llanos (figuras 26 y 27). Esto genera que el transporte sea eficiente removiendo el sedimento producido en el sector fuente de sedimentos, aunque la tasa de precipitación es muy alta y en cortos periodos de residencia los minerales inestables pueden sufrir cierto grado de meteorización, esto se refleja en la matriz arcillosa de algunos fragmentos de limolitas arcillosas que presentan oxidación, lo cual se aprecia en el Río Cusiana en la muestra M78 que es la más cercana al área fuente, donde se observan algunos granos arcillolimosos alterados a hematita y limonita (figuras 39 y 41). La glauconita en estos afluentes es abundante en comparación con los afluentes con morfología recta, y en el sector del piedemonte se encuentra con baja meteorización química conservando su color verde característico (figuras 38 y 40).

Río Cusiana

El Río Cusiana se encuentra hacía el centro de la CHRM. La primera muestra de este afluente se tomó en cercanías al Municipio de Tauramena a 5 Km aproximadamente del piedemonte, por la vía denominada la Troncal del Llano, en el departamento de Casanare; a partir de este sitio cada muestra se tomo en promedio aproximadamente a 20 km (ver metodología).

La composición de la muestra M78 es de litoarenita (**Qt61FoR39**) y

aproximadamente a los 45 Km de transporte desde el piedemonte, en la muestra M82 cambia a sublitoarenita ($Qt_{79,9}F_{0,4}R_{19,7}$). Este cambio debe estar asociado a la variación en el régimen de precipitación y la disminución de la pendiente, indicando que el transporte después de esta distancia, no remueve el sedimento de los aluviones de forma rápida (figuras 4, 26, 57 y 73; anexo B). Realizando el mismo análisis, pero utilizando la presencia de glauconita en las muestras de arena, se observa la glauconita con color verde en la muestra M78 sin evidencias de meteorización química, pero con aproximadamente 45 Km de transporte medidos desde el piedemonte, el contenido de glauconita en la muestra M82 disminuye en un 80% y gana meteorización química reflejado en el cambio a color café, reafirmando que el tiempo de residencia de estas arenas en los depósitos es mayor (figuras 4, 39, 42, 44, 57 y 58). En la figura 43 se observa como después de los 45 Km de transporte la madurez composicional también aumenta debido a que los procesos de meteorización química alteran los minerales inestables, incrementando el contenido de granos más estable como el Qm.

En las imágenes tomadas en SEM, se observa como a medida que aumenta la distancia de transporte la forma de los granos de cuarzo cambia. La muestra M78 se caracteriza por tener granos de forma angular, a los aproximadamente 45 Km de transporte desde el área fuente cambia a subangular y a los casi 100 Km de transporte cambia a subredondeado. Además, después de los 45 Km de transporte los granos de cuarzo muestran también huellas de disolución generada como producto de los procesos de meteorización química (figura 61).

Los análisis composicionales indican que este afluente se caracteriza por tener un régimen de erosión controlada por el transporte.

Río Ariporo

El Río Ariporo se encuentra hacia el nororiente de la CHRM. La primera muestra

de este afluente se tomó en cercanías al Municipio de Paz de Ariporo a 5 Km aproximadamente del área fuente, por la vía denominada la Troncal del Llano en el departamento de Casanare. A partir de este sitio cada muestra en promedio se tomo aproximadamente a 40 km (ver metodología).

La composición de la muestra M78 es de litoarenita (**Qt_{61,1}FoR_{38,9}**) y aproximadamente después de los 25 Km de transporte medidos desde el piedemonte cambia a sublitoarenita en la muestra M87 (**Qt_{86,7}FoR_{13,3}**). Este cambio composicional debe estar asociado con la variación en el régimen de precipitación y la disminución de la pendiente. Esto indica que el transporte después de esta distancia no remueve el sedimento de los aluviones de forma rápida, aumentando el tiempo de residencia del sedimento en los depósitos (figuras 4, 27, 57 y 74; anexo B). Utilizando como indicador de la influencia del transporte la presencia y el estado de la glauconita en las muestras de arena, se observa que en la muestra M85 no tiene evidencias de meteorización química, debido a que se reconoce fácilmente y conserva su característico color verde, pero con aproximadamente 25 Km de transporte medidos desde el piedemonte, el contenido de glauconita en la muestra M87 disminuye en un 40% y gana meteorización química reflejado en el cambio de color el cual pasa a café (figuras 4, 40, 42, 44, 57 y 58). En la figura 43 se observa como después de los 25 Km de transporte medidos desde el piedemonte, la madurez composicional también aumenta debido a que los procesos de meteorización química alteran los minerales inestables, incrementando el contenido de granos más estable como el Qm. Las muestras de este afluente se caracterizan por tener los mayores contenidos de granos de cuarzo (figura 43).

En las imágenes de granos de cuarzo tomadas en SEM, se observa como a medida que aumenta la distancia de transporte la forma de los granos cambia. La muestra M85 se caracteriza por tener granos de forma subangular, a los aproximadamente 80 Km de transporte medidos desde el piedemonte la forma de

los granos cambia a su redondeado, y a los casi 220 Km de transporte cambia a bien redondeado. Además, después de los 80 Km de transporte los granos de cuarzo muestran también huellas de disolución generada como producto de los procesos de meteorización química, aunque no es fácil identificar entre procesos de disolución relictos de pasados ciclos de sedimentación y huellas de disolución recientes (figura 62).

Los análisis composicionales indican que este afluente se caracteriza por tener un régimen de erosión controlada por el transporte.

7.2.3 Influencia del Transporte en la Composición de las Muestras de Arena Colectadas en el Cauce Principal del Río Meta. La influencia del transporte en el cauce principal del Río Meta está relacionada con la pendiente en el sector de los llanos, donde el análisis se realiza teniendo en cuenta los tres segmentos que se delimitaron durante los resultados.

Primer segmento

La pendiente de este segmento es baja y tiene una morfología meandriforme (figuras 9 y 28). Se analiza la influencia del transporte tomando en cuenta que este segmento recibe al suroccidente los sedimentos procedentes del área fuente con rocas metamórficas y hacia el nororiente los sedimentos procedentes del área con rocas sedimentarias principalmente. La muestra M67 es la primera de este segmento y se tomó en las cercanías del Municipio de San Carlos de Guaroa, Meta; a partir de este sitio cada muestra se tomó en promedio cada 4 km aproximadamente, antes y después de pasar por la confluencia de un afluente que naciera en la cordillera oriental (ver metodología).

La composición de la muestra M67 es de sublitoarenita (**Qt76F0R24**), pero está en el límite con las litoarenitas y aproximadamente a los 45 Km de transporte

medidos desde la muestra M67, en la muestra M55 cambia a litoarenita ($Qt_{66,5}F_{0}R_{33,5}$). Este cambio en la composición debe estar influenciado por el aporte de sedimentos con mayor contenido de granos de R, procedentes de los afluentes que confluyen con el primer segmento hacia el norte, lo cual indica que la tasa en la que estos ríos aportan sedimentos es mayor a la tasa en la el transporte remueve el sedimento y la meteorización química altera los depósitos (figuras 28, 48, 51, 57 y 75; anexo B). Utilizando la presencia de glauconita en las muestras de arena como indicador de la influencia del transporte, en la muestra M58 este mineral se observa sin evidencias de meteorización física y química, tomando en cuenta que no presenta remoción y su color es verde, pero con aproximadamente 45 Km de transporte medidos desde la muestra M58, el contenido de glauconita en la muestra M52 disminuye, y se observa de forma residual debido a procesos de remoción durante el transporte, con meteorización química reflejada en el cambio a coloración a tonos café (figuras 4, 47, 48, 50, 57 y 58). En la figura 49 se observa como después de los 45 Km de transporte la madurez composicional disminuye, debido a que los procesos de meteorización física y química no son eficientes, permitiendo que el contenido de granos de R en los depósitos incremente.

En las imágenes de granos de cuarzo tomadas en SEM, se observa como el transporte no remueve de forma eficiente los sedimentos o la energía del medio es baja y por consiguiente se pueden observar sobrecrecimientos. Esta ineficiencia del transporte para generar remoción eficiente se puede identificar tomando en cuenta que la forma de los granos está en un rango entre granos angulares a subredondeados. Esta diversidad en la forma puede ser producida porque los granos que son aportados por los ríos de morfología recta llevan cuarzoes de primer ciclo procedentes de áreas fuente donde afloran rocas metamórficas y han sido influenciados principalmente por la meteorización física, a medida que aumenta la distancia de transporte el tiempo de residencia del sedimento en los depósitos aumenta, tomando en cuenta que este segmento tiene una morfología

meandriforme y sumado a que los granos aportados por los ríos que llevan sedimentos procedentes de áreas fuente donde afloran rocas sedimentarias llevan granos de cuarzo con más de un ciclo de sedimentación (figura 63). La muestra M67 es la más cercana al nacimiento y se caracteriza por tener granos de forma angular, a los aproximadamente 100 Km de transporte medidos desde esta muestra cambia a subredondeado, además la granulometría de los depósitos también cambia cuando se supera esta distancia, tomando en cuenta que el tamaño arena gruesa prácticamente desaparece, lo cual permite identificar que después de esta distancia también hay una variación textural en los depósitos de arenas (figura 27). Utilizando la anterior información se puede concluir que los cambios en las características texturales y composicionales de los depósitos no suceden a distancias muy diferentes, y no son producidos sólo por la influencia de un factor, tomando en cuenta que el cuarzo en tamaño arena no gana redondez fácilmente (Boggs, 1987).

Los análisis composicionales indican que en este afluente la influencia de la meteorización física y química se enmascaran, y los dos actúan de forma alterna sin presentar evidencias claras de su influencia en la composición de los depósitos, esto se produce porque en este segmento la tasa de aporte de sedimentos es mayor a las tasas de meteorización física y química.

Segundo segmento

La pendiente de este segmento es moderada y tiene una morfología trezada (figuras 9 y 28). Se analiza la influencia del transporte tomando en cuenta que este segmento recibe los sedimentos procedentes del área fuente con rocas sedimentarias principalmente. La muestra M41 es la primera de este segmento y se tomó en las cercanías de la confluencia entre los ríos Manacacias y Meta; a partir de este sitio cada muestra se tomó en promedio cada 4 km

aproximadamente, antes y después de pasar por la confluencia de un afluente que naciera en la Cordillera Oriental (ver metodología).

La composición de la muestra M41 es de litoarenita, pero está entre el límite con las sublitoarenitas (**Qt_{74,8}FoR_{25,2}**) y su tendencia es hacia el aumento de los R durante aproximadamente 50 Km de transporte medidos desde esta muestra, lo cual se puede observar en la muestra M35 (**Qt_{65,8}FoR_{34,2}**), a partir de esta distancia el contenido de R comienza a disminuir durante aproximadamente 150 Km de transporte medidos desde la muestra M41, y se puede observar en la composición de la muestra M19 (**Qt₈₀Fo₃R_{19,7}**). La distancia de transporte entre la muestra M41 y la muestra M24, la cual es la primera muestra de composición sublitoarenita (**Qt₇₆FoR₂₄**), es de aproximadamente 200 Km. Esto indica que el transporte es eficiente en remover los sedimentos de los depósitos sin permitir que permanezcan por prolongados periodos de tiempo en los depósitos (figuras 28, 48, 51, 57 y 76; anexo B). La glauconita en este segmento aún se puede observar pero de forma residual y meteorizada, principalmente en la muestra M35, con aproximadamente 200 Km de transporte medidos desde la muestra M41, después de ésta distancia desaparece casi por completo (figuras 4, 51, 53 y 58). En la figura 49 se observa como a medida que aumenta la distancia de transporte entre las muestras de arena del segundo segmento del Río Meta, la tendencia en los depósitos es a aumentar en su madurez textural, pero el cambio no es súbito ni marcado, indicando que el principal factor que influye en la composición de las muestras de arena de este segmento es el transporte (figura 51 y 53).

En las imágenes de granos de cuarzo tomadas en SEM de las muestras M35 y M27, se observan granos subangulares a subredondeados con evidencia de disolución fósil producidos posiblemente por ciclos de sedimentación anterior. También se observan huellas de abrasión con evidencias de disolución producidos durante el almacenamiento temporal en los depósitos aluviales y marcas de presión producidas posiblemente en un ciclo de sedimentación anterior (figura 64).

