

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



*Estudio geoquímico exploratorio de los sedimentos superficiales del
delta del río Mitare, estado Falcón*

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por la Br.
Mariacarolina Velásquez
Delgado para optar por el
Título de Licenciada en
Geoquímica.

Caracas, Marzo 2011.

ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “*Estudio geoquímico exploratorio de los sedimentos superficiales del delta del río Mitare, estado Falcón*”, presentado por la Br. Mariacarolina Velásquez Delgado, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciada en Geoquímica.

Prof. Manuel Martínez

Tutor

Prof. Eduardo Carrillo

Jurado

Prof. Carlos Yanes

Jurado

*Al espíritu inagotable de mi
padre y al ánimo de lucha
constante de mi madre*

Mis agradecimientos van dirigidos a:

Universidad Central de Venezuela

Instituto de Ciencias de la Tierra

Laboratorio de Geoquímica Orgánica

Prof. Manuel Martínez

Prof. José Vicente Gutiérrez

Prof. Eduardo Carrillo

Prof. Carlos Barrios

Sr. Fernando

Luis Vilchez

Sr. Arturo

... que hicieron posible este proyecto.

Mis padrinos (Nonita y Hernán)

Profa. Raiza Fernández

Academia Yakera

Vane (TQ amiga)

Los Bachilleres

Yrasenia

Luis Mu.

Migue

Kris

Omi

Eve

... por su compañía y aliento.

Miriam y Nelson, mi principio y mi norte en este trayecto.

Edgar Andrés Marcano Cabeza, por tu amor, calma, paciencia y por darme el empujoncito final que necesitaba. ★

... y a todos los que estuvieron pendiente de que concluyera este hermoso problemón.

Gracias.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de conocer las características geoquímicas de los sedimentos superficiales del delta del río Mitare. El mismo se define como un estudio exploratorio que permitió, de manera general, conocer los procesos geoquímicos que condicionan la abundancia, distribución y migración de distintos elementos en este ambiente, dar un aporte a la interpretación de la evolución geológica reciente del área y obtener una visión del posible efecto que tienen las actividades humanas sobre el sistema. Para lograr el objetivo propuesto se le aplicó un tratamiento físico (secado y tamizado en seco) y químico a un conjunto de 30 muestras de sedimentos tamaño lodo ($<62,5\mu\text{m}$), que consistió en: fusión alcalina con boratos y extracción secuencial ácida en dos etapas (HCl 1M y HNO₃ concentrado). Se determinaron fases químicas (Al, Ca, Fe, Mg, Si, Na, K, Ti, Mn, Ba, Pb, Zr, Co y Cr) a través de las técnicas EEO-IAP y EEA-Llama, fases mineralógicas por medio de DRX y la concentración de mercurio total. Mediante el empleo de herramientas de la estadística paramétrica (bivariada y multivariada), se obtuvo que los procesos clásticos, carbonáticos y evaporíticos son los que controlan la distribución geoquímica global en el sistema, y que existen diferencias estadísticamente significativas entre el área de influencia del delta (planicie costera) y el ambiente fluviodeltaico, enmarcadas por el efecto dominante de los procesos evaporíticos en el área de influencia. A partir de la interpretación de resultados y gráficos relacionados con la geoquímica sedimentaria, se propone que los principales procesos sedimentológicos, que determinan las propiedades tanto granulométricas como geoquímicas de este sistema son los fluviales y eólicos y se obtuvo que las secciones de grano fino de la Cuenca Central de Falcón (material candidato a referencia MCAF) reúnen las mismas características composicionales que las muestras de estudio. Adicionalmente se obtuvo que las concentraciones de la mayoría de los metales estudiados, se encuentran por debajo de las correspondientes a sistemas poco contaminados, muy contaminados y materiales de referencia internacional, sin embargo, las concentraciones de mercurio se presentan en una relación tres veces superior a la correspondiente a MCAF, como referencia de la fuente de sedimentos, por lo que se plantea como recomendaciones hacer un estudio detallado de la distribución de mercurio en esta zona, que involucre un muestreo sistemático y que se considere la escala temporal y por otro lado, que se evalúe el efecto que tienen sobre el sistema las actividades industriales que se desarrollan en zonas aledañas.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
1. <i>Generalidades</i>	4
2. <i>Geoquímica sedimentaria</i>	9
3. <i>Cuenca del río Mitare</i>	12
4. <i>Delta del río Mitare</i>	15
5. <i>Marco geológico</i>	18
6. <i>Antecedentes</i>	27
METODOLOGÍA.....	36
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	47
1. Descripciones de campo.....	47
2. Determinaciones físicas.....	50
2.1. <i>Descripción física de las muestras</i>	50
2.2. <i>Análisis granulométrico</i>	50
2.3. <i>Análisis mineralógico</i>	58
3. Determinaciones químicas.....	60
3.1. <i>Humedad y pérdida al rojo</i>	60
3.2. <i>Composición de los sedimentos</i>	52
3.3. <i>Distribución por ambientes</i>	69
3.4. <i>Variabilidad en la concentración de los elementos</i>	71
4. Comportamiento geoquímico.....	72
4.1. <i>Ambiente fluviodeltaico</i>	73
4.2. <i>Análisis de factores para el ambiente fluviodeltaico</i>	77
4.3. <i>Planicie costera</i>	78
5. Inferencias sobre geoquímica sedimentaria.....	83
5.1. <i>Meteorización química y actividad tectónica</i>	83
5.2. <i>Proveniencia</i>	86
6. Inferencias sobre geoquímica ambiental.....	88
6.1. Mercurio.....	91

7. Integración de resultados.....	93
CONCLUSIONES.....	94
RECOMENDACIONES.....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	97
APÉNDICE I: <i>Condiciones de experimentación</i>	105
APÉNDICE II: <i>Exactitud</i>	107
APÉNDICE III: <i>Fórmulas empleadas</i>	108
APÉNDICE IV: <i>Resultados de las pruebas de hipótesis</i>	109
APÉNDICE V: <i>Determinaciones químicas</i>	108
APÉNDICE VI: <i>Relaciones binarias</i>	111
APÉNDICE VII: <i>Histogramas y cajas gráficas</i>	112

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. <i>Características generales más resaltantes de la Cuenca del río Mitare</i>	12
Tabla 2. <i>Coordenadas de los puntos de muestreo</i>	39
Tabla 3. <i>Descripción física de las muestras</i>	50
Tabla 4. <i>Resultados del cálculo de parámetros de madurez textural</i>	51
Tabla 5. <i>Resumen de los resultados del análisis mineralógico secuencial</i>	59
Tabla 6. <i>Humedad y pérdida al rojo</i>	60
Tabla 7. <i>Concentraciones elementales en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare y en algunos materiales de referencia</i>	62
Tabla 8. <i>Coefficientes de variación relacionados con el muestreo, los métodos analíticos empleados y la variabilidad general del sistema de estudio</i>	72
Tabla 9. <i>Matriz de correlación para la concentración en muestra total de los elementos mayoritarios y traza que caracterizan al ambiente fluviodeltaico</i>	74
Tabla 10. <i>Resultados del análisis de factores</i>	77
Tabla 11. <i>Matriz de correlación para la concentración en muestra total de los elementos mayoritarios y traza que caracterizan a la planicie costera</i>	81
Tabla 12. <i>Resultados del cálculo del Índice de Alteración Química (CIA)</i>	84

Tabla 13. <i>Comparación de los resultados obtenidos para las fuente MCAF y fluvial en el análisis de proveniencia</i>	87
Tabla 14. <i>Tabla comparativa entre los resultados obtenidos en este estudio y los reportados para el río Mitare, el delta del río Orinoco, el lago de Valencia y el río Tuy</i>	89
Tabla 15. <i>Concentraciones de mercurio obtenidas para el sistema deltaico del río Mitare</i> ...	91
Tabla 16. <i>Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEO-IAP</i>	105
Tabla 17. <i>Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEA-llama</i>	105
Tabla 18. <i>Longitudes de onda seleccionadas para el análisis de las muestras por EEO-IAP</i>	105
Tabla 19. <i>Longitudes de onda seleccionadas para el análisis de las muestras por EEA-llama</i>	105
Tabla 20. <i>Condiciones del equipo utilizado en el análisis de mercurio total</i>	106
Tabla 21. <i>Límites de determinación</i>	106
Tabla 22. <i>Patrones estándar certificados utilizados para el cálculo de los factores de corrección para MCAF</i>	107
Tabla 23. <i>Factores de corrección para los resultados obtenidos por el método de fusión para MCAF</i>	107
Tabla 24. <i>Factores de corrección para fusión alcalina</i>	107
Tabla 25. <i>Resultados prueba de hipótesis: planicie costera-resto de los ambientes</i>	109
Tabla 26. <i>Resultados prueba de hipótesis: tres punto de muestreo del canal activo 1</i>	109
Tabla 27. <i>Concentraciones elementales para las muestras analizadas por el método de fusión alcalina (muestra total)</i>	110
Tabla 28. <i>Concentraciones elementales para las muestras analizadas por el método de extracción con HCl 1 M</i>	111
Tabla 29. <i>Concentraciones elementales para las muestras analizadas por el método de extracción con HNO₃ concentrado</i>	112

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. <i>Ubicación del área de estudio, delta del río Mitare</i>	2
Figura 2. <i>Delta del río Nilo</i>	5
Figura 3. <i>Tipos de deltas aluviales</i>	6
Figura 4. <i>Clasificación de los deltas en base al flujo de sedimentos, mareas y corrientes</i>	7
Figura 5. <i>Esquema generalizado de un sistema deltaico y sus subambientes característicos</i> .	8
Figura 6. <i>Relaciones carga/radio de los elementos químicos y control geoquímico</i>	10
Figura 7. <i>Cuencas hidrográficas del estado Falcón</i>	12
Figura 8. <i>Áreas climáticas del sistema montañoso noroccidental de Venezuela</i>	14
Figura 9. <i>Frecuencia del viento</i>	15
Figura 10. <i>Delta del río Mitare</i>	16
Figura 11. <i>Estrecho Punta Caimán-Tiguadare (La Boca) del Golfete de Coro</i>	17
Figura 12. <i>Mapa geológico de la cuenca del río Mitare</i>	21
Figura 13. <i>Máximo desarrollo del “pull-apart” en la Cuenca de Falcón</i>	23
Figura 14. <i>Mapa geológico del delta del río Mitare</i>	26
Figura 15. <i>Esquema de la metodología desarrollada en este proyecto</i>	36
Figura 16. <i>Muestreo de sedimentos superficiales empleando barreno</i>	37
Figura 17. <i>Esquema del núcleo y nomenclatura de las muestras</i>	37
Figura 18. <i>Fotografías de afloramientos de la C.C.F</i>	38
Figura 19. <i>Mapa de ubicación de los puntos de muestreo</i>	40
Figura 20. <i>Fotografías de la metodología experimental a) Tamizadora automática empleada en el proceso de tamizado en seco. b) Muestras de sedimentos luego de la determinación de pérdida al rojo</i>	41
Figura 21. <i>Fotografías de la metodología experimental. a) Centrifuga empleada para separar los extractos HCl y HNO₃ de sus respectivos residuos. b) Baños de arena y montaje empleado para llevar las muestras a 95°C durante la extracción con HNO₃</i>	43
Figura 22. <i>Fotografías de la metodología experimental a) Perla preparada para una de las muestras en un crisol de grafito. b) Disolución de perlas en planchas de calentamiento</i>	44
Figura 23. <i>Planicie costera y cristales de sal en costras salinas</i>	47

Figura 24. <i>Planicie de inundación y dunas tipo nebkhas</i>	48
Figura 25. <i>Sistemas microdeltaicos de los canales activos</i>	49
Figura 26. <i>Muestreo en el canal activo 1</i>	49
Figura 27. <i>Análisis granulométrico de la planicie costera</i>	52
Figura 28. <i>Análisis granulométrico del canal activo 1</i>	53
Figura 29. <i>Curvas de frecuencia acumulada para planicie de inundación y barra de meandro</i>	54
Figura 30. <i>Histogramas de frecuencia para planicie de inundación y barra de meandro</i>	55
Figura 31. <i>Análisis granulométrico de las dunas</i>	56
Figura 32. <i>Análisis granulométrico del canal activo 2</i>	57
Figura 33. <i>Análisis granulométrico del ambiente fluvial</i>	58
Figura 34. <i>Humedad y pérdida al rojo para los subambientes muestreados</i>	61
Figura 35. <i>Normalización respecto a Corteza Continental, MCAF y NASC</i>	63
Figura 36. <i>Cajas gráficas e histogramas para la distribución de silicio (SiO_2) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare</i>	64
Figura 37. <i>Cajas gráficas e histogramas para la distribución de aluminio (Al_2O_3) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare</i>	64
Figura 38. <i>Caja gráfica e histograma para la distribución de magnesio (MgO) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare</i>	65
Figura 39. <i>Caja gráfica e histograma para la distribución de hierro (Fe_2O_3) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare</i>	66
Figura 40. <i>Normalización de la concentración media de Hg obtenida en este estudio en función de algunos materiales de referencia</i>	68
Figura 41. <i>Distribución de aluminio por ambiente</i>	69
Figura 42. <i>Distribución de calcio por ambiente</i>	70
Figura 43. <i>Distribución de circonio por ambiente</i>	70
Figura 44. <i>Fraccionamiento geoquímico por extracto y fase residual de los elementos determinados para el ambiente fluviodeltaico</i>	73
Figura 45. <i>Relaciones entre las concentraciones en muestra total, de magnesio respecto a aluminio y potasio en el ambiente fluviodeltaico</i>	75
Figura 46. <i>Relación entre las concentraciones en muestra total de hierro y plomo en el ambiente fluviodeltaico</i>	76

Figura 47. <i>Relación entre las concentraciones en muestra total de manganeso y aluminio en el ambiente fluviodeltaico</i>	76
Figura 48. <i>Fraccionamiento geoquímico por extracto y fase residual de los elementos determinados para la planicie costera</i>	79
Figura 49. <i>Perfiles geoquímicos de los elementos hierro y aluminio (en muestra total) en la planicie costera</i>	80
Figura 50. <i>Perfil geoquímico del sodio (en muestra total) en la planicie costera</i>	82
Figura 51. <i>Perfiles geoquímicos de los elementos calcio (en muestra total y en el extracto HCl) y magnesio (en el extracto HCl) en la planicie costera</i>	83
Figura 52. <i>Gráfico A-CN-K en donde se ubican las muestras del ambiente fluviodeltaico del río Mitare</i>	85
Figura 53. <i>Mapa del delta del río Mitare. Se representan los intervalos de similitud geoquímica entre depósitos</i>	87
Figura 54. <i>Distribución de mercurio por ambiente</i>	92
Figura 55. <i>Perfil de distribución de mercurio en la planicie costera</i>	92



INTRODUCCIÓN

En el norte de Venezuela se extienden 3.700 km de costas extremadamente diversas y variadas (Ley de zonas costeras, 2000). Dentro de los rasgos geomorfológicos que caracterizan a estas áreas, se encuentran los sistemas deltaicos de importantes cuencas hidrográficas del país, como por ejemplo hacia la región oriental los deltas de los ríos Unare y Manzanares, en la región occidental los deltas de los ríos Catatumbo y Motatán, en la región litoral norcentral el delta del río San Juan y en la región del Bajo Orinoco el delta del río Orinoco.

Los sistemas deltaicos, concatenan los productos finales de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan al material sedimentario desde que está en la fuente hasta su depositación en los mismo, así como también, son sometidos a los efectos de los procesos inherentes a la costa. En consecuencia, guardan un registro litológico y composicional de todos los sucesos sedimentarios que han venido afectando a la cuenca en el último período geológico.

Particularmente, la cuenca del río Mitare es una de las más grandes del área noroccidental del país. Recoge las aguas que discurren sobre parte de la secuencia sedimentaria terciaria de la Cuenca Central de Falcón, entre los paleoarrecifes de San Luis y Churuguara al este y el alto de Dabajuro al oeste. Al acercarse a la población de Sabaneta, tiene lugar una disminución del relieve circundante que da paso al desarrollo de la planicie fluviodeltaica del río Mitare, que constituye el área de interés de esta investigación (figura 1).

Algunas características de la cuenca del río Mitare son: clima árido y vegetación predominantemente xerófita en toda su extensión, flujo estacional, relieves bajos, litología sedimentaria que incluye material siliciclástico, carbonatos y algunos carbones y actividad humana incipiente con ausencia de grandes poblaciones. Lo antes descrito ha conllevado al desarrollo de un delta en su zona terminal, altamente constructivo, entre elongado y lobulado según Rivas y Rojas, (1997).

Las características geológicas que definen a la región norte del estado Falcón manifiestan indicios de alta complejidad, en función de su asociación con un marco tectónico en constante actividad, como consecuencia de la interacción entre la Placa del Caribe y la Placa Suramericana. Por ello, distintos investigadores han enfocado sus esfuerzos en, no solo describir tales características (Díaz de Gamero, 1977; González de Juana *et al.*, 1980), sino en proponer

modelos que conlleven a una mejor comprensión de la evolución tectónica del área (Muessing, 1978; Boesi y Goddard, 1991; Macellari, 1995; Audemard, 1995 y Porras, 2000).

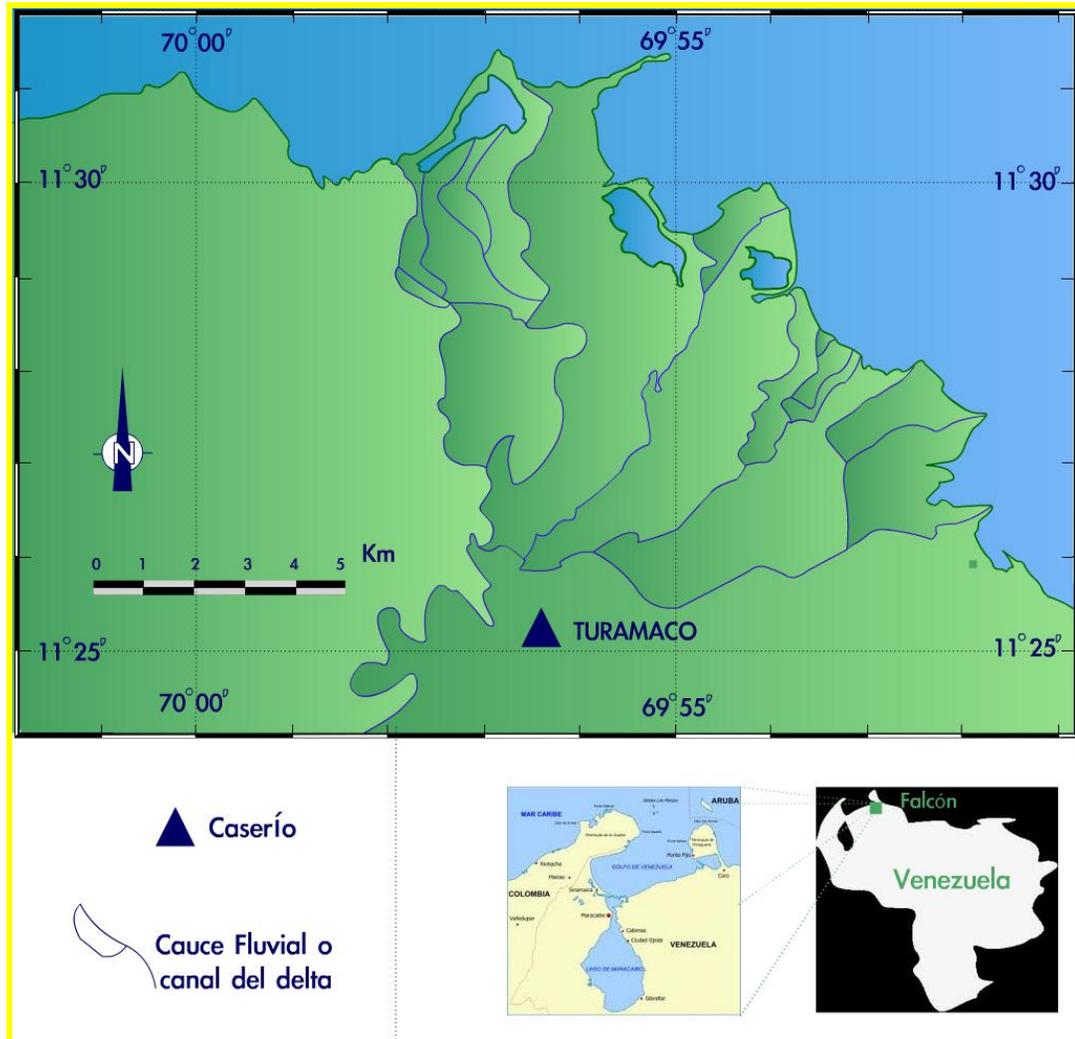


Figura 1. Ubicación del área de estudio, delta del río Mitare

En la cuenca Central de Falcón se han realizado numerosos estudios, particularmente en la rama de la estratigrafía química o quimioestratigrafía (De Abreu, 2005; Fragiél, 2006; Valencia y Villarroel, 2007; Guerrero, 2008) que han contribuido a la interpretación geológica de la misma por medio de correlaciones de perfiles quimioestratigráficos. Adicionalmente, Escorcía (2008) realizó una mezcla de muestras simples pertenecientes a las formaciones Urumaco, Socorro, Querales, Cerro Pelado, Agua Clara, Pedregoso, Pecaya y el Paraiso de la cuenca, con la finalidad de preparar una muestra compuesta cuya composición (Escorcía, 2009; Castillo, 2009; Gámez, 2009) sirviera como referencia en futuras investigaciones (MCAF).



Sin embargo, en el área correspondiente al delta del río Mitare no se han realizado investigaciones de índole geoquímica o quimioestratigráfica, que permitan conocer si hay alguna relación entre las características composicionales de la Cuenca Central de Falcón y los sedimentos que lo componen, cuáles son los procesos geoquímicos y geológicos que condicionan el modelaje morfológico del sistema en la actualidad y si se presentan indicios de las actividades humanas que se desarrollan en las proximidades del mismo.

Es por ello, que se hizo necesario desarrollar una investigación que condujera a un mejor entendimiento de los procesos geoquímicos que ocurren en la cuenca del río Mitare, específicamente en su desembocadura, y obtener conocimientos sobre la concentración y distribución natural de elementos mayoritarios, minoritarios y traza. Para ello se plantean los siguientes objetivos:

1. Objetivo general

Realizar una caracterización geoquímica exploratoria de los sedimentos del delta del río Mitare, estado Falcón.

2. Objetivos específicos

- 2.1. Determinar la distribución granulométrica de los sedimentos del delta del río Mitare.
- 2.2. Establecer la concentración y distribución de un conjunto de elementos mayoritarios (Al, Ca, Fe y Mg), minoritarios, traza y ultratrazas (Ti, Mn, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr y Hg) en la fracción granulométrica correspondiente a lodo (menor a 62,5µm), colectados en diferentes subambientes propios del sistema deltaico del Mitare.
- 2.3. Evaluar las características mineralógicas de los sedimentos en estudio.

Seguidamente, se desarrollan los aspectos teóricos que darán sustento a este proyecto, y que fungirán de herramientas en la interpretación y correlación de los resultados a obtener.



REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación se expone una revisión bibliográfica dividida en cinco aspectos, a saber: generalidades relacionadas con los sistemas deltaicos y su origen, geoquímica sedimentaria, características de cuenca del río Mitare, delta del río Mitare, marco geológico y antecedentes.

1. Generalidades

En un escenario depositacional particular, cuando se reúnen un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos operando en constante armonía con las características geomorfológicas del medio, se constituye un ambiente sedimentario, al cual se asocian ciertas características litológicas, estructurales, orgánicas e inorgánicas particulares para el mismo, también conocidas como facies sedimentarias.

La relevancia de estos conceptos yace en que los mismos, son piezas principales en la interpretación de los procesos de la geoquímica sedimentaria que se ven involucrados en el desarrollo de sistemas geológicos actuales en la superficie terrestre. En este caso en específico, interesa abordar lo referente a los ambientes deltaicos, en particular aquellos dominados por los procesos fluviales y que se forman bajo condiciones climáticas áridas; características que propias del sistema deltaico del río Mitare

1.1. Definición de delta

El término delta fue introducido por el erudito griego Herodotus en el siglo XV d.C., para describir a las llanuras aluviales del río Nilo y sus distributarios, que debido a su forma triangular (figura 2) guardaban similitud con la letra griega Δ (Boggs, 1995; Bird, 2003).

Posteriormente Elliott (1986), establece que los deltas son un tipo de costa en forma de protuberancia que se forma cuando un río entra al océano, mar semi-cerrado, lago o laguna, y en los cuales el suministro de sedimentos es más rápido que la redistribución de los mismos asociada a los procesos inherentes a la cuenca (Boggs, 1995).

Los sistemas deltaicos son particularmente comunes en el océano moderno (desde 6000 a 6500 años hasta el presente), debido a la disminución de la velocidad del ascenso del nivel del mar en la trasgresión marina del Holoceno (Méndez, 2006), y a las grandes cargas de sedimentos que caracterizan a muchos ríos actuales (Boggs, 1995).



Figura 2. Delta del río Nilo (Oczkowski y Nixon, 2008).

1.2. Procesos de sedimentación

Un sistema deltaico se constituye a partir de la interacción de un complejo conjunto de procesos que se catalogan como: constructivos y destructivos. Los procesos constructivos, son aquellos se asocian al flujo de agua y sedimentos, que deriva de un sistema fluvial que se desarrolla a través de un canal fluvial, hasta un cuerpo de agua de elevada quietud y no confinado. Estos incluyen aquellos inherentes al propio canal y la depositación fluvial, tales como, formación de llanuras de inundación, agradación de diques fluviales, avulsión de canales e incisión, migración y relleno del canal; los cuales se ven reflejados en las facies que caracterizan a los deltas, que guardan similitud con su homólogo fluvial. Los procesos destructivos por su parte, se encargan de modificar, redistribuir o remover sedimentos depositados a través de los procesos fluviales constructivos (modificado de Galloway y Hobday, 1983).

La entrada y depositación de sedimentos, generada por los procesos deltaicos constructivos, son influenciadas por factores como, la relación carga suspendida y carga de fondo, volumen total de sedimentos y periodicidad del aporte. El régimen energético de la cuenca reservorio abarca, energía del oleaje, energía de las mareas, corrientes permanentes de la cuenca,

corrientes de viento temporales y potencial gravitacional generado por las diferencias de elevación entre el margen y el fondo de la cuenca (Swift, 1969; Galloway, 1975 en Galloway y Hobday, 1983).

Los procesos constructivos y destructivos, se asocian a su vez a un conjunto de factores regionales que condicionan la formación de un delta. Los mismos son de índole ambiental (clima, vegetación y relieve), morfológica (geometría de la cuenca y pendiente de la plataforma continental) y tectónica (tasa de subsidencia).

El conocimiento de la interrelación de los factores antes mencionados, es necesario para entender las características ambientales de los deltas y su evolución sedimentológica.

1.3. Clasificación de los deltas

Existen dos tipos básicos de deltas: aluviales y no aluviales. Los aluviales (figura 3), son todos aquellos deltas formados por procesos fluviales, bien sea por el efecto de un solo río, como es el caso del sistema en estudio, o por un sistema o red de drenajes. Por su parte, los deltas no aluviales se forman por la presencia o desarrollo de flujos de lavas o piroclastos que se extienden hasta el mar o cierto cuerpo de agua (Boogs, 1995).

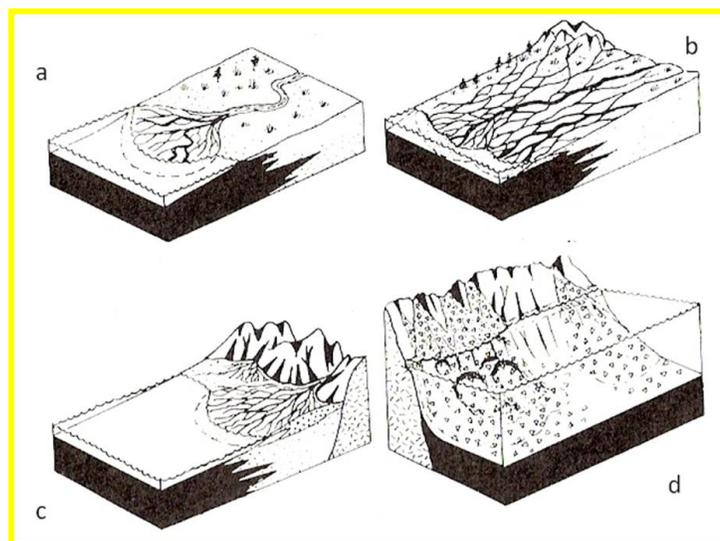


Figura 3. Tipos de deltas aluviales; formados por (a) un solo río, (b) ríos entrelazados, (c) abanicos aluviales (fan deltas) y (d) conos de deyección (modificado de Boggs, 1995).

Los procesos generales que controlan la geometría, morfología y las facies del esqueleto progradacional de los cuerpos deltaicos según Galloway (1975) son tres: aporte de sedimentos, flujo y energía del oleaje, y flujo y energía de las mareas (Galloway y Hobday, 1983). Estos procesos proveen las bases para el establecimiento de la clasificación tripartita de los deltas tanto modernos como antiguos que se presenta en la figura 4. Es de resaltar que la mayoría de los deltas, son el reflejo del impacto combinado de procesos fluviales constructivos y destructivos, relacionados al oleaje y/o a las mareas.