Esto indica que el transporte ha sido eficiente para remover y trasladar estos granos sin permitir que la meteorización química reciente borre estas huellas de ciclos de sedimentación anterior. Granulométricamente los depósitos en este segmento son mejor sorteados que en el primer segmento, prevaleciendo los tamaños arena media y fina muy por encima de las demás, esto refleja una buena selección hidrodinámica durante el transporte.

Los análisis composicionales indican que este afluente se caracteriza por tener un régimen de erosión controlada por la meteorización.

Tercer segmento

Este segmento se caracteriza por tener una morfología combinada entre río trezado y meándrico. Recibe los sedimentos transportados por los afluentes que nacen en los sectores donde el área fuente es de composición principalmente de rocas sedimentarias. La pendiente de este segmento es moderadamente baja al oeste y baja hacia el este (figura 28). La muestra M9 es la más cercana al inicio del segmento y tomó en las cercanías de la confluencia entre los Ríos Casanare y Meta, la muestra M4 es la más cercana al final de este segmento y se tomó cerca a la confluencia entre los ríos Meta y Orinoco; a partir de este sitio cada muestra se tomó en promedio a 70 km aproximadamente (ver metodología).

La composición de la muestra M9 es de sublitoarenita, pero está entre el límite con las litoarenitas (**Qt_{75,9}F_{0,3}R_{23,8}**) y su tendencia es hacia el aumento en el contenido de Qt a medida que aumenta la distancia de transporte, como se puede observar en la muestra M4 (**Qt_{88,2}F₀R_{11,8}**), cerca de la confluencia entre los ríos Meta y Orinoco. La distancia de transporte entre la muestra M9 y la muestra M4 es de aproximadamente 250 Km. En la figura 77 se observa que existe una tendencia a la madurez composicional entre las muestras M9 y M8, y las muestras M6 y M4. Entre M9 y M8 hay aproximadamente una distancia de 100 Km y el contenido de

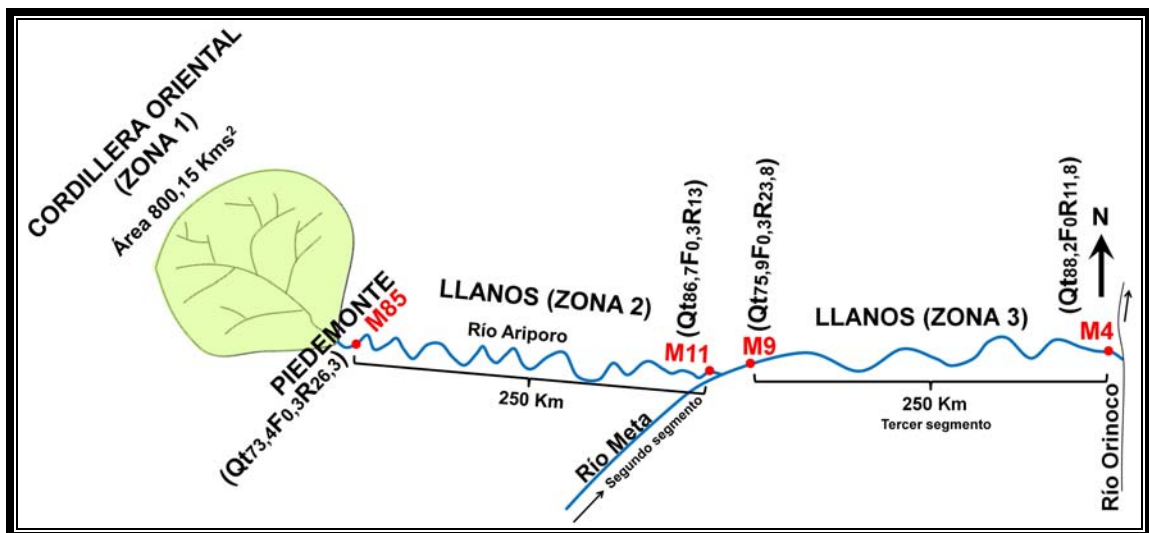
Qt pasa del 75,9% al 82,6%, y entre las muestras M6 y M4 hay aproximadamente una distancia de 150 Km y el contenido de Qt pasa del 78,1% al 88,2%. Esto indica que a medida que aumenta la distancia de transporte el contenido de cuarzo también aumenta, como resultado de una baja influencia del transporte y un alto nivel de meteorización de los granos de R en los aluviones. Otro rasgo importante es el comportamiento entre las muestras M8 y M6, el cual es hacia el aumento en el contenido de granos de R, producido posiblemente por la contribución de sedimentos transportados por tributarios que drenan el granito de Pargüaza y porque en este sector el transporte no permite la acumulación del sedimento en los aluviones por periodos prolongados (figuras 28, 48, 54, 57 y 77; anexo B). La glauconita en este segmento no permite realizar un análisis de la influencia del transporte, tomando en cuenta que está muy meteorizada y se encuentra de forma residual o ausente (figuras 51, 55 y 58). En la figura 49 se observa como a medida que aumenta la distancia de transporte entre las muestras de arena del tercer segmento del Río meta la madurez textural también aumenta pero más rápidamente en comparación con el segundo segmento, lo cual no indicaría una marcada influencia del transporte y si de la prolongada permanencia de las arenas en los aluviones (figura 51 y 54).

En las imágenes de granos de cuarzo tomadas en SEM, se observan granos angulares a redondeados con evidencia de disolución reciente en la muestra M9. También se observan marcas de presión producidas posiblemente en un ciclo de sedimentación anterior (figura 64). Esto indica que el transporte ha sido eficiente para remover y trasladar estos granos sin permitir que la meteorización química reciente borre estas huellas de ciclos de sedimentación anterior.

Los análisis composicionales indican que en este afluente la influencia de la meteorización física y química actúan de forma alterna sin encontrar evidencias concretas de cuál de las dos prima, y en el sector entre la muestra M8 y M6 prima la influencia del transporte.

En este segmento es importante destacar que si la longitud en línea recta del Río Ariporo es sumada a la longitud en línea recta del tercer segmento del Río Meta, entre los dos suman aproximadamente 500 Km de recorrido. Los resultados composicionales muestran como al inicio de estos dos ríos en las muestras M85 y M9, el contenido de Qt es en promedio el 75%, después de aproximadamente 250 Km de transporte que es en promedio el recorrido de estos dos tramos hasta sus desembocaduras, el contenido de Qt en las muestras M11 y M4 aumenta en promedio en un 88%, el cual es el máximo valor en el contenido de Qt adquirido por los depósitos arenas en los ríos que provienen de la Cordillera Oriental y en los depósitos de arena en el cauce principal del Río Meta (figura 78).

Figura 78. Esquema donde se ilustra la ubicación de las muestras M85 y M11 en el Río Ariporo, M9 y M4 en el tercer segmento del Río Meta. Note que los dos tienen aproximadamente la misma distancia de recorrido.



Los resultados composicionales antes mencionados son contradictorios con los datos mostrados por Meade (2007) y Johnsson et al. (1991), donde estos autores

encuentran que la composición de las arenas en el sector del Río Orinoco y cerca de la desembocadura de los afluentes que provienen de la Cordillera Oriental tienen un contenido mayor al 90% en Qt con una tendencia al aumento. Esta diferencia puede ser causada por la selección de los sitios de muestreo y el tipo de muestreo (ver antecedentes), tomando en cuenta que algunos afluentes solo remueven y re trabajan el material depositado en los aluviones, como es el caso del Río Manacacias, donde se tomó la muestra M40 la cual tiene una composición de $Qt_{95,3}Fo_{R4,7}$. Además, el curso principal del Río Orinoco también recibe los sedimentos del sector este (Escudo de Guyana), donde proceden los sedimentos más cuarzosos.

7.3 INFLUENCIA DEL CLIMA EN LA COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS COLECTADAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO META

La influencia del clima en la composición de los depósitos de arenas de una cuenca hidrográfica se basa principalmente en los diferentes regímenes pluviométricos dentro de la cuenca, en el tiempo de residencia de las arenas en los depósitos y en el tipo de vegetación (figura4) (Schumm, 1977; Boggs, 1987). En las figuras 3 y 4 se observa que el clima no tiene una distribución homogénea en toda la cuenca, tomando en cuenta que el agua juega un papel dominante en la meteorización química (Boggs, 1987). Además las figuras 4 y 5 permiten identificar una zonación en los niveles de precipitación y en el tipo de vegetación, la cual varía de oriente a occidente. En los sectores de la cuenca con mayor precipitación como en el área fuente, la vegetación que predomina es de selva ecuatorial, y en la zona con menores niveles de precipitación como en los llanos distales (Zona 3) la vegetación que predomina es de sabanas y estepas.

En la Zona 1, donde el relieve es abrupto y la precipitación supera los 3000 mm al año, las muestras tienen un estadio inicial de meteorización, el cual es identificado

con facilidad en algunas especies minerales como la moscovita y la clorita en el caso del área fuente con rocas metamórficas, tomando en cuenta que se observan en algunos granos de R con alteraciones debido a procesos de hidrólisis y/o exposición subaérea. La glauconita y el feldespato en los sectores fuente con rocas sedimentarias también han sufrido meteorización reflejada en leves cambios de coloración de la glauconita y la presencia de sericita por alteración de los feldespatos en algunos granos. En la Zona 2, donde el relieve tiene pendientes moderadas a bajas y niveles de precipitación entre 3000 y 2000 mm al año, el grado de meteorización es moderado; se aprecia el resultado inicial de los procesos de alteración, pero se reconocen aún algunas especies minerales susceptibles a la meteorización química como la clorita, la glauconita y el feldespato. Las muestras en Zona 3, donde la pendiente es baja y el régimen de precipitación está por debajo de los 2000 mm al año, se caracteriza por presentar un nivel de meteorización moderado a alto, reflejado en el contenido de minerales de arcilla como illita, caolinita y el cuarzo (Schumm, 1977; Boggs, 1987; Niño, 2004).

La influencia del clima en la composición de los depósitos de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta es analizada tomando en cuenta la composición de las rocas aflorantes en el área fuente.

7.3.1 Influencia del Clima en la Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Metamórfica y Metasedimentaria. Estos afluentes de sur a norte son los Ríos Humadea y Guayuriba, donde la temperatura en el sector del área fuente está entre los 8 °C (Zona 1) y 24 °C (zona 2). En este mismo sector de la cuenca, el régimen o tasa de pluviosidad es mayor a los 3000 milímetros por año en la Zona 1, y entre los 2000 y 3000 milímetros por año en la Zona 2 (figuras 3, 4 y 70). La vegetación es principalmente de selva ecuatorial en el área fuente (Zona 1) y algunas sabanas

en los sectores de los llanos, hacia el Municipio de San Carlos de Guaroa y la desembocadura en el Río Metica (Zona 2). Los sectores de muestreo fueron en la Zona 2, donde la temperatura está entre los 24 y 28 °C (figura 3).

En la Zona 2 las condiciones de pluviosidad son similares, la vegetación cerca al área fuente es abundante, probablemente por ser zonas donde se encuentran arcillas de alto intercambio catiónico, como la illita, en suelos relativamente jóvenes donde la meteorización química no ha sido intensa (figuras 5, 66 y 67) (Boggs, 1987). Sin embargo, la longitud de los dos afluentes estudiados en este sector es diferente, por esto se hará el análisis de cada uno por separado.

Río Humadea

En este río se tomaron dos muestras de lodo. La muestra M61 es la más cercana al área fuente y la M66 la más distal. La composición de la fracción arcilla de estas muestras se presenta en la tabla 14. Note como en la muestra M61 el contenido de illita es del 53% y en la muestra M66 disminuye al 39%. En contraste, el contenido de caolinita y cuarzo aumentan debido a la exposición y tiempo de residencia que tienen los sedimentos en los depósitos (figura 66). Pero ésta marcada variación en la composición de las arcillas no se refleja en la madurez composicional de las muestras de arena, que sumado a la baja redondez de los granos de cuarzo y las marcas de abrasión generadas durante el transporte indican una baja influencia de la meteorización química (figuras 35, 35 y 59).