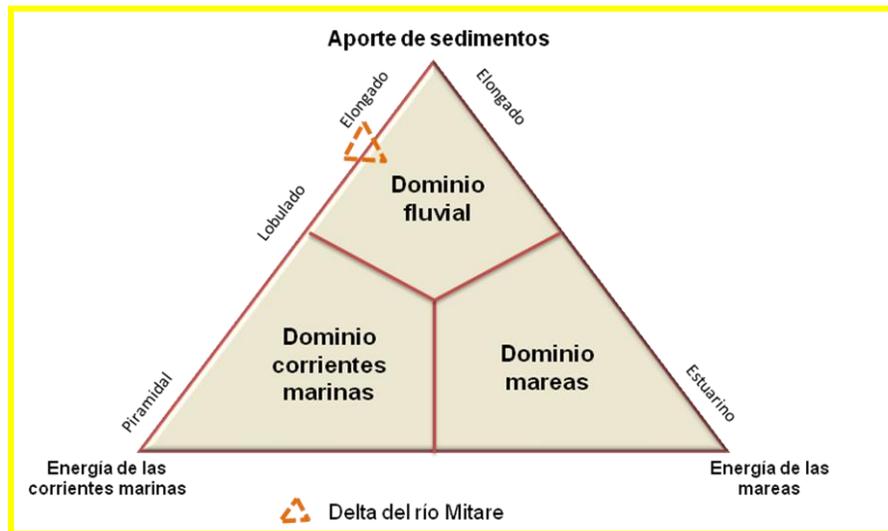


Figura 4. Clasificación de los deltas en base al flujo de sedimentos, mareas y corrientes. Se señala la ubicación relativa del delta del río Mitare dentro de la clasificación (modificado de Galloway y Hobday, 1975).

1.4. Morfología y facies sedimentarias

Debido a los diversos factores que se relacionan con la formación de un sistema deltaico e intensidad de los mismos, las características depositacionales de un delta determinado suelen ser bastante variadas respecto a otros. Sin embargo, todos los deltas pueden ser divididos en sus componentes: subaéreos y subacuáticos; los cuales a su vez pueden ser subdivididos en otras unidades (Boggs, 1995).

El componente subaéreo es de manera habitual, de mayor extensión que el componente subacuático, y se divide en: planicie deltaica superior e inferior. La primera domina por encima de la zona de máximo nivel de mareas, es comúnmente la parte más antigua del delta y está dominada por procesos fluviales, y la segunda, yace entre el nivel mínimo y máximo de la

fluctuación de las mareas y está dominada por una mezcla de procesos fluviales y marinos (Boggs, 1995). La planicie deltaica en general, presenta la mayor variedad de facies, tanto fluviales como de predominancia deltaica; dentro las cuales se pueden incluir: canales principales y secundarios, abanicos de rotura, diques naturales, meandros, llanuras deltaicas, marismas y pantanos (Méndez, 2006).

El componente subacuático de un delta, parte desde la planicie deltaica inferior hacia el mar, y se encuentra por debajo del nivel mínimo de las mareas. El mismo, se caracteriza por la presencia de fauna marina típica de mar abierto (o lagunar, de ser el caso).

La región superior de la zona subacuática, se extiende hasta profundidades de 10 a 15 m, y se conoce como frente deltaico (Boggs, 1995). A éste lo constituyen diversos canales fluviales que forman el delta, así como las corrientes y mareas que moldean la línea de costa y la plataforma somera (Méndez, 2006).

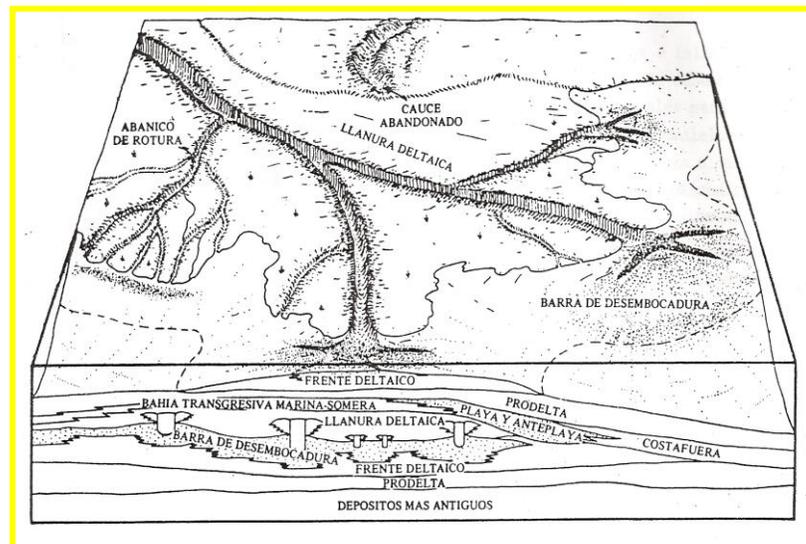


Figura 5. Esquema generalizado de un sistema deltaico y sus subambientes característicos (Creole Petroleum Corporation y Exxon Production Research Company, 1976).

Las facies dominantes en el frente deltaico son barras de desembocadura y barras submarinas. Los sedimentos del frente deltaico progradan de acuerdo con al tipo de delta. En un delta controlado por la descarga de sedimentos fluviales, se forman grandes barras de desembocadura que avanzan rápidamente sobre los sedimentos previamente depositados en el prodelta (Méndez, 2006).



La región restante del componente subacuático deltaico, de mayor profundidad, se conoce como prodelta (Boggs, 1995). Este ambiente presenta los sedimentos más finos aportados por el delta, corrientes marinas y mareas. Están formados principalmente por limos y arcillas. A mayor distancia de la línea de costa hay predominio de arcillas transportadas en suspensión. A su vez, presenta fauna marina formada por gasterópodos, pelecípodos, foraminíferos bentónicos y planctónicos, crustáceos y equinoides, entre otros. Los sedimentos del prodelta pueden presentar un contenido importante de materia orgánica. (Méndez, 2006).

2. Geoquímica sedimentaria

La abundancia, distribución y migración de los elementos en los ambientes sedimentarios, depende de las propiedades tanto físicas como químicas de los elementos, las cuales se desprenden de la estructura electrónica de los átomos y de su número atómico. Estas propiedades guardan una periodicidad entre cada elemento y están representadas en lo que conocemos como tabla periódica de los elementos (Mason y Moore, 1982, Brownlow, 1996).

La distribución de los elementos en los sedimentos depende de su capacidad para interactuar con otras especies bien sean minerales, orgánicas o bioquímicas. Estos elementos dependiendo de su abundancia absoluta se clasifican como mayoritarios cuando se encuentran en una concentración mayor al 1%, minoritarios, los que se hallan entre 1 y 0.1% y en concentraciones menores a 0.1% elementos traza (Martínez, 2007).

La movilidad de estos elementos químicos en un sistema sedimentario, viene dada por aquella distribución secundaria propiciada por la meteorización y que depende de las propiedades intrínsecas del elemento así como del ambiente exógeno en el cual se encuentre (Mason y Moore, 1982).

Los parámetros que controlan la movilidad de los elementos, en determinado ambiente sedimentario son: potencial iónico (relación carga/radio), concentración de iones hidrógeno (pH), potencial de oxidación-reducción (Eh), salinidad y temperatura (Martínez, 2007). En la figura 6 se muestra las relaciones carga/radio de los elementos químicos que influyen en su comportamiento en sistemas naturales, tales como los ambientes deltaicos.

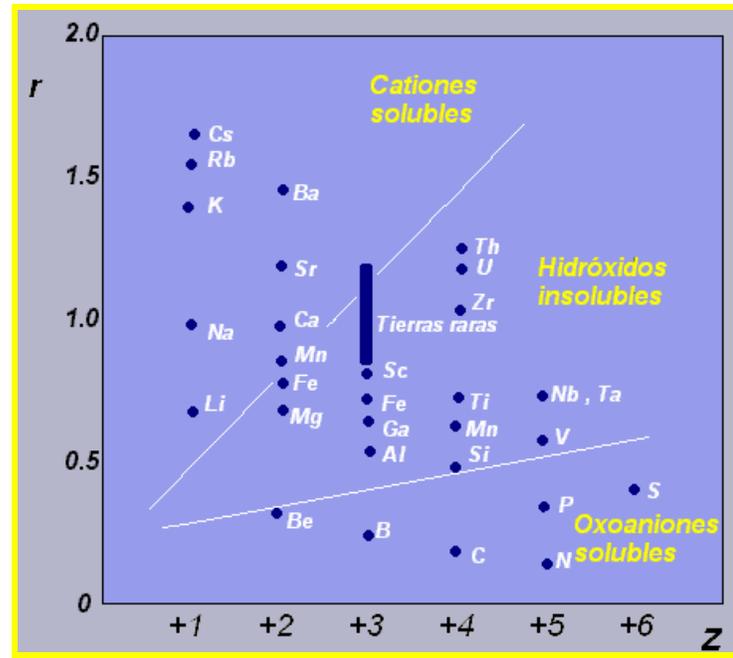


Figura 6. Relaciones carga/radio de los elementos químicos y control geoquímico (Martínez, 2007).

En los sistemas deltaicos controlados por procesos fluviales y marinos, se da cabida al desarrollo de una serie de procesos fisicoquímicos que juegan un papel predominante en la movilidad de los elementos, particularmente los metales como fases disueltas o en interacción con las partículas sedimentarias. Entre estos procesos se encuentran la absorción, el intercambio iónico, la precipitación, la coprecipitación, la floculación, el acomplejamiento y la quelatación.

- 2.1. Adsorción: es un proceso mediante el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de los minerales al ser atraídas por fuerzas que pueden ser electrostáticas, tipo Van Der Waals o químicas. Este proceso en el caso de óxidos como goethita, hematita y gibbsita dependen del pH del medio, que controla su carácter negativo o positivo, y para las arcillas sus carga depende de la sustitución isomórfica que ocurre durante los procesos de formación del cristal mineral (Thornber, 1992; Castellan, 1998).
- 2.2. Intercambio iónico: es un proceso por medio del cual, un sólido insoluble remueve iones de cargas positivas por intercambio catiónico o negativas por intercambio aniónico, de una solución electrolítica que transfiere otros iones de carga similar a la solución en una cantidad equivalente.



Este fenómeno está controlado por la naturaleza de las especies involucradas y las condiciones fisicoquímicas del medio (Yariv y Cross, 1979; Rayner-Canham, 2000).

- 2.3. Precipitación: se refiere a la formación de sólidos mediante el proceso de nucleación en una solución por un incremento en la concentración de las especies; es decir, por sobresaturación de la solución. Este proceso está determinado por la naturaleza de las especies presentes y las características fisicoquímicas del medio donde tiene lugar (Yariv y Cross, 1979; Rayner-Canham, 2000).
- 2.4. Coprecipitación: es un proceso por el cual los compuestos solubles, son separados de la solución como resultado de la precipitación de otro elemento más abundante. Un elemento traza que debería estar en solución, coprecipita junto con oxi-hidróxidos de hierro o carbonatos. Durante la coprecipitación ocurren procesos de adsorción, formación de cristales mixtos, oclusión y atrapamiento mecánico (Thornber, 1992).
- 2.5. Floculación: es la formación de partículas gruesas (floculos) como resultado de la agregación de partículas más pequeñas que se encuentran en movimiento en un sistema. El proceso es generalmente acelerado por medios mecánicos, físicos y químicos (Yariv y Cross, 1979).
- 2.6. Acomplejamiento: es la unión de un átomo o ión central con uno o más ligandos para formar una especie metal-ligando denominada complejo. La solubilidad de muchos cationes puede ser incrementada considerablemente, cuando forman enlaces con compuestos orgánicos o inorgánicos para formar complejos. El acomplejamiento viene dado por la naturaleza de la especie metálica, tipo de ligando y condiciones fisicoquímicas del medio (Rayner-Canham, 2000).
- 2.7. Quelatación: los quelatos son compuestos cíclicos organometálicos en los que el metal es parte de uno o más anillos de cinco o seis miembros, son de baja densidad y solubilidad en agua y a menudo de color intenso. Las especies que determinan este tipo de compuestos son denominados agentes quelatantes (Rayner-Canham, 2000).

3. Cuenca del río Mitare

La cuenca del río Mitare (figura 7) se ubica entre los Distritos Federación, Bolívar, Sucre, Miranda y Democracia del Estado Falcón, abarcando un área de 4910, 62 Km² (Ubicación geográfica: 11°41'24" y 10°30'25" Latitud Norte; 70°30'27" y 69°35'00" Longitud Oeste). En la Tabla 1, se describen las características geográficas generales que reúne esta cuenca hidrográfica.

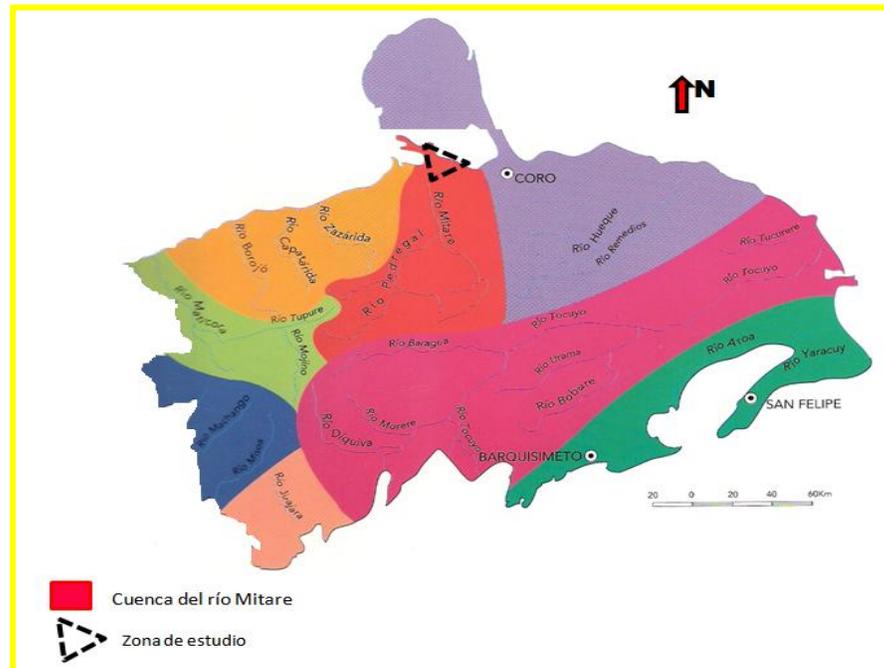


Figura 7. Cuencas hidrográficas del estado Falcón (PDVSA, 1992).

Tabla 1. Características generales más resaltantes de la Cuenca del río Mitare (Rabassó, 1974; Andara, 1993; Minamb, 1996).

Característica	Descripción
Principales afluentes	Ríos Pedregal, Paraiso o Pecaya, Juan Negro, las quebradas Purureche y Adentro.
Cota máxima	1.200 m.s.n.m. (Cerro el Capeyal).
Cota mínima	2 m.s.n.m. (Golfo de Venezuela).
Longitud del cauce principal	107 Km.



Continuación Tabla 1.