La clorita pasa del 13% en la muestra M61 al 15% en la muestra M66. Esta leve variación no permite estimar cuál es el efecto del clima en los sedimentos del Río Humadea pero si funciona como indicador de procedencia para los sedimentos. Una baja influencia de la meteorización química en este sector se infiere por: la baja madurez composicional de las muestras de arena, la baja redondez de los

granos de cuarzo, las evidentes superficies de abrasión y el desgaste por la fricción durante el transporte (figuras 35, 35 y 59).

Río Guayuriba

En este río se tomó una muestra de lodo (M70) y dos en el Río Metica, una cerca a la confluencia con el Río Guayuriba (M56) y otra cerca al sector donde confluyen los ríos Humea y Metica (M51). La muestra M70 es la más cercana al área fuente y la M51 la más distal. El contenido de la illita aumenta con la distancia de 47 al 62%; sin embargo, el contenido de clorita y caolinita es variable (ver Tabla 16). Estos cambios en el contenido de los minerales de arcilla son el producto de un rápido transporte desde el área fuente y de una tasa de aporte de sedimento alta, lo cual no permite que las condiciones de acumulación y el clima alteren químicamente estos minerales en los depósitos (figuras 57, 67, 72 y 75). Estas condiciones de acumulación son también apreciadas en la composición de las arenas (figuras 34, 35, 42, 44, 59 y 60).

Además cabe resaltar que la muestra M56 tiene un pequeño contenido de pirofilita el cual sumado a la presencia de la clorita permite ser utilizado como indicador de procedencia para áreas fuente con exposición de rocas metamórficas de bajo grado (Frey y Robinson, 1999). La pirofilita se preserva aún en las muestras principalmente por el mecanismo de sedimentación y reemplazamiento antes mencionado.

7.3.2 Influencia del Clima en la Composición de las Muestras Colectadas en los Afluentes con Área Fuente de Composición Sedimentaria. Estos afluentes de sur a norte son los Ríos Cusiana y Ariporo, donde en la Zona 1 la temperatura es de 8 °C, la tasa de pluviosidad es mayor a los 3000 milímetros por año y la vegetación es principalmente de selva ecuatorial, en la Zona 2 la

temperatura es de 24 °C, la tasa de pluviosidad está entre los 2000 y 1000 milímetros por año y la vegetación es de sabanas, principalmente hacia la confluencia con el Río Meta (figuras 3 y 4).

En los sectores de muestreo la temperatura está entre los 24 y 28 °C, las condiciones de pluviosidad son similares y la vegetación en el sector de los llanos es poca (Zona 2) (figuras 5, 68 y 69). La poca vegetación es influenciada probablemente porque se encuentran arcillas de bajo intercambio catiónico como la caolinita, en suelos donde la meteorización química ha sido intensa (Schumm, 1977; Boggs, 1987; Niño, 2004). Sin embargo, debido a que la longitud de los dos afluentes estudiados en este sector es diferente, se hará el análisis de cada uno de ellos por separado.

Río Cusiana

En este río se tomó la muestra de lodo M79 en el sector más cercana al área fuente y la muestra M28 que es la más distal se colectó en el segundo segmento del Río Meta. El Río Cusiana se caracteriza por tener un régimen de precipitación cerca al área fuente entre 3000 y 2000 mm por año, después de los aproximadamente 60 Km de transporte medidos desde el piedemonte disminuye entre los 2000 y 1000 mm por año. La morfología de este afluente es principalmente de ríos meandricos. El segundo segmento del Río Meta se destaca por tener un régimen de precipitación entre los 2000 y 1000 mm por año con morfología de ríos trenzados (figuras 10 y 28).

La composición de la fracción arcilla en estas muestras (ver tabla 18) presenta un comportamiento opuesto al observado en el Río Guayuriba. Mientras el contenido de illita disminuye con la distancia de 63 al 43%, el contenido de caolinita aumenta de 22 al 32% (Figura 68). La illita disminuye debido a la intemperización de los suelos, que al pasar más tiempo en los depósitos sufre una intensa lixiviación e

hidrólisis, removiendo así los cationes móviles interlaminares en el mineral. Este proceso favorece el aumento de caolinita (Boggs, 1987).

La composición de las muestras de arena cambia también con el aumento del tiempo de residencia de las arenas en los depósitos fluviales. La muestra M78 que fue tomada en un sector con una tasa de precipitación entre 3000 y 2000 mm por año, tiene una composición de **Qt₆₁FoR₃₉** y en la muestra M38 que es la más distal y fue tomada en un sector con una tasa de precipitación entre 2000 y 1000 mm por año, la composición es **Qt_{75,4}F_{1,4}R_{23,2}**. Note como el contenido de Qt aumenta significativamente mientras el contenido de granos de R disminuye como consecuencia del prolongado tiempo que permanece el sedimento en los depósitos, facilitando la acción de la meteorización química reflejado en la formación de sobrecrecimientos y huellas de disolución (figuras 43, 45 y 61). Pero en la muestra M27 la composición es de **Qt_{74,7}FR_{25,3}**, lo cual refleja una mayor influencia del transporte para remover el sedimento e impedir que la madurez composicional aumente (figuras 42 y 44). Estos cambios composicionales son el producto de un rápido transporte en el segundo segmento del Río Meta y de una tasa de aporte de sedimento alta, la cual no permite que las condiciones de acumulación y el factor climático meteoricen químicamente estos minerales (figuras 57 y 75).

También es posible identificar la influencia del clima observando el cambio en el estado de la glauconita. En el sector cerca al área fuente donde el río aún tiene una pendiente moderada y no hay una morfología meandriforme marcada, este mineral se observa sin alteración química, pero en el sector donde la morfología es meandrica y el sedimento permanece por prolongados periodos en las barras puntuales, la glauconita se observa con alteraciones químicas reflejadas en la presencia residual y el cambio de color del mineral (figuras 39 y 58). El tiempo de residencia puede ser inferido por la formación de óxidos durante la exposición sub aérea, lo cual refleja la intensidad de los procesos químicos en los depósitos

(Boggs, 1987) (figura 41). Esto indica que la influencia de la meteorización química es mayor que la influencia del transporte en la composición de las arenas del Río Cusiana. En el Río Cusiana se presenta un régimen de erosión limitado por el transporte, pero en el segundo segmento del Río Meta la erosión es limitada por la meteorización.

Río Ariporo

En este río se tomó la muestra de lodo M86 en el sector más cercana al área fuente y dos muestras en el tercer segmento del Río Meta, las muestras M14 y M3 que son más distales. El Río Ariporo se caracteriza por tener un régimen de precipitación cerca al área fuente entre 3000 y 2000 mm por año, después de los aproximadamente 20 Km de transporte medidos desde el piedemonte disminuye entre los 2000 y 1000 mm por año. La morfología de este afluente es principalmente de ríos meandricos. El tercer segmento del Río Meta se destaca por tener un régimen de precipitación entre los 2000 y 1000 mm por año con morfología entre ríos trenzados y meandricos (figuras 10 y 28).

La composición de la fracción arcilla de estas muestras se presenta en la tabla 20. El contenido de illita se comporta de forma contraria a la caolinita, cuando la illita aumenta la caolinita disminuye y viceversa, pero después de 250 Kms de transporte la illita tiende a disminuir y la caolinita se mantiene casi estable (figura 69). El contenido de arcillas puede relacionarse con la vegetación del Río Ariporo, considerando que hacia el sector de los llanos la vegetación es escasa (caolinita>illita) y a medida que el río se acerca a la confluencia con el Río Meta la vegetación aumenta considerablemente (illita>caolinita) (figuras 2 y 5).

De otra parte el Río Casanare aporta gran cantidad de arcillas con alto potencial de intercambio catiónico (e.g. illita) que permite el mayor desarrollo de vegetación tropical en los sectores cercanos a la confluencia entre los ríos Meta y Casanare

(Schumm, 1977; Boggs, 1987; Niño, 2004).

La composición de las muestras de arena también cambia con el aumento en el tiempo de residencia de las arenas en los depósitos. De este modo la muestra M85 que fue tomada en un sector con una tasa de precipitación entre 3000 y 2000 mm por año, tiene una composición de **Qt_{73,4}F_{0,3}R_{26,3}**, la muestra M11 que está cerca a la confluencia con el Río Meta y fue tomada en un sector con una tasa de precipitación entre 2000 y 1000 mm por año, la composición es **Qt_{86,7}F_{0,3}R₁₃**, y en la muestra M4 que fue tomada en un sector con una tasa de precipitación menor a los 2000 mm por año, la composición es de **Qt_{88,2}F₀R_{11,8}**. Al igual que en el Río Cusiana el contenido de Qt aumenta significativamente mientras el contenido de granos de R disminuye como consecuencia del prolongado tiempo que permanece el sedimento en los depósitos, facilitando la acción de la meteorización química reflejada en las huellas de disolución y la forma subredondeada a redondeada de los granos (figuras 40, 43, 45, 48, 49, 51, 62 y 65).

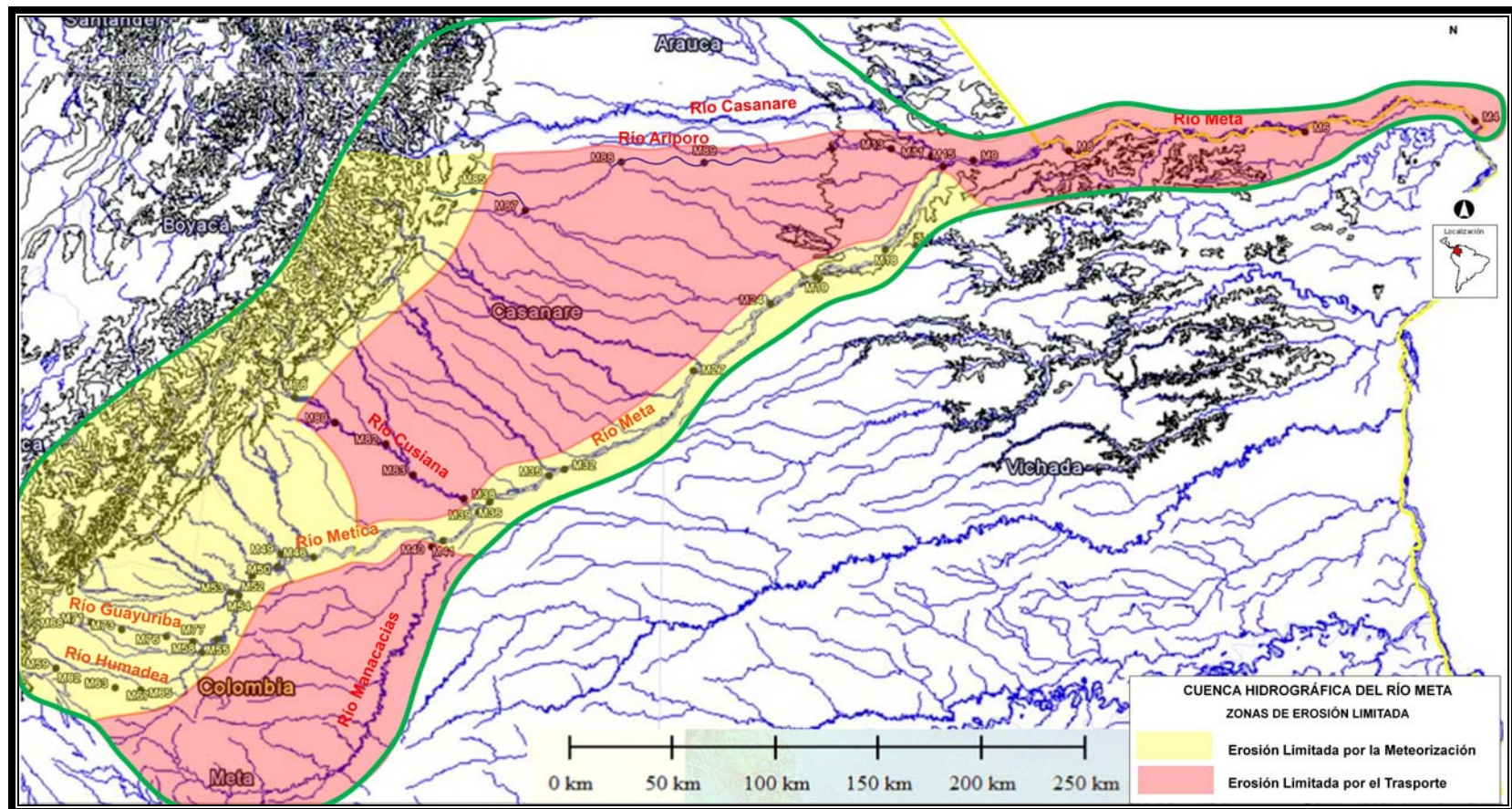
En este afluente también es posible identificar la influencia del clima observando el estado de la glauconita. En el sector cerca al área fuente donde el afluente aún tiene una pendiente moderada y no hay una morfología meandriforme marcada, este mineral se observa sin alteración química, pero en el sector donde la morfología meandrica es marcada y el sedimento permanece por periodos prolongados de tiempo en las barras puntuales, la glauconita se observa con alteraciones químicas reflejadas en el estado residual y el cambio de color del mineral hasta llegar a su total desaparición (figuras 40 y 58).