Sección transversal	360 m ² (en las cercanías de la población de Sabaneta).
Gradiente	Menor a 0,15 % (al Norte de Sabaneta).
Volumen de agua	173 Hm ³ .*
pH medio	7,8 (medido a la altura del puente de Sabaneta).
Velocidad máxima	Entre 21 y 26 m/s.*
Precipitación media	714 mm/año.
Temperatura media	Mayor a 27 °C.
Evapotranspiración media	1.300 mm/año.
Subcuenca de mayor aporte de sedimentos	Paraíso o Pecaya.
Vegetación en la parte alta de la cuenca	Bosque medio ralo.
Vegetación en la parte media y baja de la cuenca	Matorral ralo, con predominio de las especies: cují, yabo, olivo, cardones y arilibal.
Población total	22.112 Hab.
Poblaciones importantes (Hab.)	Pedregal (3.276), La Cruz de Taratara (3.080), San Luis (1.455), Sabaneta (810), La Peña (688), Pecaya (534), Mitare (529), Piedra Grande (176) y Purureche (155).
Principales actividades económicas	Agricultura, artesanía y minería.
Principales rubros agrícola-pecuarios	Cebolla, tomate, pimentón, melón y cría de caprinos.
Pérdida de suelos	Alta.
Contaminación	Baja.
Tipo de ecosistema	Tropical seco.
Paisaje	Deteriorado.

*Medidas realizadas en el embalse del río Mitare, en la Fila Catanejas (cuenca alta del río Mitare).

El río Mitare se caracteriza por ser una corriente intermitente que fluye por cortos períodos durante los meses de mayo y octubre/noviembre (Rabassó, 1974). Nace a unos 800 m.s.n.m. al pie del Cerro Copeyal en la Serranía de Buena Vista, en el límite con el estado Lara (Rivas y Rojas, 1997). Al norte de Sabaneta, el cauce del Mitare forma grandes meandros a través de un plano deltaico costero que está sufriendo un levantamiento paulatino. Más hacia el norte, el río fluye a través de una planicie de inundación cuyos flancos están ocupados por extensas planicies fangocostas y salinas (Rabassó, 1974).

3.1. Clima

La zona correspondiente a la cuenca del río Mitare se encuentra en un área climática árida y semiárida, según la clasificación de áreas climáticas del sistema montañoso noroccidental de Venezuela, COPLANARH (1975) (figura 8). En la misma, las precipitaciones son escasas (Tabla 1), y existe un balance hídrico negativo en, por lo menos, nueve meses del año. Las precipitaciones en este medio generalmente caen bajo la forma de violentos aguaceros (altas intensidades y baja duración). Estas lluvias están formadas de grandes gotas dotadas de un gran potencial erosivo que propicia el escurrimiento superficial en detrimento de la infiltración, este escurrimiento se favorece, a su vez, por la escasa cubierta vegetal (vegetación xerófila, con predominancia de especies espinosas).

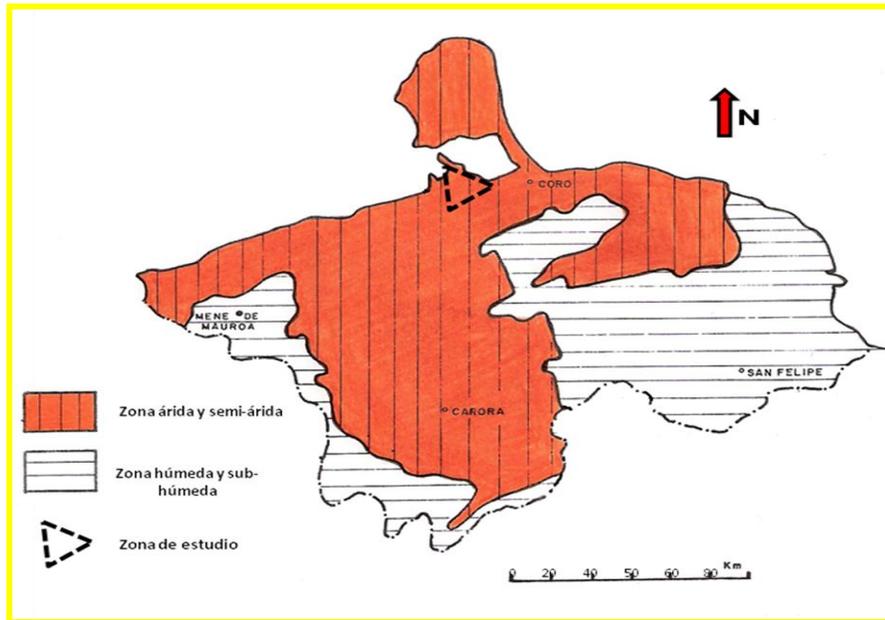


Figura 8. Áreas climáticas del sistema montañoso noroccidental de Venezuela (modificado de COPLANARH, 1975).

3.2. Vientos

El régimen eólico en el área de estudio está determinado principalmente por los vientos alisios, asociados al anticiclón de las Azores. Estos tienen una dirección dominante del Este y son de los más constantes del globo (figura 9.a). Adicionalmente, la topografía plana sin obstáculos orogénicos de importancia que domina en la costa norte del estado Falcón, favorece las altas velocidades del viento y la constancia en la dirección de los mismos. Por esta razón, las

circulaciones costeras locales tipo brisas mar-tierra, parecen no tener lugar en esta zona (Quintero y Terejova, 2008).

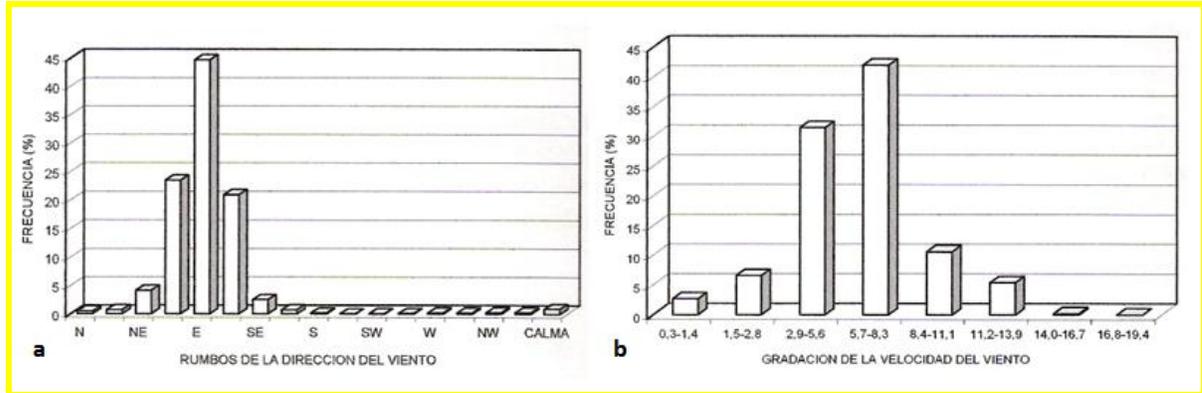


Figura 9. Frecuencia del viento: (a) rumbos de la dirección del viento y (b) gradación de la velocidad del viento (Quintero y Terejova, 2008).

En la estación meteorológica del Aeropuerto de Coro, adscrita al Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, se observaron durante todo el año, vientos con velocidad promedio de 6,0 m/s (figura 9.b). Las mayores velocidades se registraron en los meses de marzo y abril (6,8 m/s), las más bajas se obtuvieron en el mes de octubre (4,7 m/s). Así mismo en el transcurso del año, se observaron vientos predominantes del Este, a excepción de julio cuando se registra E-SE (Quintero y Terejova, 2008).

Tomando en cuenta la homogeneidad orográfica del área de estudio, es posible suponer que, en general, las conclusiones realizadas para la estación meteorológica ubicada en Coro, también son válidas para la zona del delta del río Mitare.

4. Delta del río Mitare

El delta del río Mitare (figura 10) se ubica en la zona norcentral del estado Falcón, ocupando gran parte del distrito Miranda del mismo. Abarca una superficie de aproximadamente 65 Km², y forma parte de la entidad natural denominada piedemonte costero semiárido (COPLANARH, 1975).



Figura 10. Delta del río Mitare (modificado de google earth, 2010).

Por la geometría de sus lóbulos, el delta del río Mitare se puede considerar como un sistema deltaico mixto, entre elongado (pata de pájaro) y lobulado según la clasificación de Galloway y Hobday (1983), siendo el resultado de la combinación de poca energía en las corrientes marinas y grandes flujos cíclicos de la corriente fluvial, que han propiciado una rápida regresión marina local que condujo a la formación del delta (Rabassó, 1974).

Los canales distributarios presentes en el delta del río Mitare, son depresiones anchas, poco profundas y sin desarrollo de pantanos y marismas en las zonas interdistributarias, ya que las mismas, desde el punto de vista fisiográfico, no favorecen la formación de estos subambientes. El cauce de los canales está pobremente definido debido a la ausencia de diques fluviales. Durante el período de mayor caudal, la planicie deltaica está bajo la influencia de grandes flujos de agua, por lo que el flujo de agua en las áreas interdistributarias es similar al flujo superficial de los abanicos aluviales (Rabassó, 1974).

Uno de los rasgos geográficos que mayor influencia ha tenido en la evolución sedimentológica, geomorfológica y estratigráfica del delta del Mitare es el Golfete de Coro. Es por ellos que seguidamente, se exponen algunas de las características más resaltantes de este sistema.

4.1. Golfete de Coro

Al norte del área de estudio se encuentra el Golfete de Coro, el cual es una cuenca marina pequeña y muy restringida al sur de la Península de Paraguaná. El mismo, mide aproximadamente 50 km en dirección NW-SE y 25 km en la dirección NE-SW. Aun cuando esto puede significar una extensión considerable (750 Km^2), el agua que puede alojar es comparativamente poca ($0,75 \text{ Km}^3$), en relación por ejemplo, al Golfo de Cariaco de dimensiones similares pero con $31,5 \text{ Km}^3$ de volumen (Quintero y Terejova, 2008).

Su profundidad máxima es de 7 m en el acceso al golfete. La misma está condicionada por una progradación cada vez más rápida del delta. La distribución de corrientes en el golfete es variable de acuerdo a la temporada. Durante la estación seca las corrientes marinas predominan (Rabbassó, 1974).

Quintero y Terejova (2008), en su trabajo sobre la influencia de las corrientes marinas sobre el transporte de sedimentos en la boca del Golfete de Coro, establecen que el transporte de sedimentos neto anual en las diferentes secciones de La Boca del golfete (figura 11), es 13.328 ton/año. Este valor es bajo en comparación, por ejemplo, con el río Orinoco que transporta 200×10^6 ton/año de sólidos suspendidos (Lasso *et al.*, 2003 en Quintero y Terejova, 2008), sin embargo, es el responsable de la formación de las isletas en el área de Punta Caimán.



Figura 11. Estrecho Punta Caimán-Tiguadare (La Boca) del Golfete de Coro (PDVSA, 1992).



Con la llegada de la estación de lluvia el flujo del Mitare es la corriente dominante. La salinidad en el golfete oscila entre 42.000 y 50.000 ppm de NaCl, siendo una cuenca hipersalina puesto que la salinidad promedio del mar es de 27.210 ppm de NaCl (Rabassó, 1974). En función de esto, es de vital importancia tomar en cuenta tales características correspondientes a este sistema, a la hora de evaluar geoquímicamente la zona terminal del río Mitare.

4.2. Condiciones oceanográficas

Las mareas en la zona del Golfete de Coro, son del tipo semidiurno mixto, es decir, dos pleamares (nivel más alto que alcanzan las aguas es una marea creciente) y dos bajamares de alturas diferentes en el período de un ciclo lunar igual a 24 horas, 50 minutos y 28 segundos (Quintero y Terejova, 2008).

El sistema de corrientes marinas del Golfete de Coro y particularmente en La Boca, está regido por el fenómeno de las mareas y por la acción tangencial del viento sobre las aguas. A la acción periódica de las mareas se le agrega la acción del viento que va aumentando en el curso del día y que induce igualmente a que las corrientes aumenten hasta valores cercanos a 1 m/seg (Quintero y Terejova, 2008).

5. Marco Geológico

El norte de Venezuela es una región caracterizada por una gran diversidad geológica, en respuesta al complejo de eventos orogénicos ocurridos a partir del Eoceno tardío en esta área, como efecto de la colisión de un microcontinente y un arco de isla (Placa Caribe) contra el oeste-noroeste de Suramérica (Audemard, 1997).

En función de ello, un amplio conjunto de investigadores en el área, han desarrollado distintos trabajos en la Cuenca de Falcón, considerada una de las mejores regiones de Venezuela para evaluar la actividad tectónica durante los últimos 30 millones de años, debido a la existencia de una sedimentación casi continua y a que está bien datada paleontológicamente. Estas investigaciones, fungen de fundamento en el desarrollo del marco geológico presente a continuación.



5.1. Cuenca de Falcón

El sistema deltaico del río Mitare, es un fragmento de los depósitos cuaternarios de la planicie costera del Estado Falcón. Sin embargo, desde el punto de vista geológico, esta zona se ha visto afectada por un complejo conjunto de procesos tectónicos que han modificado la paleogeografía de la región ubicada tanto de Falcón como del este del estado Zulia, y la parte norte de los estados Lara y Yaracuy desde, constituyendo lo que se conoce como Cuenca de Falcón.

La Cuenca de Falcón aflora actualmente sobre unos 36.000 Km² en el noroccidente venezolano. Esta está dispuesta sobre el alóctono Caribe emplazado cercana al extremo noreste de Los Andes venezolanos (González de Juana *et al.*, 1980), durante la fase de compresión de edad Paleoceno-Eoceno temprano. La misma, es elongada en dirección este-oeste, y está limitada por zonas emergidas en sus márgenes sur, oeste y parcialmente cerrada al norte por la “isla” de Paraguaná (Audemard, 1995).

La secuencia sedimentaria de la Cuenca de Falcón, globalmente presenta las siguientes características:

- Las facies cambian lateralmente, haciéndose progresivamente más marinas hacia el Este.
- La secuencia evoluciona verticalmente de depósitos marinos profundos (Formación Pecaya) a unidades sedimentarias esencialmente más continentales, pasando por depósitos de plataforma continental y de zona litoral (Formación Codore y La Vela), siendo en general, una secuencia globalmente regresiva.
- La evolución ocurre de forma progresiva salvo en ciertos caso en los que los cambios son abruptos, y correspondientes a discordancias asociadas a los límites Plio-Pleistoceno, Mio-Plioceno y Mioceno medio-inferior.

En Venezuela Occidental, el Eoceno representa un período de Erosión, por lo cual, en la región central de la Cuenca de Falcón no afloran rocas más antiguas que el Oligoceno (González de Juana *et al.*, 1980). La Cuenca Central de Falcón durante el Oligoceno y el Mioceno temprano, fue principalmente una cuenca marina abierta hacia el este, sedimentada diacrónicamente hacia el oeste, y asociada a una fuerte subsidencia tectónica, que marca el inicio de la sedimentación de la

cuenca, caracterizado por las intercalaciones de lutitas y areniscas de la Formación El Paraíso (Audemard, 1995).