El análisis de resultados indica que en el Río Ariporo predomina un régimen de erosión limitado por el transporte y en el tercer segmento del Río Meta hay una alternancia, al inicio los procesos son predominantemente limitados por el transporte y luego son principalmente limitados por la meteorización.

7.4 PONDERACION DE FACTORES QUE CONTROLAN LA COMPOSICION DE LAS ARENAS Y LODOS FLUVIALES DE LA CUENCA DEL RIO META

Se ha demostrado una diferencia en la forma cómo actúa el clima y el transporte en distintos sectores de la Cuenca Hidrográfica del Río Meta (CHRM). En el sector del suroccidente de la cuenca donde los ríos tienen una morfología recta, la composición de los depósitos de arena están principalmente influenciados por los fenómenos de transporte y la erosión es limitada por la meteorización. Hacia el nororiente de la cuenca donde los ríos tienen morfología meandriforme, la composición de las arenas está principalmente influenciada por el clima y la erosión es limitada por el transporte (figura 79).

Figura 79. Mapa donde se muestra las zonas de erosión limitada por la meteorización y el transporte en la CHRM.



CONCLUSIONES

La relación de composición de rocas metamórficas/sedimentarias en el área fuente no determina la relación de fragmentos de rocas en las arenas fluviales. Las rocas con metamorfismo de bajo grado pueden producir más fragmentos de roca que las rocas sedimentarias en los sectores fuente en una proporción de 2:1 respectivamente.

En las arenas fluviales más cercanas al área fuente con rocas metamórficas se caracterizan por tener una mayor población de granos tamaño arena gruesa en comparación con los depósitos más cercanos a los sectores fuente con rocas sedimentarias.

La procedencia de las arenas de los depósitos fluviales derivadas de sectores fuente con rocas metamórficas de bajo grado es reforzada mediante: a) información adicional obtenida del análisis de los granos de cuarzo que no han tenido un transporte mayor a los 100 Km, tomando en cuenta que estos granos son generalmente más irregulares que otros que han sido transportados por distancias mayores; b) el diagrama en forma de diamante de Basu et al. (1975), debido a que las rocas metamórficas producen más granos de Qp que las rocas sedimentarias, las cuales producen la mayor cantidad de granos de Qm; y (c) la composición de los minerales de arcilla en los depósitos de finos en las planicies de inundación, considerando que las rocas metamórficas de bajo grado aportan la mayor cantidad de clorita.

En comparación con los resultados obtenidos por Meade (2007) y Johnsson et al. (1991), donde estos autores encuentran que la composición de las arenas en el sector del Río Orinoco y cerca a la desembocadura de los afluentes que provienen de la Cordillera Oriental tienen un contenido mayor al 90% en Qt con una

tendencia al aumento, los resultados de este trabajo indican que el contenido de Qt en la desembocadura del Río Meta no supera el 90%, considerando que el presente trabajo no tiene en cuenta la composición de los afluentes que sólo drenan los aluviones de los llanos y re trabajan las arenas de los depósitos (e.g. Río Manacacias), como si lo hace los trabajos realizados por los autores antes mencionados. Además, ellos se basan en los resultados obtenidos de muestras de arena extraídas principalmente de los ríos Apure y Guanare, los cuales drenan los Andes de Mérida al norte del Río Meta, donde los sectores fuente mantienen diferencias morfotectónicas (Johnsson et al., 1991).

La composición en los ríos de morfología recta no presentan una tendencia en la disminución de los granos de fragmentos de roca (R) en condiciones climáticas húmedas. Con 45 Km de transporte en el Río Humadea la composición cambia de litoarenitas a sublitoarenitas y con 25 Km de transporte en el Río Guayuriba hay una disminución importante en el contenido de granos de R sin generar cambios en la composición de las arenas de los depósitos. Lo anterior no refleja una tendencia composicional en los depósitos de los afluentes durante todo su recorrido.

Por el contrario, en los ríos con morfología meandriforme se observa como con 45 Km de transporte la composición de las arenas en el Río Cusiana cambia de litoarenitas (R=39%) a sublitoarenitas (R=19,7%) y este cambio sucede en el Río Ariporo a los 25 Km de transporte, reflejando una tendencia a la disminución de los granos de R con un pequeño aumento en la distancia de transporte. Esto indica que las arenas en los depósitos de los ríos Humadea y Cusiana son removidas rápidamente por efectos del transporte en los primeros 45 Km de recorrido desde el piedemonte, y en los ríos Guayuriba y Ariporo este fenómeno sucede en los primeros 25 Km de recorrido desde el piedemonte. Después de estas distancias las arenas permanecen almacenadas en los depósitos por periodos de tiempo mayores, reflejado en la aparición de óxidos en los fragmentos limoarcillosos (e.g. hematita y limonita) y en la meteorización de la glauconita, principalmente para el

caso de los ríos Cusiana y Ariporo.

Utilizando la información de las muestras del cauce principal del Río Meta se observa como en el primer segmento se presentan las mayores tasas de disminución de los granos de R, por ejemplo entre las muestras M55 y M54 pasa del 33,5 a 21,6% en tan solo 25 Kms de transporte (0,5%/km). Con 200 Km de transporte en el segundo segmento del Río Meta la composición cambia de litoarenitas a sublitoarenitas, pero este tramo tiene la menor tasa de disminución de granos de R, la cual se observa entre las muestras M24 (R=24%) y M19 (R=19,7%) que en 25 Kms de transporte disminuyen a una tasa de 0,2%/Km. Aunque la disminución de los granos de R en algunos sectores no es constante y tiene fuertes variaciones.

Los efectos del transporte tienen mayor influencia en los ríos de morfología recta porque no permiten que el sedimento permanezca por periodos prolongados de tiempo en los depósitos, de esta forma la meteorización química no podrá alterar la composición de los depósitos marcadamente. Por tanto, en los Ríos Humadea y Guayuriba predomina la erosión limitada por la meteorización.

La influencia del clima en la composición de los depósitos de arena es más marcada en los ríos de morfología meandriforme debido a que las bajas pendientes permiten que el sedimento permanezca por más tiempo en los depósitos y así la meteorización química puede generar cambios marcados en la madurez composicional de los depósitos. En los Ríos Cusiana y Ariporo predomina la erosión limitada por el transporte.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACEVEDO, R. y HERNÁNDEZ, Y. (2004): Modelamiento y Análisis Estructural del Anticlinal de Medina, Piedemonte de los Llanos Orientales (Trabajo de Grado), 135 p. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.
2. ACOSTA, J. y ULLOA, C. 2002. Mapa Geológico del Departamento de Cundinamarca. Memoria Explicativa. Ingeominas. Esc: 1:250.000. Bogotá.
3. ARAUJO, O. y SERRANO, J. (2004): Caracterización de las Rocas Retardantes en la Unidad K2 Superior de los Campos Castilla y Chichimene, Llanos Orientales de Colombia (Trabajo de Grado), 188 p., Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.
4. BASU, A., YOUNG, W., SUTTNER, J., JAMES, W., and MACK, G. (1975): Re-evaluation of Use of Ondulatory Extinction and Polycrystallinity in Detrital Quartz for Provenance interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology*. V. 45, N. 4. pg. 873 – 882.
5. BASU, A. (1976): Petrology of Holocene Fluvial Sand Derived from Plutonic Source Rock: Implications to Paleoclimatic interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology*. V. 46, N. 3. pg. 694 – 709.
6. BASU, A. (1985) Influence of Climate and Relief on Composition of Sands Released at Source Areas. G. G. Zuffa (ed). *Provenance of arenites*, pg. 1-18.
7. BAYONA, G., CORTÉS, M., JARAMILLO, C., OJEDA, G., ARISTIZABAL, J., y REYES-HARKER, A. (2008): An Integrated Analysis of an Orogen-Sedimentary

- Basin Pair: Latest Cretaceous-Cenozoic Evolution of the Linked Eastern Cordillera Orogen and the Llanos Foreland Basin of Colombia. GSA Bulletin, vol. 120 N. 9/10, pg. 1171-1197.
8. BAYONA, G., LAMUS, F., CARDONA, A., JARAMILLO, C., MONTES, C. (2007): Procesos Orogénicos del Paleoceno para la Cuenca de Ranchería (Guajira, Colombia) Definidos por Análisis de Procedencia. Geología Colombiana, N. 32, UNAL.
 9. BOGGS, S. (1986): Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Merrill Publishing Company. Ohio. 784 p.
 10. BORST, R. and GREGG, R. (1968): Authigenic Mineral Growths as Revealed by the Scanning Electron Microscope. USA. Journal Sedimentary Research; v. 46; p. 906-912.
 11. CAMERON, K. and BLATT, H. (1971): Durabilities of Sand Size Schist and "Volcanic" Rock Fragments During Fluvial Transport, Elk Creek, Black Hills, South Dakota. Journal of Sedimentary Petrology. V. 41, N. 2. pg. 565 – 576.
 12. DIAZ, M., PARLADÉ, J., MONTOYA, M., ROMERO, E. (1997): Análisis de los Minerales de la Arcilla y sus Procesos Genéticos en las Formaciones Arcillosas de la Cuenca del Tajo. España. Estudios Geológicos., 53. p. 185 – 196.
 13. DELGADO, A. (2010): Cinemática de las fallas normales en la cuenca Foreland de los llanos orientales en el área de Casanare/Colombia. Escuela de Geología (UIS). Tesis de maestría. 146 p.
 14. DICKINSON, W. (1970) Interpreting Detrital Modes of Graywacke and Arkose. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 40, N. 2, pg. 695-707.

15. DICKINSON, W. (1985) Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones. G. G. Zuffa (ed). Provenance of arenites, pg. 333 - 361.
16. ECOPETROL. Programa sísmico Tierra Negra 95, cartografía geológica y análisis estructural líneas TN 95-1620, TN 92-02, TN 95 1200, TN 95-1350. Bogotá D.C. 1996. 35 p.
17. ECOPETROL. Bloque Tierra Negra. Informe técnico anual 1999. Bogotá D.C. 2000. 13 p.
18. ECOPETROL – ICP (2002): LINARES R., POSADA C., RUEDA E., y VÉLEZ M. Modelamiento en Zonas Complejas del Piedemonte Llanero. Piedecuesta.
19. FOLK, R. (1974): Petrology of Sedimentary Rocks. Walter Geology Library. Austin. 182 p.
20. FREY, M. AND ROBINSON, D. (1999): Low – Grade Metamorphism. Oxford. Blackwell Science Ltda. 313 p.
21. GARCIA, F., GALINDO, A., RODRIGUEZ, M., y BENACENTE, J. (2001): Mineralogía y Geoquímica de los Sedimentos de Algunas Lagunas del N de la Provincia de Malaga (S de España). España. Estudios Geológicos. 57. p. 93 – 98.
22. GEOESTUDIOS. Sección estratigráfico-estructural Mambita-San Pedro de Jagua (Cundinamarca). ECOPETROL. Bogotá D.C. 1994. 16 p.
23. GIRTY, G., MOSSMAN, B., y PINCUS, S. (1988): Petrology of Holocene Sand, Peninsular Ranges, California and Baja Norte, Mexico: Implications for Provenance-Discrimination Models. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 58,

N. 5, pg. 881-887.

24. GRANTHAM, J. and VELBEL, M. (1988): The Influence of Climate and Topography on Rock-Fragment Abundance in Modern Fluvial Sands of the Southern Blue Ridge Mountains, North Carolina. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 58, N. 2, pg. 219-227.
25. HERRERA, E. (2005): Caracterización de la Intensidad de Fracturamiento en Intervalos Corazonados de las Formaciones Barco y Guadalupe en el Piedemonte de los Llanos Orientales, Colombia (Trabajo de Grado), 113 p., Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga.
26. HOORN, C. and VONHOF, H. (2006): Neogene Amazonia: Introduction to the special issue. *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 21, Issues 1-2, March 2006, Pg. 1-4.
27. INGERSOLL, R., BULLARD, T., FORD, R., GRIMM, J., PICKLE, J., and SARES, S. (1984): The Effect of Grain Size on Detrital Modes: A test of the Gazzi-Dickinson Point-Counting Method. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 54, N. 1, pg. 103-116.
28. JIMENEZ, M. (2010): Temporalidad de la deformación en la zona sur de la cuenca Foreland de los llanos orientales, Colombia. Escuela de Geología (UIS). Tesis de Maestría. 105 p.
29. JOHNSON, M. and STALLARD, R. (1989): Physiographic Controls on the Composition of Sediments Derived from Volcanic and Sedimentary Terrains on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 59, N. 5, pg. 768 - 781.