Aunado a esto, la cuenca se caracterizó en el este periodo por la presencia de dos subcuencas denominadas Subcuenca de Falcón Occidental (Cuenca Central de Falcón) y Subcuenca de Hueque (Cuenca Oriental de Falcón), separadas entre sí por un estrechamiento del “Canal Central” a causa de dos desarrollos arrecifales ocurridos durante este periodo, uno al norte de la Sierra de San Luis y otra al sur en la región de Churuguara. (Wheeler, 1963 en González de Juana et al., 1980). La Cuenca Central de Falcón presenta mayor relevancia para el estudio a realizar, debido a que las aguas del río Mitare discurren sobre las secuencias litológicas que la caracterizan (figura 12).

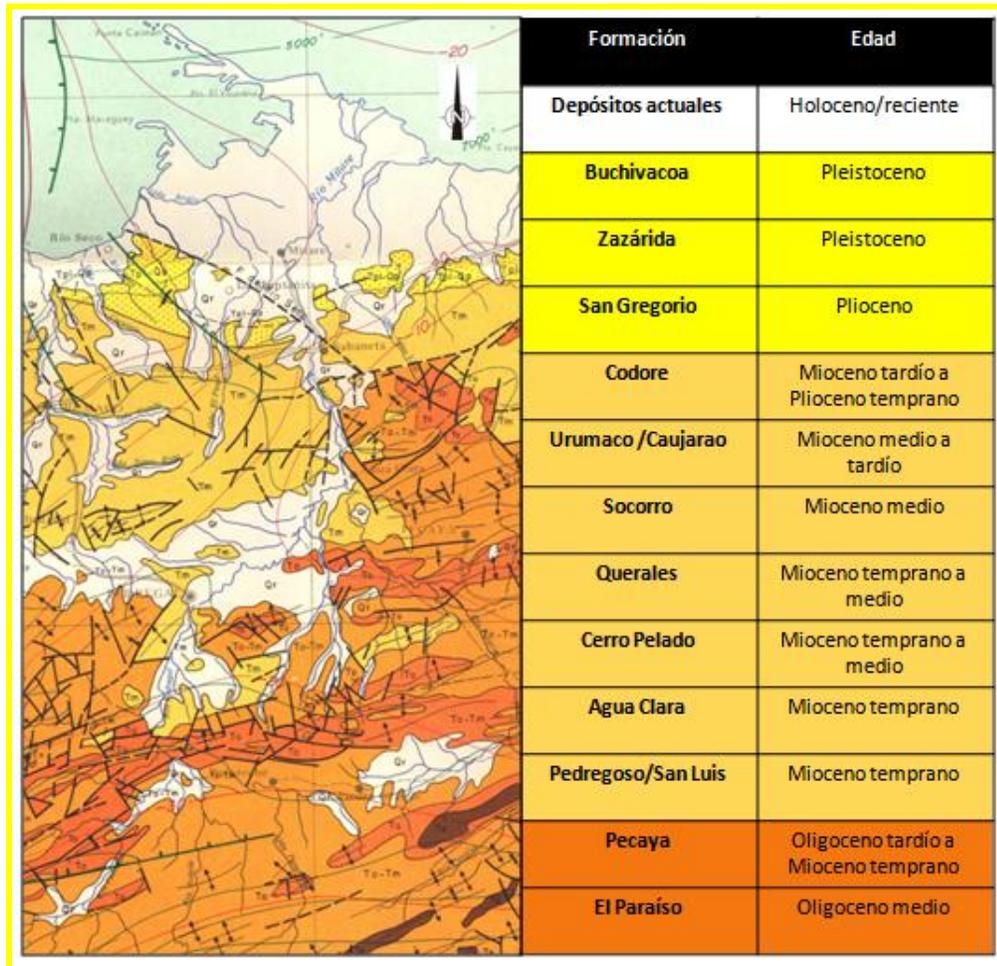


Figura 12. Mapa geológico de la cuenca del río Mitare, en donde se muestran las formaciones terciarias dispuestas en su trayectoria.



A medida que avanza la trasgresión del Oligoceno hacia el oeste, los ambientes sedimentarios dentro de la cuenca se hacen cada vez más marinos. Bajo estas condiciones de mayor profundidad (con máximo aproximado de 1.000 m), tuvo lugar la sedimentación del extenso cuerpo de lutitas oscuras que caracteriza a la Formación Pecaya. Suprayacente a esta Formación, se encuentra la Formación Pedregoso, la cual representa la sedimentación de un abanico turbidítico desarrollado al soroeste del complejo arrecifal de la Sierra de San Luis, también conocido como Formación San Luis (González de Juana *et al.*, 1980).

Según Audemard (1995), la Cuenca de Falcón desaparece como tal, a partir del límite Mioceno medio-Mioceno inferior, como consecuencia de una fase tectónica mayor responsable de la inversión, y de la estructuración de la cuenca bajo la forma de un gran anticlinorio.

El conjunto Mioceno medio-superior es en general, menos marino que el conjunto subyacente. El eje de la sedimentación es desplazado hacia el norte del Antoclinorio de Falcón, como consecuencia directa de la inversión tectónica de la cuenca (Audemard, 1995).

González de Juana *et al.* (1980) señalan que la unidad basal en Falcón occidental durante este nuevo ciclo la representa la Formación Cerro Pelado, depositada en un ambiente nerítico y caracterizada por la presencia de areniscas carbonáceas, lutitas arenosas carbonosas y capas explotables de lignito. Dicha formación infrayace a la Formación Socorro o las formaciones Querales y Socorro, donde la primera puede ser diferenciada por su litología constituida básicamente por un intervalo de lutitas mientras que la segunda se caracteriza por la presencia de areniscas que forman gruesos paquetes, estas formaciones corresponden al Mioceno medio.

Las unidades litológicas que suprayacen a las anteriores son la Formación Caujarao en los Municipios Miranda, Colina y Zamora, y la Formación Urumaco en el Municipio Democracia del Estado Falcón, las diferencias más destacadas entre estas dos formaciones similares proceden del cambio de ambientes, más marino hacia el este y de mayor influencia continental hacia el oeste, lo que lleva a que exista una mayor abundancia de calizas y margas en la Formación Caujarao con respecto a la Formación Urumaco, las mismas se ubican dentro del Mioceno Tardío. Posteriormente se genera una regresión depositándose facies costero-continentales representadas por las formaciones Codore, San Gregorio y La Vela. El conjunto Plio-Cuaternario es



esencialmente continental en toda la Cuenca de Falcón, exceptuando las zonas actualmente sumergidas y parcialmente sumergidas durante los máximos marinos interglaciares (tal como Paraguaná y las líneas de costa). Por ende, este conjunto está compuesto por depósitos continentales, restringidos básicamente a la plataforma de Debajuro (suroeste de la cuenca) y al sector norcentral del estado Falcón, y por los depósitos marinos asociados a la costa actual y a la Península de Paraguaná (Audemard, 1995).

5.2. Evolución tectónica de la Cuenca de Falcón

Para explicar contexto geodinámico en el cual se enmarca la Cuenca de Falcón, se han desarrollado diversas teorías a lo largo de las últimas tres décadas, algunas de las cuales se presentan a continuación.

Muessig (1978) indica que la cuenca de Falcón se originó durante el Eoceno Tardío a Oligoceno, en una zona tipo *pull-apart*, causado por movimientos transcurrentes entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana. Este autor define este límite de placas como una falla transformante y la expresa como una serie de fallamientos dextrales a lo largo de una línea que permite conectar la Falla de Oca con la Falla de San Sebastián (en Arellano y Umérez, 2004).

Estos movimientos transcurrentes a lo largo de las fallas, generaron la extensión en dirección noreste, produciéndose así fallas normales y provocando el adelgazamiento de la corteza y la generación de magmas basálticos alcalinos. Este modelo estructural propuesto por Muessig (1978), le permite establecer en su teoría que las islas de Los Monjes y La Orchila, la Península de Paraguaná y la cuenca de Falcón fueron casi yuxtapuestas antes de la extensión del Oligoceno (en Arellano y Umérez, 2004).

Macellari (1995) coincide con Muessig (1978) en el proceso de generación de la cuenca, ya que este modelo permite explicar los flujos basálticos orientados en el centro de la cuenca falconiana. El primero aporta adicionalmente, que la formación de la cuenca *pull-apart* (figura 13) se debió al empuje de material alóctono hacia el norte asociado al desplazamiento a través de la falla de Oca y formándose una cuenca *foreland* con orientación ENE-WSW. De igual manera, el autor indicó que el movimiento transpresivo a lo largo de la falla del margen de Suramérica durante el Plioceno, resultó en la subducción de bajo ángulo de la placa Caribe por debajo del

ridge de Curazao. Durante este tiempo, el frente de falla del Anticlinorio de Falcón migró más lejos hacia el norte y cesó la extensión a lo largo de las fallas con orientación NW-SE.

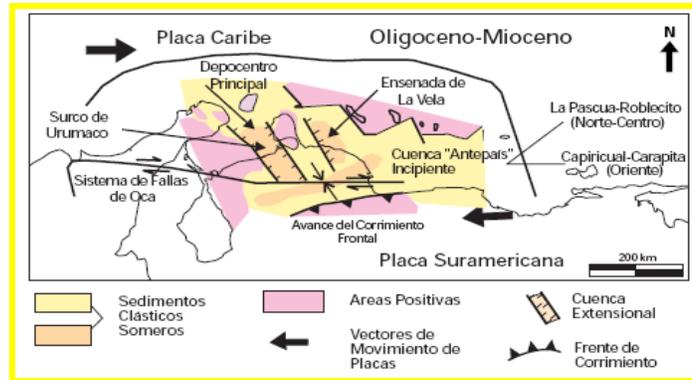


Figura 13. Máximo desarrollo del *pull-apart* en la Cuenca de Falcón (modificado de Macellari, 1995, en Singer, 1997)

Boesi y Gooddard (1991) proponen otro modelo conceptual de la cuenca de Falcón, orientado a conocer el hábitat de hidrocarburos en la cuenca. El mismo está basado en la forma de bote de la cuenca con eje este-oeste y una sección central angosta localizada entre los pueblos de Churuguara y San Luis; esta forma es la que determina la distribución sedimentaria de la cuenca durante el Oligoceno-Mioceno. Este modelo incluye la tendencia noreste del fallamiento normal antes mencionado, responsable de la extensión norte del desarrollo de la Cuenca de Falcón (en Arellano y Umérez, 2004).

Audemard (1995), rechaza que el origen de la Cuenca de Falcón esté asociado al desarrollo de una cuenca *pull-apart*, como consecuencia del movimiento transcurrente dextral del sistema de Oca-San Sebastián-El Pilar. El mismo indica que para un sistema en tracción como lo refieren los autores previamente citados, una longitud del orden de 600 Km correspondiente al conjunto de la Cuenca Falcón-Bonaire es un valor demasiado exacerbado. Además, la existencia de una fase tectónica distensiva de edad oligoceno es observada a todo lo largo de la margen norte del continente suramericano. En función de ello propone, que la Cuenca de Falcón nace durante una fase de rifting de edad oligoceno a consecuencia de un campo de esfuerzos regionales distensivos, cuyo esfuerzo mínimo está orientado N15W, produciéndose posteriormente tres etapas tectónicas distintas: (i) proceso de inversión tectónica de la cuenca (desarrollo estructural del Anticlinorio de Falcón) hacia el Mioceno medio y superior, originado



por un campo de esfuerzos regionales caracterizado por esfuerzos mínimo y máximo subhorizontales, e igualmente responsable del plegamiento general de la Cuenca de Falcón; (ii) fase de compresión Mio-pliocena, responsable en la Cuenca Central de Falcón, de la discordancia que separa a la Formación Codore de las formaciones Urumaco y Caujarao; y (iii) fase de compresión plio-pleistocena, que comienza con la sedimentación de la Formación Coro y que provoca su basculamiento progresivo, igualmente responsable de la verticalidad de la Formación Coro (Plioceno temprano). Esta última fase tectónica, es la encargada de la configuración actual de la Cuenca Central de Falcón.

Más recientemente, Porras (2000) menciona que el origen de la Cuenca de Falcón-Bonaire está asociado a colapsos extensionales internos dentro de una cuenca de retroarco (*back arc*), en un orógeno de flotación que colisionó oblicuamente con el extremo noroccidental de la Placa Suramericana, suturándose diacrónicamente de oeste a este desde el Cretácico Tardío hasta comienzos del Mioceno Temprano (en Valencia, 2007).

5.3. Actividad tectónica cuaternaria

La Cuenca de Falcón en la actualidad está sujeta a una actividad tectónica permanente. Como evidencia de lo anterior, se han desarrollado el conjunto de fallas activas que caracterizan a ésta región, las cuales se muestran en la figura 13. Esta zona está sometida a un esfuerzo horizontal mínimo y máximo en dirección ENE-WSW y NNW-SSE a N-S, respectivamente. Este último es el responsable de las fallas y otros rasgos estructurales pertenecientes a los patrones siguientes (Audemard, 1999):

- Sistema NNW-SSE (Los Médanos, Cabo San Román, Puerto Escondido, costa occidental de Paraguaná) en fallas normales.
- Sistema NW-SE (Río Seco, Urumaco, Lagarto, fallas de la costa oriental falconiana) con movimiento transcurrente dextral.
- Sistema N-S a NNE-SSW (Carrizal, El Hatillo) en transcurrancia sinistral.



- Cabalgamiento de Churure-La Mina de Coro-Guadalupe, de dirección ENE-WSW y otros menores de igual orientación (Araurima, Matapalo).
- Sistema de fallas de Oca-Ancón de dirección general este-oeste, siguiendo un movimiento básicamente dextral compresivo.

5.4. Estratigrafía regional cuaternaria

En base a las provincias geomorfológicas propuestas por Graf (1968) para el noroeste de Venezuela, se conoce que la zona del delta del río Mitare forma parte de la provincia de planicies costeras de Zulia-Falcón.

La provincia de planicies costeras de Zulia-Falcón está constituida por un conjunto de terrazas de edad Cuaternario, cuya elevación va desde la actual línea de costa hasta aproximadamente 130 m en su borde sur. Las mismas están constituidas por las formaciones Zazárida y Buchivacoa del Pleistoceno medio y tardío respectivamente.

Dispuestos sobre las terrazas pleistocenas se encuentran los sedimentos continentales (fluviales y eólicos) y transicionales (paludales, deltaicos, playeros, y marinos de aguas poco profundas) del holoceno, que abarcan una extensión mayor a la ocupada por las terrazas. Así, a partir del siguiente párrafo, se presenta un resumen de las características de cada una de las formaciones antes mencionadas a partir de lo descrito por Graf (1969).

La Formación Zazárida está caracterizada por arcillas limosas y arenosas de color blanco, amarillento y rojo, interestratificadas con delgadas capas de arena cuarzosa de grano medio, localmente con estratificación cruzada y gruesos lentes de conglomerados de grano fino a grueso. La misma, representa los remanentes de antiguos conos fluviales, localmente coalescentes, depositados a lo largo del frente de montañas de las serranías de Falcón. Se dispone discordantemente sobre la Formación San Gregorio y su origen se adjudica a la depositación desarrollada durante el levantamiento eustático del nivel del mar, ocurrido durante el período interglaciario Yarmouth.