30. JOHNSON, M. and MEADE, R. (1990): Chemical Weathering of Fluvial Sediments During Alluvial Storage: The Macupanim Island Point Bar, Solimões River, Brazil. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 60, N. 6, pg. 827-842.
31. JOHNSON, M., STALLARD, R., and LUNDBERG N. (1991): Controls on the Composition of Fluvial Sands from a Tropical Weathering Environment: Sands of the Orinoco River Drainage Basin, Venezuela and Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 103, pg 1622-1647.
32. JOHNSON, M. and BASU, A. (1993): Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Special Paper. GSA Books Science Editor. 342 p.
33. JONES, M. A., HELLER, P. A., ROCA, E., and BEER, J. A. (2004): Time Lag of Sintectonic Sedimentation Across an Alluvial Basin: Theory and Example from the Ebro Basin. Spain. *Basin Research*, 16. Pgs. 467 – 488.
34. LÓPEZ, E. (2004): Aspectos más Relevantes de la Geomorfología y Geología y del Piedemonte Llanero de Colombia. INGEMOMINAS, Pg. 24.
35. MEADE R. (2007): Trascontinental Moving and Storage: The Orinoco and Amazon Rivers Transfer the Andes to the Atlantic. *Geomorphology and Management*. Pgs. 45 – 63.
36. MIAL, A. (1996): The Geology of Fluvial Deposits. Springer. Canada. 582 p.
37. NIÑO, Y. (2004): Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos. Universidad de Chile. 69 p.
38. OSPINA, M. (2003): El Paramo de Sumapaz un Ecosistema Estratégico para Bogotá. Sociedad Geográfica Colombiana. Academia de Ciencias Geográficas.

39. PARRA, M. (2008): Cenozoic Foreland-Basin Evolution in the Northern Andes: Insights from Thermochronology and Basin Analysis in the Eastern Cordillera, Colombia. Tesis Ph.D. Universität Potsdam, 146 p.
40. PARRA, M. P. y MEZA, C. G. (1993): Hidrogeoquímica e Hidrodinámica de la Unidad K2 del Bloque Apiay. Bucaramanga. Colombia. Trabajo de Grado. Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander.
41. PEREZ, V. E., ULLOA, C. E., SUAREZ, M. C. XXII Reconocimiento geológico área Guateque–Aguaclara Campo Apiay. Asociación colombiana de geólogos y geofísicos del petróleo. 1984 78 p.
42. POTTER P., MAYNARD J. AND PRYOR W. (1980): Sedimentology of Shale. New York, Springer – Verlag. 303 p.
43. PRADA D. y QUINTERO I. 2004. Estudio Estructural de Fracturas y Análisis de Inclusiones Fluidas en Materiales de Relleno de Venas, en las Rocas Aflorantes de la Transecta Santa Maria- San Luis de Gaceno (Departamento de Boyacá, Borde Oriental de la Cordillera Oriental): Implicaciones Paleohidrogeológicas. Tesis de Grado. Escuela de Geología. UIS. 136 p.
44. PULIDO O. y GÓMEZ L. S. 2001. Geología de la plancha 266 Villavicencia Escala 1:100.000. INGEOMINAS. BOGOTÁ.
45. QUINTERO I. (2010): Cinemática de las Estructuras de Deformación de la Cuenca de Medina (Colombia), durante la Deposición del Grupo Guayabo. Tesis de Maestría. Escuela de Geología. UIS. 70 p.
46. RAMIREZ J. C. (2010): Evolución Tectono – Sedimentaria en el Sinclinal de Nunchía Durante el Mioceno. Tesis de Maestría. Escuela de Geología. UIS. 106

p.

47. RENZONI, G. 1968. Geología del Macizo de Quetame. U. Nal., Geol. Col., (5) Bogotá.
48. RESTREPO J. D. (2005). Los Sedimentos del Río Magdalena: Reflejo de la Crisis Ambiental. Medellín. Fondo Editorial universidad EAFIT. p. 267.
49. ROJAS D. (2004): Historia Depositacional y Distribución del Miembro Cretácico K1C y su Relación con la Producción de Hidrocarburos en el Sector Cravo Norte, Arauca. Cuenca Llanos. Escuela de Geología (UIS). Trabajo de Grado, 135 p.
50. SCHUMM S. (1977): The Fluvial System. John Wiley & Sons. USA. 338 p.
51. SEGOVIA, A. 1963. The Geology of Plancha L-12 (Peralonso-Medina). Pennsylvania State University.
52. STALLARD R. F. and EDMOND J. M. 1983. Geochemistry of the Amazon: 2 The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. Journal of Geophysical Research. V. 88, p. 9671 – 9688.
53. SUTTNER L., BASU A., and MACK G. (1981): Climate and Origin of Quartz Arenites. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 51, N. 4, pg. 1235-1246.
54. SUTTNER L. and DUTTA P. (1986): Alluvial Sandstone Composition and Paleoclimate, I. Framework Mineralogy. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 56, N. 3, pg. 329-345.
55. ULLOA, C.E Y RODRIGUEZ, E. 1979. Geologia del cuadrangulo K-12,

Guateque. Boletín de geología del INGEOMINAS. Bogotá D.C. Vol. 22. Pag. 3-55.

56. ULLOA C.E., RODRIGUEZ E., FUQUEN J. y ACOSTA J. 2001. Geología de la Plancha 192 Laguna de Tota. Memoria Explicativa. INGEOMINAS. 51 p.

57. WELTON J. (1984): SEM Petrology Atlas. The American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Series. Chevron Oil Field Res. Co. 237 p.

58. Disponible en Internet: www.ideam.gov.co

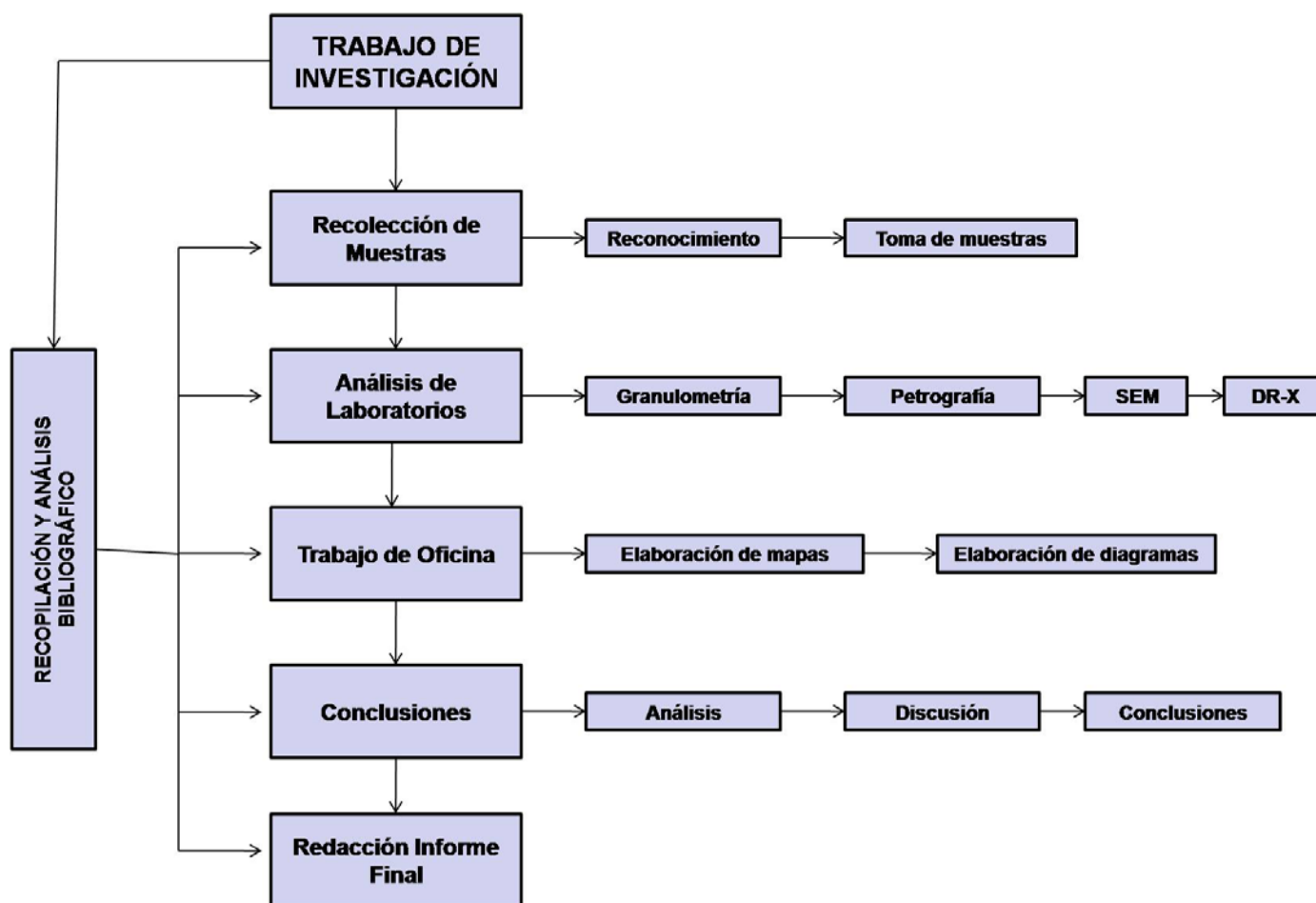
59. Disponible en Internet: www.igac.gov.co

60. Disponible en Internet: www.ingegominas.gov.co

61. Disponible en Internet: www.limarino.com.ar

ANEXOS

Anexo B. Flujograma de trabajo que muestra la metodología utilizada.



Anexo B. Convenciones utilizadas por algunos trabajos donde se relacionan las categorías de los granos reconocidos durante la petrografía modal. Tomado de Johnsson et al., 1991).

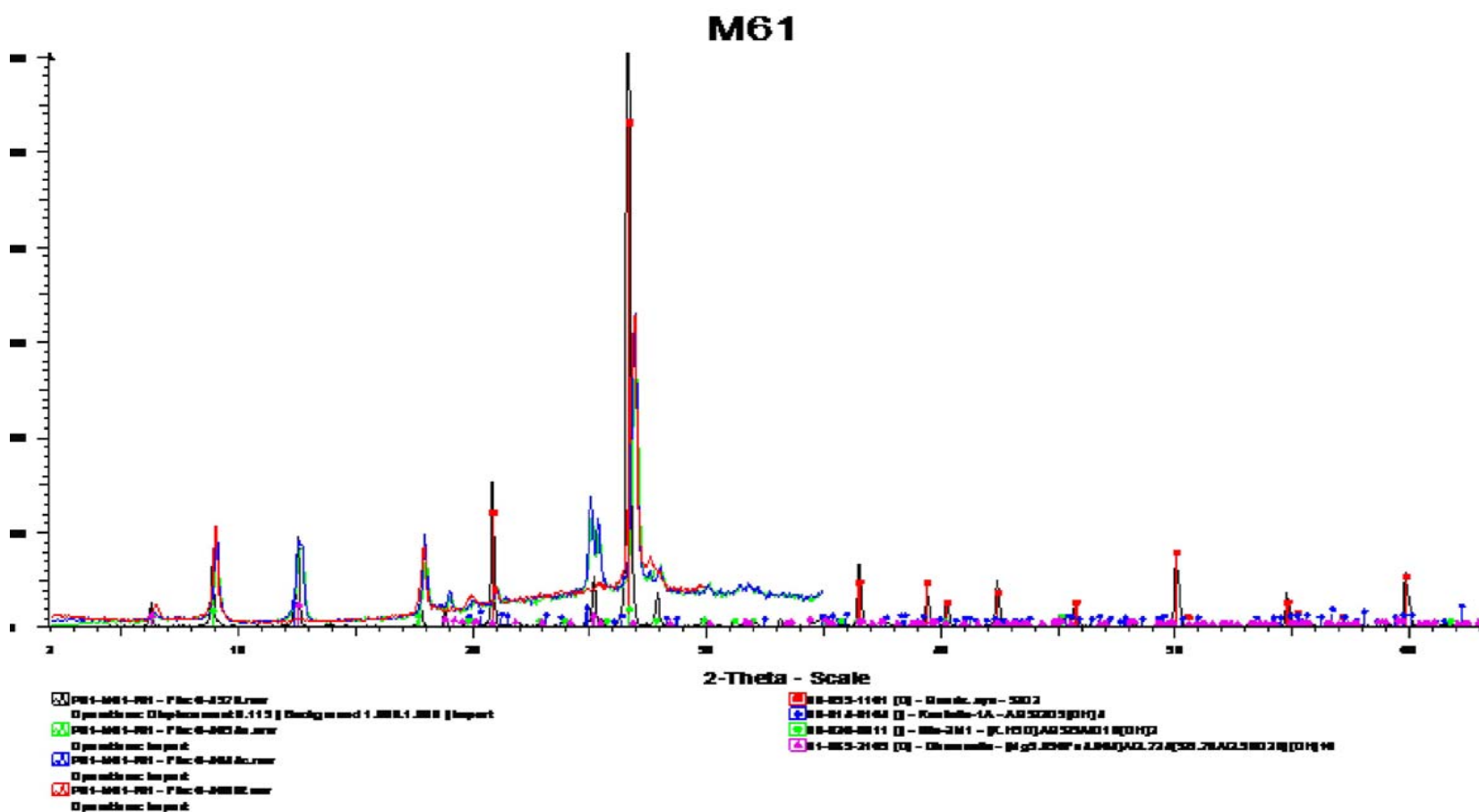
M = monomineralic grains (>95% of grain made up of a single mineral species)
Q _t = total quartz
Q _m = monocrystalline quartz (>95% of grain made up of a single crystal)
Q _{ms} = straight extinction (<5°)
Q _{mu} = undulose extinction (>5°)
Q _p = polycrystalline quartz (no single crystal makes up >95% of grain)
Q _{p2-3} = 2 or 3 crystals per grain
Q _{p>3} = >3 crystals per grain
Q _{p>3f} = foliated
Q _{p>3m} = massive
Q _{pc} = Cryptocrystalline (average crystal size <5 μm)
F = total feldspar (monocrystalline and polycrystalline forms)
F _k = potassium feldspar (includes microperthite)
F _p = plagioclase feldspar (includes albite)
F _u = unidentified feldspar
F _t = total feldspar (F _k + F _p)
A = accessory minerals (monocrystalline and polycrystalline forms)
(Tallies kept of each phase encountered)
R = rock fragments (no single mineral species makes up >95% of grain)
R _s = sedimentary rock fragments
R _{smud} = mudstone or shale fragments (detrital subgrains not resolvable)
R _{silt} = siltstone or sandstone fragments (detrital subgrains resolvable)
R _{carb} = carbonate rock fragments (>50% calcium carbonate)
R _{soth} = other sedimentary rock fragments
R _{ms} = metasedimentary rock fragments
R _{msf} = foliated
R _{msm} = massive
R _m = other metamorphic rock fragments (not metasedimentary)
R _p = plutonic rock fragments
R _v = volcanic rock fragments
R _{amb} = ambiguous mineral assemblage
R _t = total rock fragments (R + Q _p)
R _f = foliated rock fragments (R _{msf} + Q _{p>3f})
R _m = massive rock fragments (R _t - R _f)
Alt = alterites (grain altered sufficiently to preclude identification of precursor)
Fer = ferricrete or laterite fragments
Bio = biogenic debris (organic matter or skeletal debris)

Anexo C. Tabla de resultados porcentuales recalculados para la composición de las muestras de la CHRM.

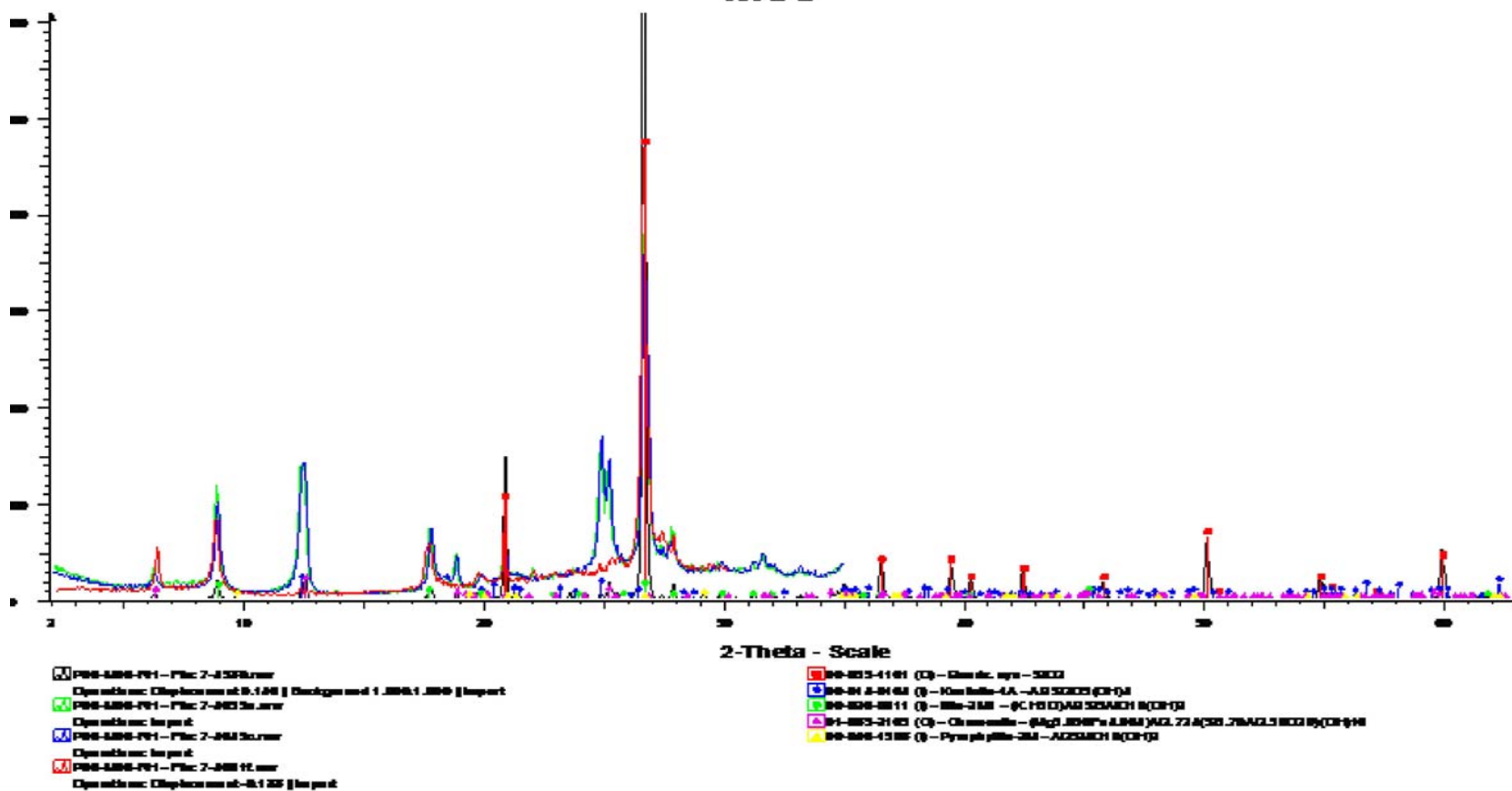
MUESTRA	QtFR (%)			QmQpR (%)			RsRmsRp (%)		
	Qt	F	R	Qm	Qp	R	Rs	Rms	Rp
4	88,2	0,0	11,9	67,2	12,8	20,0	73,5	20,6	5,9
6	78,1	0,3	21,6	34,8	13,6	51,6	93,7	6,4	0,0
8	82,6	0,0	17,4	50,9	10,2	39,0	89,8	10,2	0,0
9	75,9	0,3	23,8	60,8	12,5	26,7	91,6	8,5	0,0
11	86,7	0,3	13,0	64,8	9,7	25,5	97,4	2,6	0,0
13	84,9	0,7	14,5	39,4	15,6	45,0	95,4	4,7	0,0
15	78,0	0,3	21,6	62,2	9,9	27,9	84,4	15,6	0,0
18	64,9	0,4	34,7	73,0	13,7	13,3	78,0	22,0	0,0
19	80,0	0,3	19,7	61,4	15,9	22,7	75,9	22,4	1,7
24	76,0	0,0	24,0	36,8	14,7	48,5	73,9	26,1	0,0
27	74,0	0,0	26,0	69,4	10,8	19,8	76,3	23,7	0,0
32	68,0	0,0	32,0	76,0	11,5	12,5	74,5	25,5	0,0
35	65,8	0,0	34,2	67,2	8,4	24,4	76,9	23,1	0,0
36	67,2	0,0	32,8	26,2	15,6	58,2	66,3	33,7	0,0
38	75,4	1,4	23,2	67,5	9,3	23,3	89,6	9,0	1,5
39	68,3	0,0	31,7	66,0	9,0	25,0	78,0	22,0	0,0
40	95,3	0,0	4,8	62,2	13,9	24,0	100,0	0,0	0,0
41	74,8	0,0	25,2	35,3	18,2	46,5	63,9	36,1	0,0
46	57,1	0,0	42,9	65,6	10,9	23,5	70,5	29,5	0,0
49	75,2	0,0	24,8	70,9	11,9	17,3	78,6	21,4	0,0
50	55,5	0,0	44,5	77,3	9,7	13,0	56,8	43,2	0,0

MUESTRA	QtFR (%)			QmQpR (%)			RsRmsRp (%)		
	Qt	F	R	Qm	Qp	R	Rs	Rms	Rp
52	72,3	0,0	27,7	69,7	11,8	18,5	35,0	65,0	0,0
53	60,7	0,4	38,9	51,0	15,5	33,5	56,9	43,1	0,0
54	78,0	0,3	21,6	49,5	11,5	39,1	31,3	68,8	0,0
55	66,6	0,0	33,5	65,8	12,5	21,7	42,4	57,6	0,0
58	81,5	0,0	18,5	60,6	11,8	27,7	38,2	61,8	0,0
59	78,1	2,4	19,5	44,9	10,6	44,5	43,1	56,9	0,0
62	74,5	0,0	25,5	65,6	9,6	24,8	34,2	65,8	0,0
63	77,3	0,0	22,7	47,5	9,6	42,9	29,9	70,2	0,0
65	75,6	0,0	24,4	60,1	14,7	25,2	35,6	64,4	0,0
67	76,0	0,0	24,0	81,0	14,2	4,8	32,4	67,6	0,0
68	47,8	1,4	50,9	55,4	12,9	31,7	49,3	50,7	0,0
71	55,0	0,0	45,0	57,2	10,0	32,8	43,8	56,2	0,0
73	51,3	0,4	48,3	54,5	11,3	34,2	51,2	48,8	0,0
76	53,3	0,4	46,3	58,8	9,2	32,0	51,9	48,1	0,0
77	40,8	2,5	56,7	63,0	11,0	26,0	42,5	57,5	0,0
78	61,1	0,0	39,0	65,3	10,8	24,0	87,4	12,6	0,0
80	72,1	0,0	27,9	69,1	11,2	19,7	100,0	0,0	0,0
82	79,9	0,4	19,7	55,8	9,4	34,8	98,3	1,8	0,0
83	76,5	0,3	23,2	65,1	13,2	21,7	100,0	0,0	0,0
85	73,0	0,4	26,6	62,4	13,8	23,8	98,7	1,3	0,0
87	86,7	0,0	13,3	73,1	9,6	17,4	97,4	2,6	0,0
88	86,6	1,0	12,4	70,1	8,3	21,7	100,0	0,0	0,0
89	74,7	0,4	24,9	77,0	11,2	11,9	95,5	4,5	0,0