Por su parte, la Formación Buchivacoa consiste de arcillas limosas y arenosas, de colores gris, amarillento y rojo, interestratificadas con arcillas limosas grises, rojas y pardas, y raros lentes de arenas conglomeráticas con estratificación cruzada y abundantes nódulos ferruginosos.

Estos depósitos se originaron como parte de un plano costanero progradante, durante los niveles marinos relativamente altos del interglaciar Sangamon.

De acuerdo con lo anterior, los depósitos de la Formación Zazárida constituyen la terraza más alta, presente a lo largo del borde sur de los planos costeros de Falcón central y occidental, y los correspondientes a la Formación Buchivacoa se asocian a la terraza intermedia de los planos costaneros de Falcón central, occidental y Zulia nororiental.

Las terrazas cuaternarias de la planicie costera Zulia-Falcón, junto a las rocas sedimentarias Terciarias de las serranías Lara-Falcón, dan lugar al complejo sistema geológico que constituye a la Cuenca Central de Falcón, el cual resulta de suma importancia para el estudio a realizar, porque contempla las fuentes litológicas de los sedimentos que actualmente están siendo depositados en el delta del río Mitare.

5.5. Geología Local

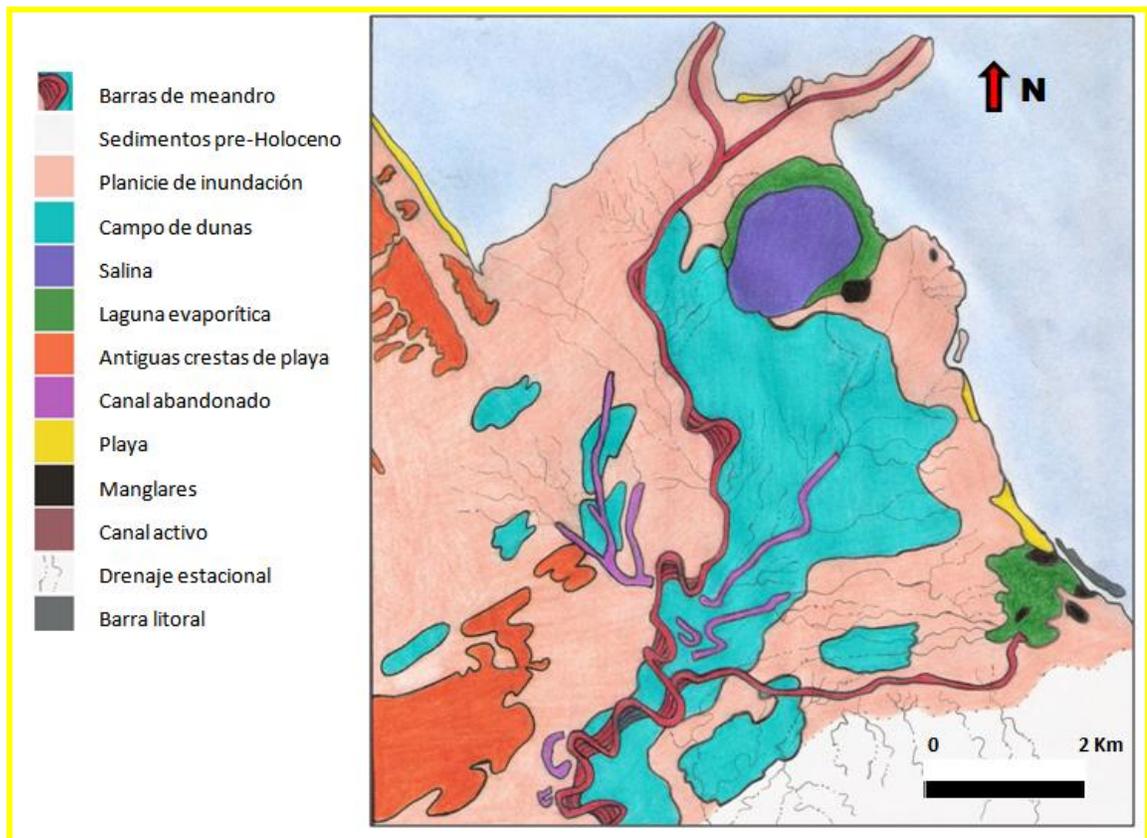


Figura 14. Mapa geológico del delta del río Mitare (modificado de Rivas y Rojas, 1997).



Los subambientes sedimentarios presentes en el sistema deltaico del río Mitare, fueron descritos por Rivas y Rojas (1997), en un estudio sedimentológico realizado en dicha zona. En la figura 14 se muestra la distribución de los ambientes propuestos por estos investigadores que describen a este sistema, los cuales se tomaron como referencia en la campaña de recolección de muestras de la presente investigación.

5.6. Evolución deltaica

En función al modelo de evolución del delta del río Mitare propuesto por Rabassó (1974), se hace una síntesis de las etapas establecidas por este autor, en donde se determina que el progreso, extensión y geometría de este sistema deltaico tiene dos historias, separadas por la constitución del Istmo de los Médanos durante el Holoceno.

La primera etapa de la evolución del delta, está constituida por un sistema piramidal, altamente destructivo y controlado por las corrientes marinas dominantes, precedentes a la constitución del Istmo de los Médanos. El cambio relativo entre la energía de la corriente marina y la fluvial, como consecuencia del cierre del estrecho que comunicaba el Golfo de Venezuela con el Golfo de la Vela, facilitó el comienzo de un nuevo ciclo deltaico constructivo de geometría elongada.

Este sistema sufrió en lo subsiguiente, un conjunto de cambios en cuanto a los patrones de drenaje y dirección de los canales principales, como consecuencia de la dinámica tectónica permanente que aun afecta a esta región. Actualmente este sistema se caracteriza por ser un delta de alta constructividad hacia el Golfete de Coro, entre elongado y lobulado, y dispuesto en dirección norte-noreste.

6. Antecedentes

A continuación se presenta un conjunto de trabajos desarrollados a nivel nacional e internacional referentes, no solo al sistema fluvial y deltaico del río Mitare, sino también a distintos deltas del mundo, de cuya revisión se pretende evidenciar la importancia de la evaluación geoquímica de este tipo de sistemas.



6.1. Antecedentes geológicos

La sección de antecedentes geológicos abarca temas relacionados principalmente con la sedimentología y estratigrafía de sistemas deltaicos y sus zonas aledañas.

Rabassó-Vidal (1976), llevó a cabo un estudio geológico preliminar del delta del río Mitare, con la finalidad de dar un aporte en cuanto a la investigación de sistemas altamente constructivos en zonas áridas tropicales. Para ello realiza un análisis fotogeológico con vistas tomadas en el período 1959-1972. Adicionalmente, a través de un conjunto de visitas a campo en el mismo lapso, identifica un variado y complejo sistema de ambientes sedimentarios fluviales, deltaicos, marinos litorales, evaporíticos y eólicos para el delta del río Mitare, y propone un modelo de su evolución a partir del año 1925.

Betancourth (1983), ejecuta un estudio geológico y estratigráfico de una región al oeste del río Mitare, en donde logra establecer tres unidades geomorfológicas características de un relieve de cuesta y orientadas aproximadamente E-W y que presentan en general un patrón de drenaje paralelo a subparalelo aprovechando las depresiones tectónicas. Identifica la siguiente secuencia sedimentaria correspondiente al período depositacional Mioceno temprano-Plioceno (?) en orden estratigráficamente ascendente: Querales, Socorro, Urumaco y Codore, y finalmente determina que el área de estudio es estructuralmente sencilla, observándose únicamente un monoclinal fallado de buzamiento suave hacia el Norte.

Rivas y Rojas (1997), realizan un estudio complejo del delta del río Mitare en donde logran establecer un modelo sedimentológico del mismo, las relaciones estratigráficas entre las litologías presentes y realizar un análisis de facies completo. Todo esto a través del análisis de fotografías aéreas, observaciones de campo, la descripción de 513,18 pies de núcleos tomados con los sistemas *Vibracore* y *Shelby percussion*, y de los distintos análisis de laboratorio: DRX, granulometría, petrografía, microfauna, macrofauna y minerales pesados. Se lograron establecer 13 facies sedimentarias (nueve arenosas, tres arcillosas y una turba) y se describieron 10 subambientes sedimentarios. Los autores determinaron que el delta actual del río Mitare es un sistema altamente constructivo y dominado por procesos fluviales, que se logró constituir posteriormente del establecimiento del equilibrio del nivel del mar hace unos 5.000 años y luego



de la conformación del Istmo de Coro (hace 3.000 años) que conllevó al cambio en las condiciones energéticas de olas y corrientes marinas en el Golfete de Coro.

Chacartegui et al. (1997), desarrollan un modelo sedimentológico para el delta de la quebrada San Ignacio, la cual desemboca en el área de mayor extensión de la Laguna de Tacarigua denominada Laguna Grande en el estado Miranda. Los autores caracterizan las facies asociadas a cada uno de los subambientes presentes en el delta, distribuidos en siete núcleos de sedimentos tomados por medio del sistema *Vibracore*. Por medio de lo anterior, logran identificar nueve facies arenosas, seis limo-arcillosas y una de materia orgánica, que son de frecuencia recurrente, y se asocian a patrones granodecrecientes y granocrecientes. Debido al predominio de facies de origen fluvial (canales activos y abandonados, barras de desembocadura y planicie de inundación) y a la geometría elongada del delta, los autores concluyen que es un sistema deltaico de flujo intermitente y altamente constructivo. Adicionalmente, realizan una comparación con el delta del río Guapo, de geometría lobulada, que igualmente desemboca en la laguna de Tacarigua, y establecen que estas diferencias morfológicas se deben a una mayor profundidad de las aguas lagunares y una descarga de sedimentos menor en la zona de Laguna Grande (quebrada San Ignacio).

Suárez et al. (1999), desarrollaron un estudio sedimentológico de las dunas de la planicie deltaica del río Mitare con la finalidad de clasificarlas, caracterizarlas y evaluar los procesos responsables de su formación. Esto a través de un trabajo cartográfico y sedimentológico (tamizado en seco, bromoformo, descalcificación e identificación taxonómica de especies vegetales). Las dunas son del tipo *nebkhas* o *coppiece dunes*, orientadas en dirección NE y su sedimentación se produce por la deflación generada por una disminución local de la velocidad del viento como consecuencia del obstáculo constituido por la vegetación herbácea del área. Los sedimentos están caracterizados por arenas de grano medio, selección moderada, leptocúrtica y composición mineralógica de cuarzos, feldespatos, minerales pesados y escaso contenido de carbonatos.

Méndez (2005), se hace un resumen de la evolución geológica y una clasificación del delta del Orinoco, a partir de los aportes de otros investigadores, los datos obtenidos con análisis texturales de los sedimentos e interpretaciones de imágenes de radar y satelitales *landsat*. Cuyas conclusiones indican que este sistema es un delta controlado y moldeado en cuantos a sus facies



sedimentarias por: los sedimentos de fondo, la acción de las mareas y el oleaje y las corrientes de Guayana. Además se concluye que el delta del Orinoco moderno ha sido desarrollado con características de facies deltaicas en forma efectiva, a partir de la transgresión del Holoceno entre 7500-7000 años hasta el presente, previo a esto la sedimentación deltaica estuvo conformada por facies fluviales sobre la plataforma continental actual.

6.2. Antecedentes quimioestratigráficos

Se hace un apartado de algunos de los antecedentes quimioestratigráficos desarrollados en la región, debido a que se considera importante conocer las características composicionales de las distintas secuencias sedimentarias de la Cuenca Central de Falcón que alimentan el sistema sedimentario terminal del río Mitare.

De Abreu (2005), realizó un estudio quimioestratigráfico a la fracción lutítica de la Formación El Paraíso (Oligoceno temprano a medio), a partir del análisis de una matriz de 24 elementos químicos (Mo, Cr, P, Zn, Ni, Co, Si, Mn, Fe, Mg, Zr, Ti, Y, La, Ca, Al, Sr, Ba, K, V, Nb, S_T, C_T), mediante las técnicas EEA-ICP, determinación en el IR y titulación columbimétrica, y la determinación de los índices de pérdida por ignición y de alteración química, para un grupo de 96 muestras, teniéndose como criterio de selección de las mismas los valores de 15% en Al₂O₃ y 2,3% en K₂O previamente obtenidos por Leal y Rivero (2004). De lo anterior resultan tres asociaciones de elementos (terrígenos pesados, fosfatos-carbonatos y litología), indicativos del desarrollo de tres procesos geoquímicos distintos durante la depositación y sedimentación de la secuencia. Los conjuntos de elementos terrígenos pesados y fosfatos-carbonatos, presentan un cambio de quimiofacies a 440 m de altura estratigráfica, probablemente asociado a variaciones en el tipo de fuente o en la energía del medio. La distribución homogénea de los elementos de asociación litológica, posiblemente esté condicionada por el criterio de selección de muestras empleado, sin embargo, indica que no se desarrollaron cambios climáticos considerables durante la depositación de las arcillas.

Fragiel (2006), estudió desde el punto de vista quimioestratigráfico a las litologías de grano fino (lutitas y limolitas) de la Formación Socorro (Mioceno medio-Oligoceno). En donde se evaluaron a través EEA-ICP, Análisis Elementales y Análisis de volátiles, datos composicionales para 51 muestras, entre los que están los siguientes elementos mayoritarios,



minoritarios y trazas: Al, Si, Ti, Fe, Mg, K, Ca, Na, V, Mn, C_T y S_T . A través de la evaluación de los mismos y con la ayuda de herramientas de la estadística multivariada (Ej. perfiles quimioestratigráficos y curvas de acumulación porcentual), se obtienen a lo largo de la sección cuatro quimiofacies, indicativas de cambios redox y climáticos durante su depositación. Adicionalmente, el autor observó que los primeros 352 m de columna o quimiofacies inferiores se depositaron bajo condiciones climáticas más áridas que las presentes hacia el tope. Se demuestra que los litotipos de grano fino, son los que mejor representan a las unidades sedimentarias desde la perspectiva de la homogeneidad y calidad de la información que proporcionan respecto a los litotipos de grano grueso.

Guerrero (2008), desarrolló un estudio quimioestratigráfico de la Formación Querales (Mioceno temprano a medio), en donde se evaluaron 25 elementos mayoritarios, minoritarios y trazas (Si, Al, Fe, Ca, K, Mg, Na, Mn, Ti, Zr, P, Co, V, Cr, Cu, Zn, Sr, Ce, Ba, Pb, Nb, Mo, Se, La, Y), y otros atributos químicos como % de C_T y LOI. La autora obtuvo cuatro asociaciones geoquímicas (clástico grueso, clástico fino, carbonatos y fosfatos), y 8 quimiofacies indicativas de cambios en la energía del medio y en el aporte de sedimentos. Concluyó que las condiciones fisicoquímicas del ambiente de sedimentación fueron óxicas y húmedas, y estuvieron controladas por dos procesos geoquímicos principales: clástico y no clástico. Sus resultados permitieron proponer un ambiente de prodelta a marino somero para la Formación Querales, controlado por una trasgresión local producida por de la tectónica de la cuenca.