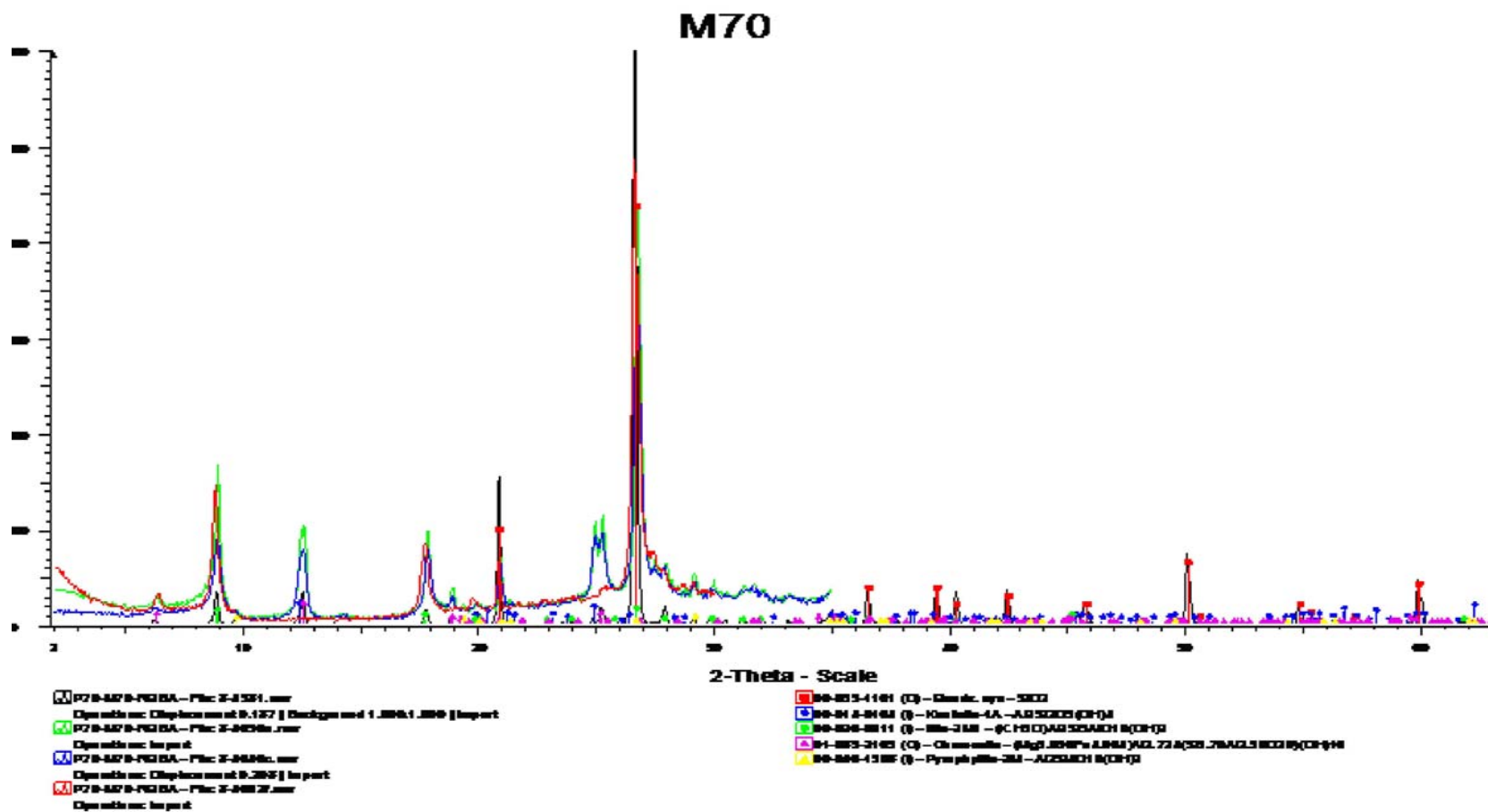
Anexo D. Difractogramas de las muestras del río Humadea.



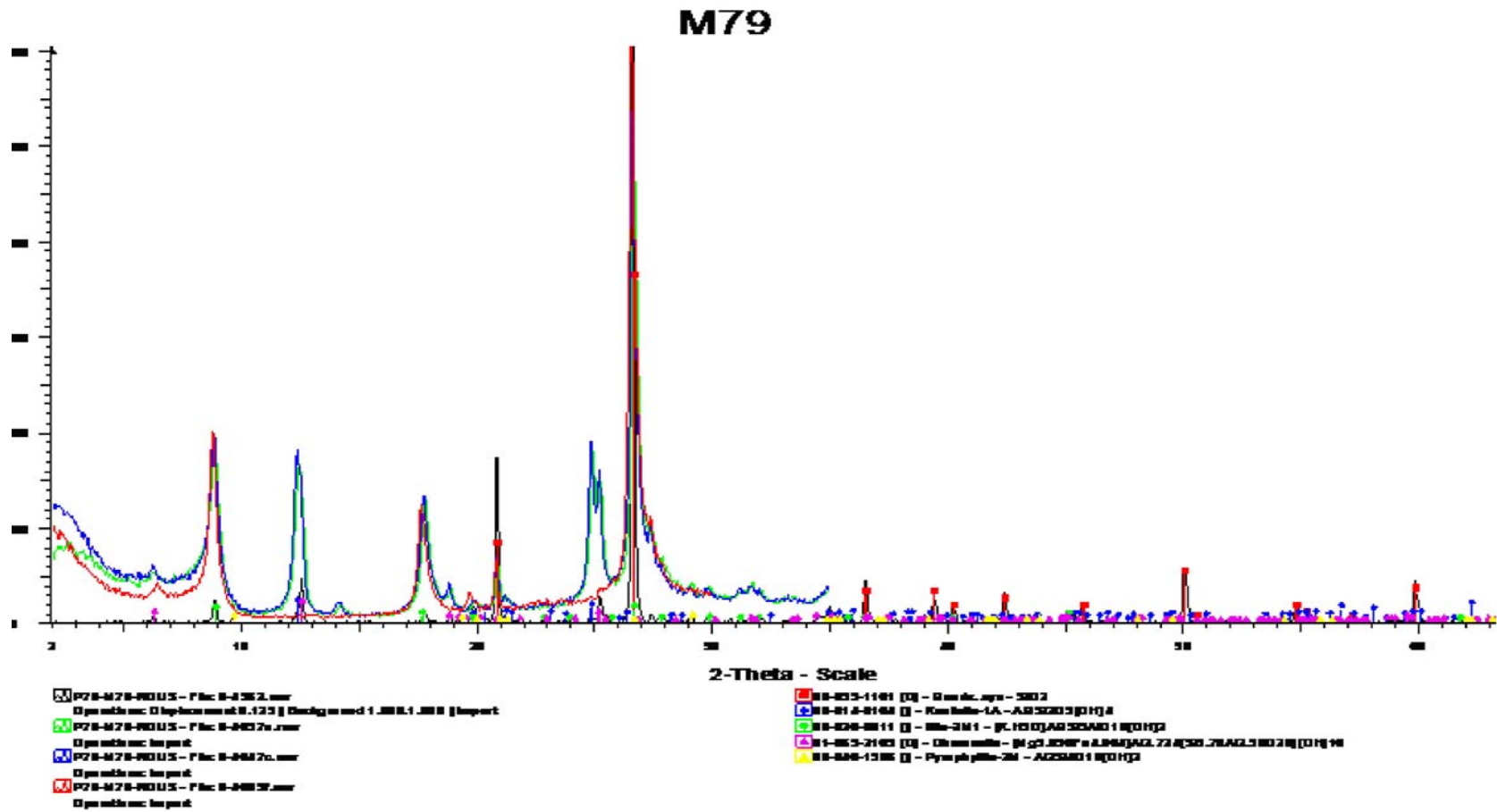
M66



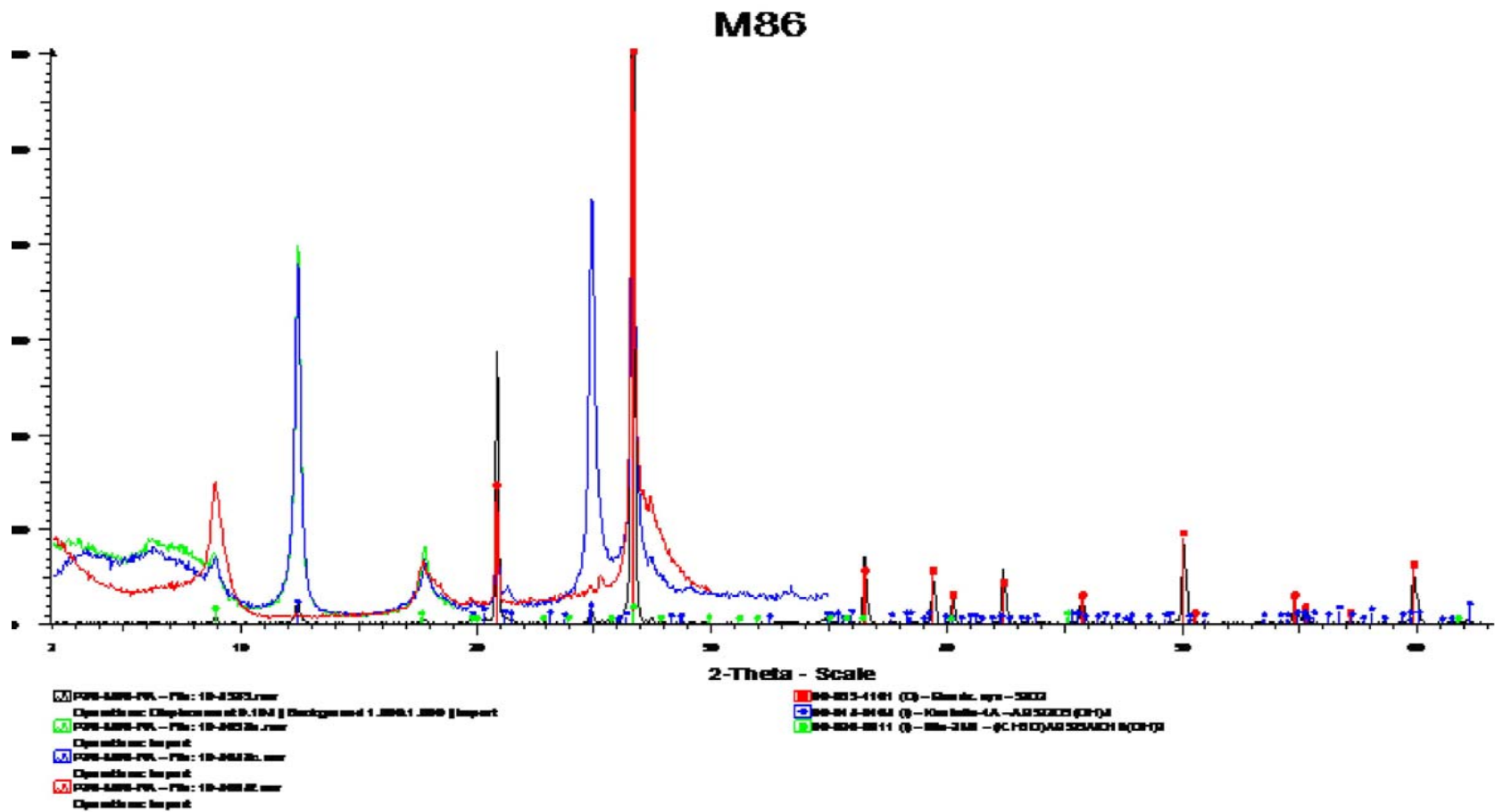
Anexo E. Difractograma de la muestra del río Guayuriba.