Otras formaciones de la cuenca han sido descritas desde el punto de vista quimioestratigráfico, en trabajos anteriores por los siguientes investigadores: Pedregoso (Rojas y Noya, 2001), Cerro Pelado (Castro y Guerra, 2002 y Montero, 2005), Paraíso (Romero, 2007), Urumaco (Valencia y Villarroel, 2007) y Agua Clara (Nieves, en curso).

6.3. Antecedentes geoquímicos

Debido a que en la literatura no se hallaron investigaciones de índole geoquímico desarrollados en el delta del río Mitare, a continuación se presenta el resumen de una investigación geoquímica realizada en el sistema fluvial del Mitare (Andara, 1993), seguida por un grupo de trabajos realizados en otros sistemas deltaicos nacionales e internacionales.



Andara (1993), estableció la composición promedio anual para distintas especies químicas en los sólidos disueltos, sedimentos de fondo y suspendido para los ríos Mitare, Tocuyo, Yaracuy, Unare Neverí y Manzanares, permitiendo la determinación de la influencia litológica y humana sobre dicha composición. Los resultados obtenidos indican que los ríos ubicados al occidente del país (Mitare, Tocuyo y Yaracuy) presentan las mayores concentraciones de sales disueltas, siendo las especies químicas Ca^{+2} y SO_4^{-2} las predominantes, atribuido a la disolución de pirita y calcita, concluyendo que los ríos occidentales son más reactivos química y físicamente que los orientales. A su vez en el río Mitare predominan los minerales secundarios (caolinita y goethita), esto indica que el proceso que principalmente está actuando en esta cuenca es la meteorización química. Finalmente, los niveles de concentración de C, N y P encontrados en los sólidos disueltos del río Mitare permiten indicar que la composición química de este río no está siendo influenciada por las actividades humanas desarrolladas en las proximidades de la cuenca.

Yanes et al. (1999), realizan un estudio integrado geoambiental del delta del río Orinoco, en donde destacan los aspectos geoquímicos referentes a las aguas y sedimentos de área deltaica comprendida entre los caños Mánamo y Macareo del estado Monagas. Tal investigación se realizó con la finalidad de establecer valores de línea base de un conjunto de elementos químicos que pudiesen ser modificados a futuro por las actividades antrópicas. En total se tomaron 175 muestras de sedimentos activos en los caños más importantes, e inactivos en los diversos subambientes del delta. Las mismas fueron disgregadas, cuarteadas y separadas a través de tamizado en seco para su posterior análisis granulométrico, mineralógico y químico empleando para este último la técnica de EEA-ICP. Los autores concluyen que no hay diferencias significativas en cuanto a los valores de línea base obtenidos para sedimentos activos e inactivos en la fracción inferior a $63 \mu\text{m}$, que estos valores además, se encuentran por debajo de los promedios establecidos para otras cuencas del país contaminadas o no contaminadas, y de los valores recomendados por algunos organismos internacionales, excluyendo algunos valores anómalos de Pb determinados en muestras ubicadas próximas a ciertos centros poblados. Finalmente, la mayoría de los metales pesados estudiados se encuentran asociados con la fracción de arcillosa de los sedimentos finos, y muestran un enriquecimiento con oxi-hidróxidos de hierro, carbonato biogénico, minerales de arcilla y materia orgánica. En este último aspecto radica la importancia del análisis granulométrico en muestras de sedimentos con fines ambientales.



Pramod y Rajamani (2001), desarrollan un estudio de elementos de las tierras raras en la llanura de inundación del río Kaveri en su delta (sur de la India), en donde a través del análisis de ocho núcleos de sedimentos de 2 a 5 m de profundidad (con separaciones de 250 Km entre sí), evalúan la influencia de la meteorización y de los procesos sedimentarios en la geoquímica de tales elementos así como, la potencialidad de las llanuras de inundación en los estudios de proveniencia. Los autores obtuvieron que la gran mayoría de los elementos de las tierras raras se asocian a los sedimentos clásticos sorbidos en su superficie o formando parte de minerales de arcilla y minerales pesados. Así mismo, el patrón de distribución de las tierras raras en distintas fracciones granulométricas depende del grado de meteorización de la fuente, y de los procesos fluviales que controlan el escogimiento y la mineralogía de las mismas, en este caso rocas arcaicas de la serie charnoquita, fuente identificada a través de la evaluación de la relación Ce/Yb característica de esta litología en los sedimentos estudiados. Finalmente se establece que las llanuras de inundación son excelentes referencias para conocer la fuente de sedimentos de ambientes sedimentarios fluviales y deltaicos, siempre y cuando el grado de meteorización de la misma sea bajo y reúna a todas las fracciones granulométricas, siendo más representativas de las condiciones originales. La técnica de análisis empleada en esta investigación es la EEA-ICP, digestando las muestras con una mezcla de NaOH y Na₂O₂.

Shumilin *et al.* (2002), llevan a cabo una caracterización geoquímica de los sedimentos del sistema estuarino que se desarrolla en el delta del río Colorado y su región aledaña (zona superior del Golfo de California). Este se relaciona con el delta del río Mitare porque ambos son de clima árido (temperaturas altas y baja humedad). El objetivo del estudio era evaluar los factores que controlan la distribución espacial y temporal de un conjunto de 32 elementos (mayoritarios, minoritarios y traza), haciendo énfasis en las consecuencias geoquímicas de la disminución de las descargas del río Colorado como resultado de la construcción de distintas presas en su cauce a partir de la década de los 30'. Empleando 50 muestras de sedimentos superficiales y una muestra de núcleo, analizadas a través de la técnica instrumental de activación neutrónica, los autores antes mencionados concluyen que la fuente de sedimentos, los procesos de erosión asociados a la disminución de la energía fluvial, el grado de meteorización de la fuente y de los sedimentos de fondo y el aporte de fuentes hidrotermales en el ambiente de sedimentación, son factores que pueden ser evaluados tanto vertical como superficialmente, a través de



herramientas de la estadística univariada como las concentraciones promedio; estadística bivariada en la forma de relaciones elementales (Eu/Sm y factor de enriquecimiento-Sc), y el análisis multivariado para la diferenciación de conjuntos de muestras, elementos y datos en general que guardan comportamientos geoquímicos similares.

Tosiani et al. (2005), realizan un estudio mineralógico y textural de los sedimentos marinos recientes del frente Atlántico del delta del río Orinoco, con la finalidad de obtener una primera aproximación a la fuente de sedimentos en el continente, y a los regímenes de meteorización y transporte de los ríos Orinoco y Amazonas principalmente. Para ello se llevó a cabo la separación granulométrica por vía húmeda de las muestras tomadas en 6 transectas distribuidas en el área de interés, lo que permitió separar las fracciones arcilla, limo, arena y grava en alícuotas de 250 g en forma generalizada, se lograron agrupar 4 facies litológicas y bioquímicas: facies de fango de plataforma somera, facies de carbonatos, facies de arenas transgresivas basales y facies de carbonato profundas. La facies de plataforma somera es un área de dominio de limos y arcillas que reflejan muy bien las condiciones actuales de sedimentación en el área de estudio. Los patrones de distribución de los sedimentos en la plataforma continental y talud, están controlados por el aporte de sedimentos, la sedimentación carbonática autóctona, y el patrón de corrientes marinas de la región, especialmente las corrientes de Guayana y Ecuatorial.

Brown y Pasternack (2006), establecen la historia geoquímica de la zona superior de la llanura deltaica del delta Sacramento-San Joaquín (California, Estados Unidos), a través del estudio de tres núcleos de sedimentos de 12 a 14 m, en los cuales se analizaron 33 elementos químicos mediante la técnica EEA-ICP, y Hg, determinado por la técnica CVAAS. Los objetivos del mismo, eran evaluar la capacidad de removilización de aquellas especies químicas sensibles a cambios redox en el ambiente de depositación, identificar los procesos depositacionales (geoquímicos y geomorfológicos) que promueven la retención geoquímica, y determinar la extensión de la contaminación por Hg, As, Zn, Cd, Cu y Pb, en una zona afectada por el influjo de aguas de minas ricas en Hg desde el siglo XIX; todo esto con la finalidad de establecer los peligros geoquímicos asociados a la restauración de un tramo de la llanura deltaica denominado McCormacke Williamson Tract (MWT), influenciado por la actividad agrícola desde principios del siglo XX. Obteniéndose, que el grado de removilización de especies químicas en los



sedimentos de esta zona del delta ha sido bastante bajo en los últimos 4000 años; los núcleos estudiados muestran entre sí, gran variación espacial y heterogeneidad en cuanto a los procesos geoquímicos y geomorfológicos que han afectado a la zona a lo largo de los años, y se encontraron altas concentraciones de Hg, As y Pb, en la capa superior de las secuencias. Lo anterior implica, gran complejidad desde el punto de vista geoquímico, geomorfológico y biológico (biodisponibilidad del CH_3Hg^+ bajo condiciones reductoras), a la hora de aplicar criterios convencionales de restauración de un sistema natural.

Vittorio *et al.* (2006), estudiaron la evolución paleoambiental de los sedimentos continentales, deltaicos y marinos someros de la planicie costera del río Po (Norte de Italia), con la finalidad de evaluar las variaciones en la zona asociados a cambios en el nivel del mar y la subsecuente migración de la línea de costa, que derivan de los períodos glaciares e interglaciares del Cuaternario. La investigación se llevó a cabo, a través de un estudio sedimentológico, paleontológico y geoquímico integrado. Este último, se realizó por medio del análisis de 37 muestras de sedimentos de grano fino distribuidos a lo largo de un núcleo de 50 m. de profundidad, ubicado de manera estratégica en la zona terminal de la llanura costera de la cuenca del río Po, en orden de discriminar cambios en la fuentes de sedimentos (río Po, montes Apeninos y ríos Noradriáticos). Del estudio sedimentológico y paleontológico (basado principalmente en foraminíferos bentónicos) se obtuvieron 11 facies agrupadas en cinco asociaciones de facies y cuatro grupos paleontológicos. La composición química general de los sedimentos permitió alcanzar relaciones importantes con el tipo de paleoambiente y condujo a una mejor descripción de las facies establecidas. Mediante la interpretación de las misma se obtuvo que los sedimentos con altas concentraciones de Ni y Cr (elementos asociados a litologías máficas) derivan del río Po, los que presentaron gran contenido de CaCO_3 se asocian a los montes Apeninos al sur, y aquellos cuya relación Mg/Al fue mayor derivan de fuentes Noradriáticas (ricas en dolomita).

METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la introducción de este proyecto se desarrolló una metodología distribuida en las etapas que se presentan en la figura 15.

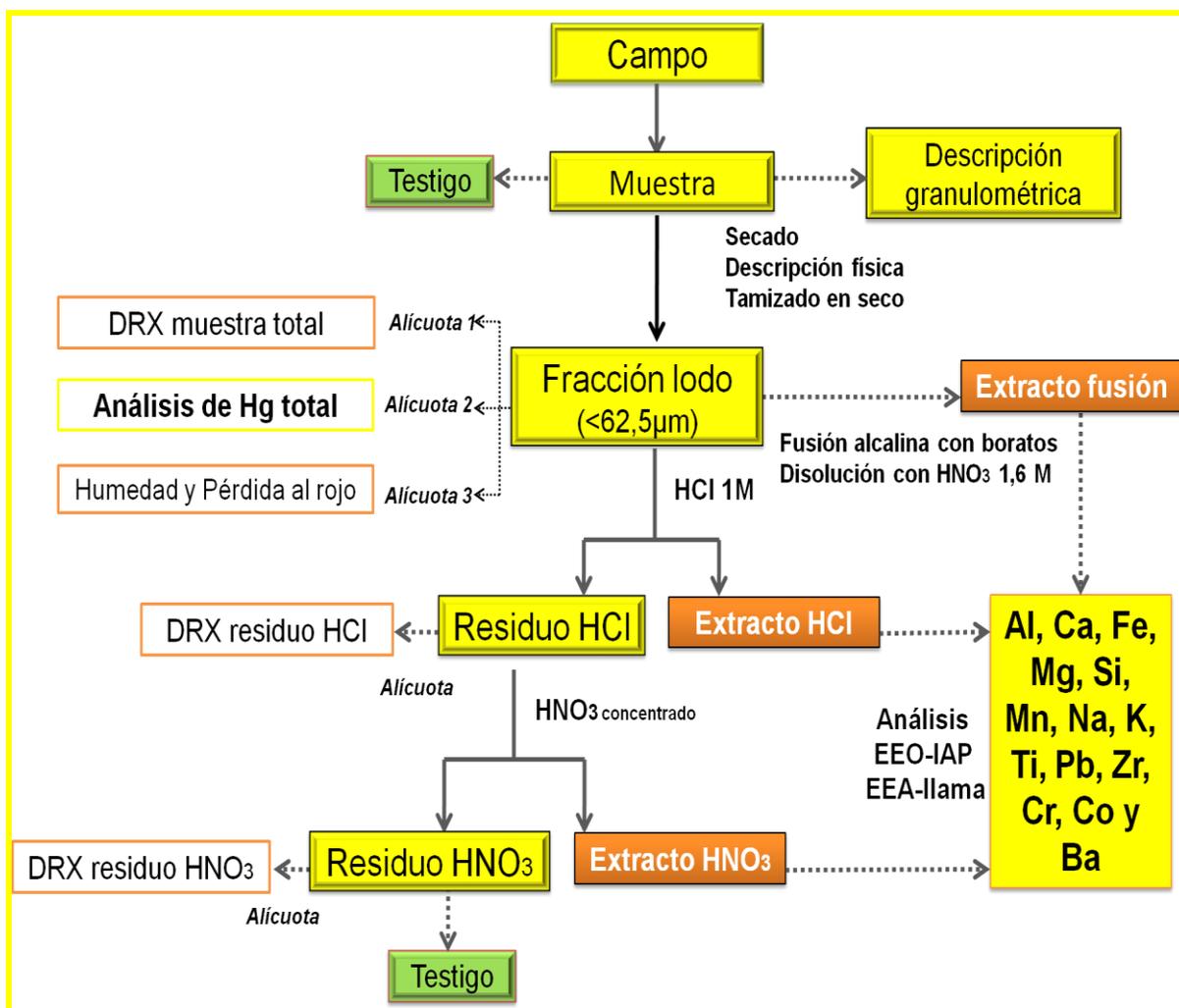


Figura 15. Esquema de la metodología desarrollada en este proyecto

1. Etapa de campo

La campaña de recolección de muestras se realizó la primera semana del mes de febrero de 2010, en un período de tres días. Para la toma de muestras se empleó un barreno (figura 16) con sección longitudinal y transversal de unos aproximados 15 y 6 cm respectivamente. En cada punto fueron tomadas tres muestras a profundidad (figura 17), salvo en la planicie costera en donde se recolectaron seis. Las mismas fueron almacenadas en campo y transportadas al laboratorio en bolsas plásticas individuales debidamente rotuladas.

La nomenclatura empleada para las muestras se fundamentó en el subambiente respectivo, su extensión en el mapa geológico (figura 14) propuesto por Rivas y Rojas (1997) y las características de estos subambientes observadas en campo.