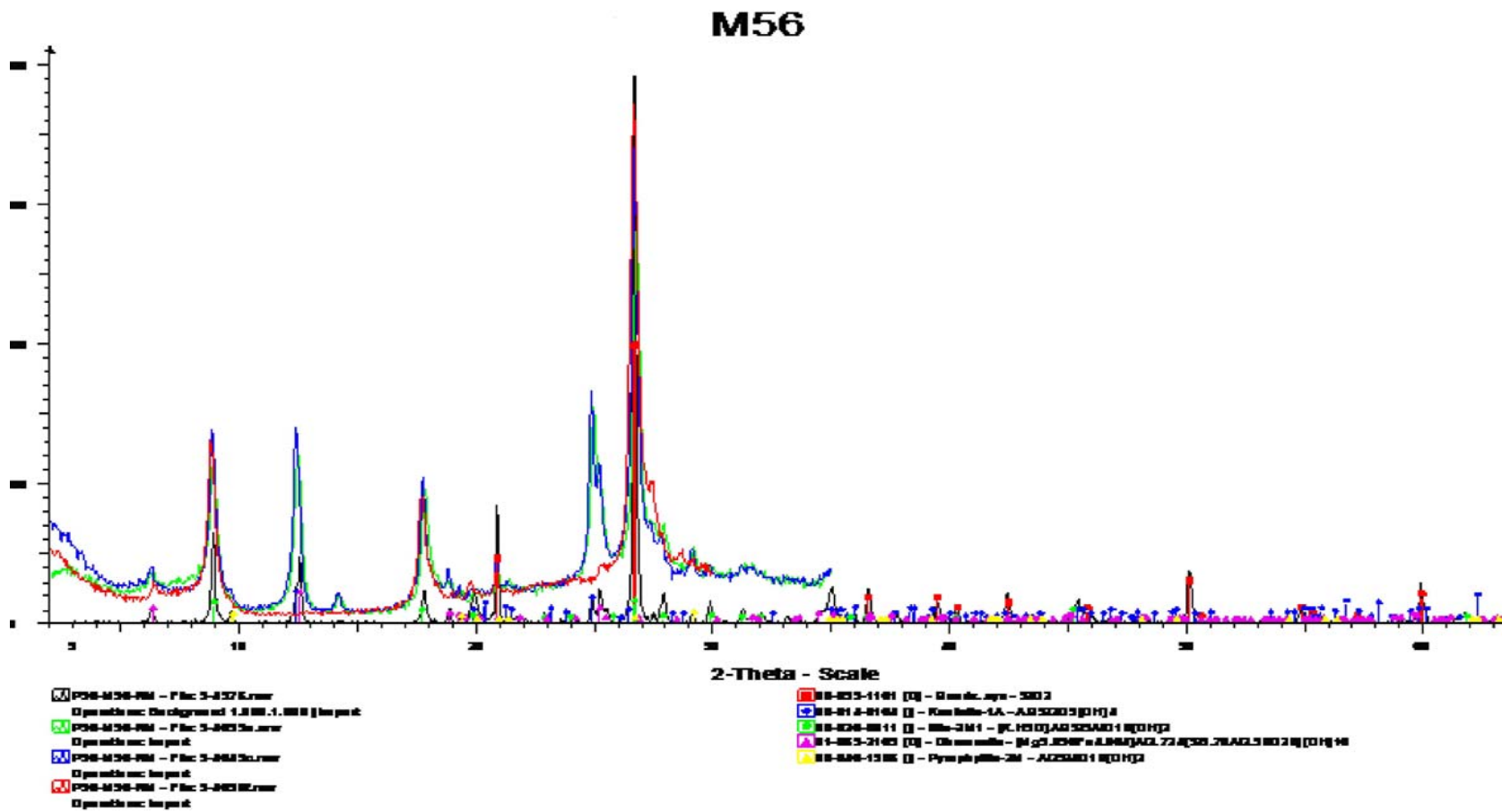
Anexo F. Difractograma de la muestra del río Cusiana.



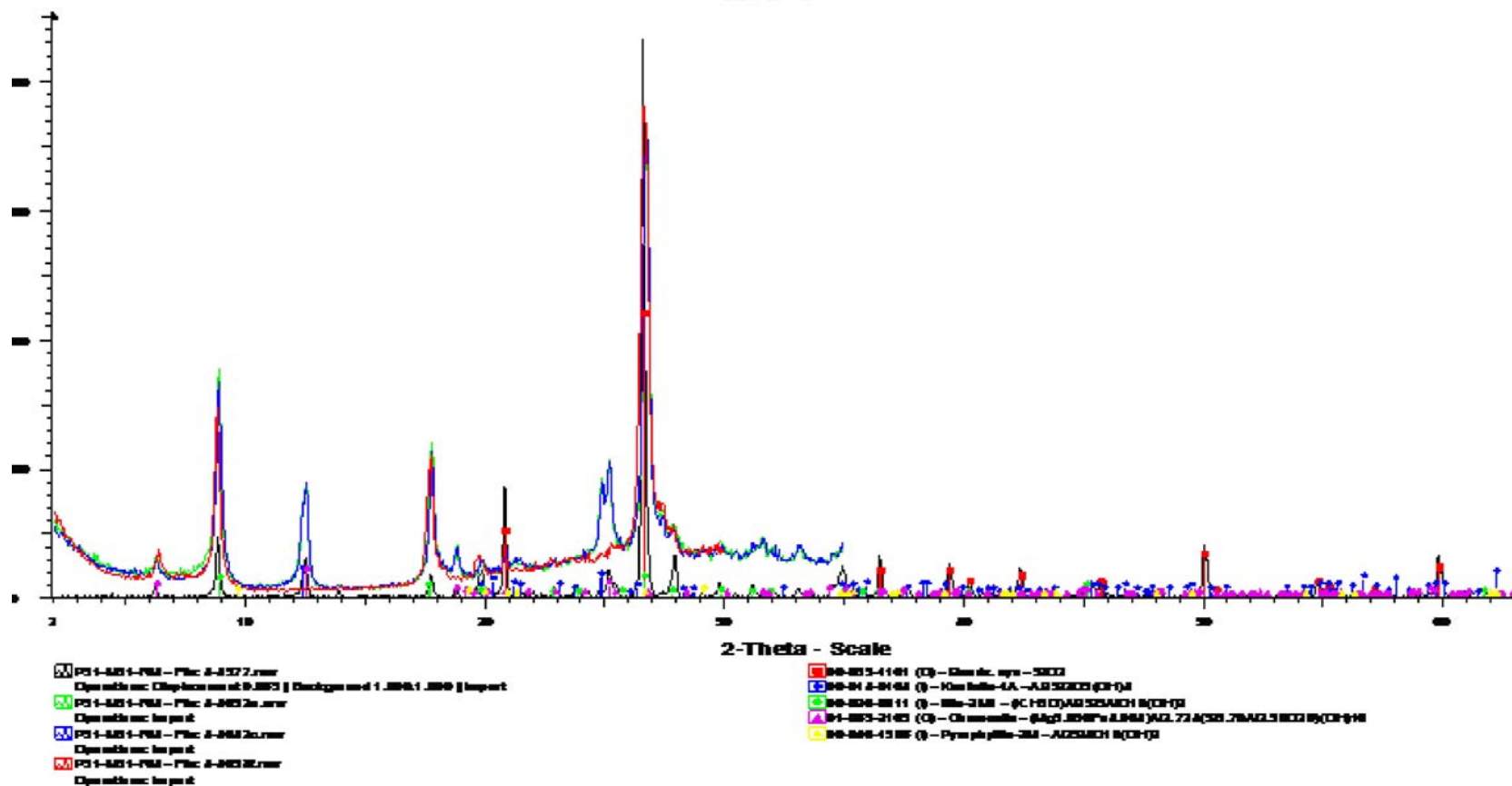
Anexo G. Difractograma de la muestra del río Ariporo.



Anexo H. Difractogramas de las muestras de cauce principal del Río Meta.



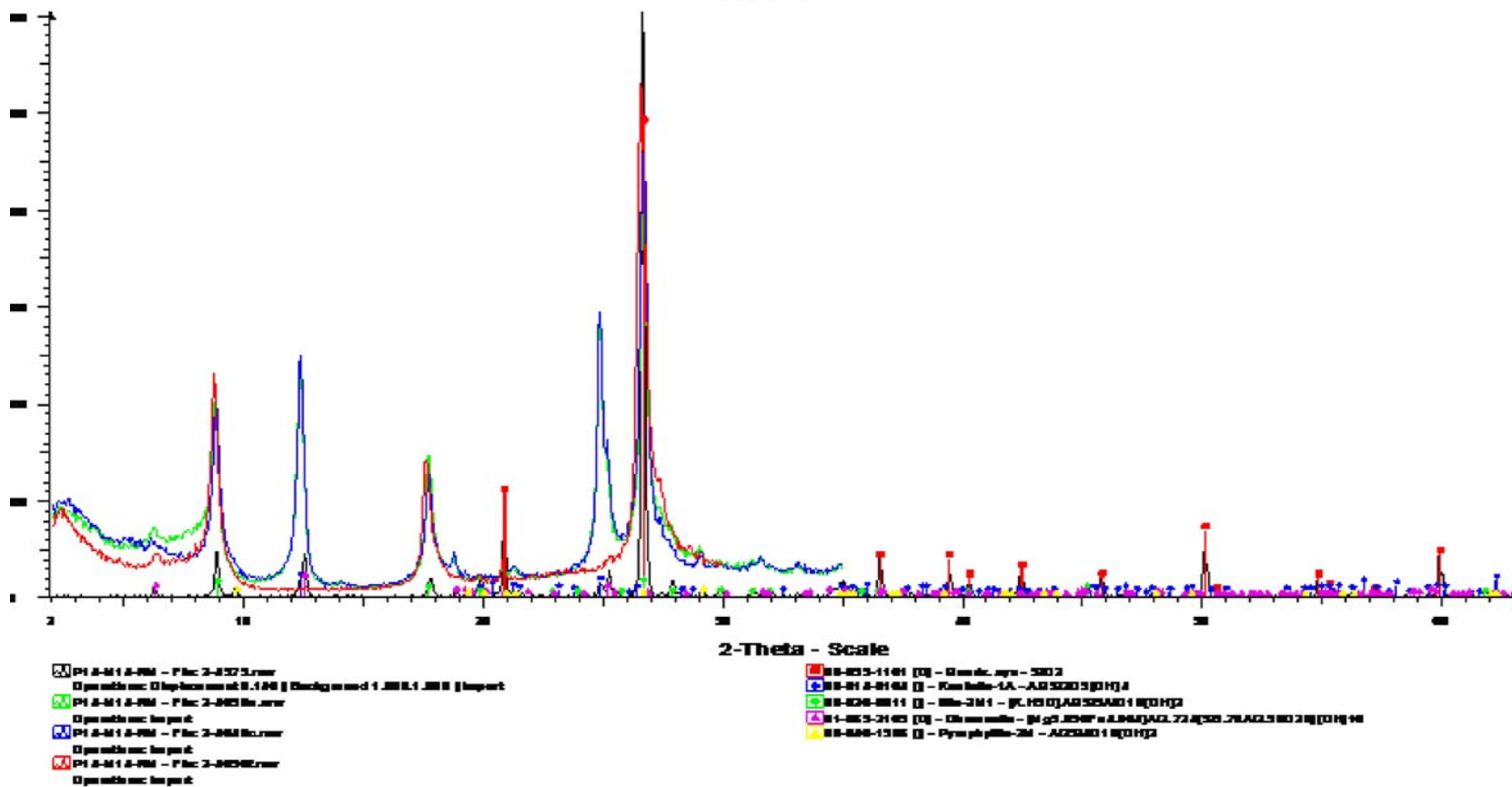
M51



2-Theta - Scale



M14



M3