Figura 16. Muestreo de sedimentos superficiales empleando barreno

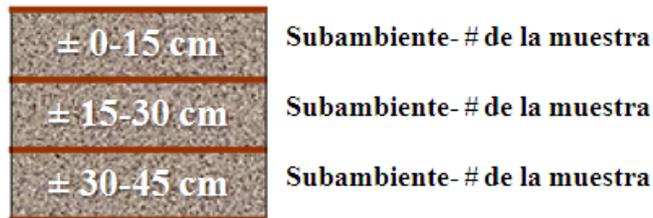


Figura 17. Esquema del núcleo de tres muestras tomado en cada punto y la nomenclatura empleada para las mismas

Primer día: durante el primer día se evaluaron las rutas de acceso a la planicie deltaica y se efectuó una observación panorámica y a nivel de afloramiento de algunas de las secuencias sedimentarias que constituyen a la Cuenca Central de Falcón (figura 18).



Figura 18. Fotografías de afloramiento de las secuencias sedimentarias de la Cuenca Central de Falcón

Segundo día: el segundo día se tomaron las muestras del punto denominado planicie costera. La misma se ubica en la región noroeste del área de influencia del delta y fue el único punto muestreado al cual se tuvo acceso a través de una carretera pavimentada, fácilmente distinguible en imágenes satelitales. En este punto se cubrió una profundidad total de 110 cm.

Tercer día: finalmente el tercer día se accesó a la zona de la planicie deltaica, partiendo de la población de Turamaco y siguiendo en vehículo hacia el norte, hasta el punto de partida del recorrido de 4 Km aproximadamente a pie (coordenadas 19.400.962 E 1.263.462 N), en donde se recorrieron los subambientes (canales activos, dunas, barras de meandro y planicie de inundación) que se presentan en la figura 19. En la tabla 3 se presentan las coordenadas de todos los puntos de muestreo considerados en este trabajo.

Igualmente este día se recolectó una muestra de sedimentos de fondo y dos de dique fluvial, en la zona de intercepción entre la carretera Falcón-Zulia y el río Mitare.

En total se obtuvieron 30 muestras de sedimentos superficiales: 6 muestras asociadas a la planicie costera, 21 muestras correspondientes a la zona deltaica y 3 en el río Mitare.

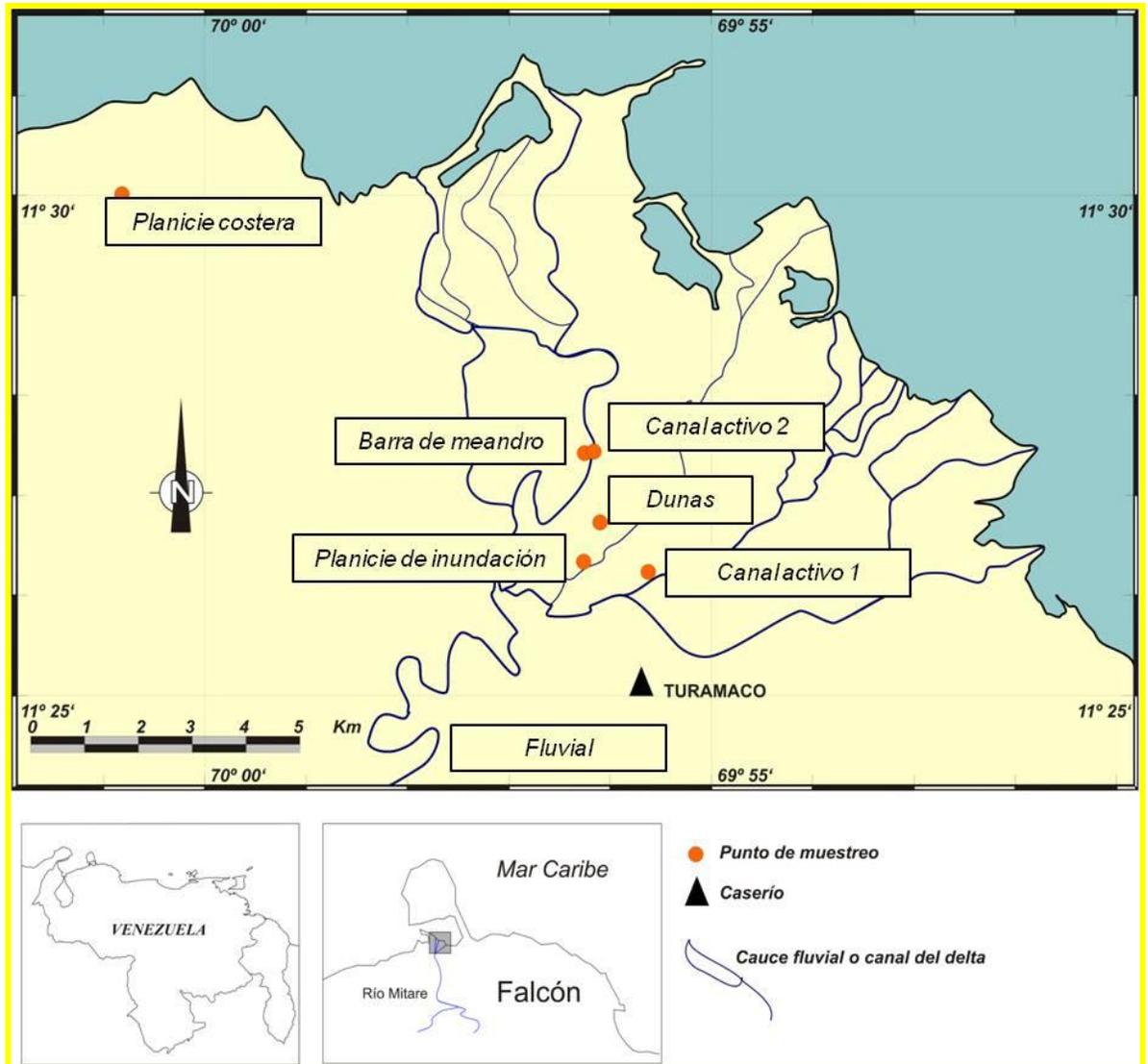


Figura 19. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo

Tabla 2. Coordenadas de los puntos de muestreo

Punto de muestreo	Latitud (m)	Longitud (m)
Planicie costera	1.270.912	19.388.938
Canal activo 1	1.264.606	19.398.785
Planicie de inundación	1.264.789	19.397.590
Duna	1.265.491	19.397.888
Canal activo 2	1.266.754	19.397.781
Barra de meandro	1.266.477	19.397.649
Fluvial	1.243.961	19.390.547



Una vez culminada la etapa de campo se procedió a realizar el tratamiento físico y químico en el laboratorio de las muestras de sedimentos recolectadas. Seguidamente se describen los procedimientos desarrollados en esta etapa.

2. Etapa de laboratorio

La actividad de laboratorio se inició con la descripción y tratamiento físico de las muestras, que incluye secado y tamizado en seco. Posteriormente se desarrolló la etapa química, constituida por la determinación de humedad y pérdida al rojo y los procesos de extracción secuencial y fusión alcalina con boratos; estos últimos con la finalidad de obtener en solución las especies químicas que componen a las muestras de estudio y facilitar su determinación a través de las técnicas analíticas EEO-IAP y EEA-llama. Igualmente se realizaron análisis de DRX y mercurio total. De manera detallada se explica a continuación la metodología experimental que se llevó a cabo en esta etapa.

2.1 Procedimientos físicos

2.1.1 Secado y descripción: El tratamiento físico se inició con la extracción de las muestras de las bolsas en las cuales fueron transportadas y almacenadas en campo, y su rotulación adecuada para el trabajo de laboratorio. Las mismas se colocaron en poncheras individuales y se dejaron secar a temperatura ambiente por períodos de 3 a 4 días (dependiendo de la humedad de las muestras), en campanas relativamente libres de humedad y partículas, luego fueron disgregadas manualmente y cuarteadas para preservar testigos de las mismas. Una vez secas, las muestras de sedimentos fueron descritas físicamente en función de su color, olor, textura y presencia de conchas. Los resultados de esta etapa se presentan en la Tabla 16 (apéndice 3).

2.2.2 Tamizado: Posteriormente, se procedió a realizar el tamizado en seco de las muestras, con la finalidad de determinar la distribución granulométrica en cada uno de los ambientes muestreados. Para ello se pesaron $200,00 \pm 0,01$ g de sedimentos y se hicieron pasar por una serie de tamices de acero inoxidable, con un tamaño de apertura de malla equivalente a 230, 120, 60, 35 y 18 μm , empleando una tamizadora automática (figura 20.a). Logrando diferenciar 6 clases granulométricas en la mayoría de los casos, que van desde lodo hasta arena muy gruesa.

Finalmente, estas fueron pesadas y analizadas estadísticamente en función de su distribución y madurez textural. Para ello se calcularon los parámetros: escogimiento (S_o), asimetría (SK_1) y agudeza o curtosis (K_G), a partir de las fórmulas del método analítico de momentos para la evaluación de madurez textural de los sedimentos (Allen, 2001). Las fórmulas empleadas en esta etapa se presentan en el apéndice III.



Figura 20. Fotografías de la metodología experimental. a) Tamizadora automática empleada en el proceso de tamizado en seco. b) Muestras de sedimentos luego de la determinación de pérdida al rojo

La fracción lodo obtenida en esta etapa, se dividió en varias porciones correspondientes a los subsiguientes procedimientos: determinación de humedad y pérdida al rojo, extracción secuencial, fusión alcalina, DRX y análisis de mercurio total.

2.2 Procedimientos químicos

2.2.1 Determinación de humedad y pérdida al rojo: con la finalidad de cuantificar la porción de muestra constituida por material volátil (H_2O , CO_2 y SO_2 , entre otros) se realizó el cálculo del parámetro pérdida al rojo. El cual consiste en someter al material a temperaturas iguales o superiores al punto de volatilización de algunos de sus constituyentes, y calcular conociendo las diferencias gravimétricas, la masa de muestra equivalente a las especies liberadas.

Para ello se tomó $1 \pm 0,0001$ g de cada muestra, se introdujeron en una mufla y se sometieron a una temperatura de $110^\circ C$ durante 4 horas (luego de haber calculado el tiempo requerido para lograr peso constante) y finalmente se midieron las masas de muestra residual. A través de este



procedimiento y con la aplicación de las fórmulas presentes en el apéndice 4, se calculó el porcentaje de humedad (agua de oclusión) de las muestras.

Una vez libres de humedad, las muestras fueron introducidas nuevamente a la mufla, y llevadas en este caso a una temperatura de 950 °C por un período de 1 hora, para de esta manera volatilizar agua de cristalización, sulfuros, carbonatos, materia orgánica y material grafitoso. Finalmente, el contenido total de volátiles en las muestras o pérdida al rojo (figura 20.b), fue calculado por medio de la suma del porcentaje de humedad y el porcentaje obtenido en la etapa anterior.

Dentro de esta metodología se consideraron dos procedimientos de ataque químico de las muestras, con la finalidad de obtener las especies de interés en solución, y además evaluar su fraccionamiento en extractos ácidos de distinta naturaleza química que implique su asociación con procesos geoquímicos particulares. De esta manera, se inicia la descripción de tales procedimientos.

2.2.2 Extracción secuencial: En este trabajo se llevó a cabo una extracción secuencial en medio ácido de dos pasos, empleando una modificación de la marcha analítica desarrollada por De Freitas (2008) y Moreno (2009); las cuales derivan del método para digestiones ácidas de sedimentos, lodos y suelos diseñado por Tessier *et al.*, 1979 y validado por la BCR (*Community Bureau of reference*) (M. Pueyo *et al.*, 2008). La misma se describe a continuación.

Para cada muestra se pesó $1 \pm 0,0001$ g de sedimento que luego fue colocado en tubos de ensayo con tapa de rosca que se utilizaron durante todo el proceso. La muestra se hizo reaccionar con 20 mL de ácido clorhídrico (HCl) 1M, previamente preparado, agitando constantemente cada 4 horas por un tiempo aproximado de 24 horas en frío. El objetivo de esta etapa consistía en obtener en solución aquellas especies sorbidas, asociadas a oxi-hidróxidos amorfos y/o carbonatos (Moreno, 2009).

Posteriormente, con la finalidad de separar el **extracto HCl** del residuo insoluble de esta fase, las muestras fueron centrifugadas empleando una centrifuga modelo IEC HN SII, marca *Thermo Electron Corporation* (figura 21.a), por un período de 30 min a una velocidad de $\frac{3}{4}$ RPM. A

partir de esto el sobrenadante fue trasferido cuantitativamente a balones aforados de 50 mL, y una vez enrasado con agua destilada se trasvasó a envases de plástico de 125 mL para su análisis.

Luego el residuo sólido de cada muestra, se lavó con agua destilada para eliminar excedentes asociados al extracto HCl. Los mismos se hizo reaccionar con 10 mL de ácido nítrico (HNO_3) concentrado 65% v/v, a una temperatura de 95 °C durante 2 horas (figura 21.b). Posteriormente, se dejaron enfriar por un período de 24 horas con agitaciones periódicas, se centrifugaron y prepararon las soluciones de 50 mL para su almacenaje en envases para análisis de 125 mL. De esta manera se obtienen los **extractos HNO_3** , que presenta suele presentar en solución a aquellas especies asociados a fases de oxi-hidróxidos cristalinos, sulfuros, materia orgánica y arcillas parcialmente disueltas (Moreno, 2009).

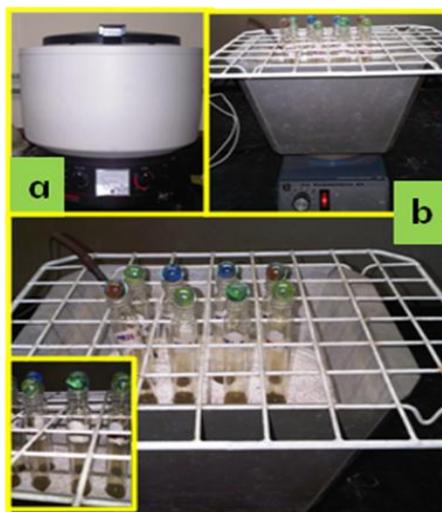


Figura 21. Fotografías de la metodología experimental. a) Centrifuga empleada para separar los extractos HCl y HNO_3 de sus respectivos residuos. b) Baños de arena y montaje empleado para llevar las muestras a 95°C durante la extracción con HNO_3 .

Finalmente el residuo sólido de la extracción secuencial fue colocado en beakers y secado en la estufa a temperaturas de 100 °C aproximadamente, para luego ser almacenado en bolsas de plástico como testigos del proceso.

2.2.3 Fusión alcalina: Por otro lado, las muestras fueron tratadas por el método de fusión alcalina modificado de Liberatore (1993 y 1994), para la puesta en solución del conjunto total de especies químicas y minerales presentes en las muestras.

El método de fusión alcalina tiene su principio básico en la transformación de sólidos cristalinos (en este caso minerales) a altas temperaturas y con la ayuda de un fundente o sales de metales alcalinos, en estructuras menos ordenadas que sean fácilmente solubilizadas en medios ácidos de baja concentración (perlas).



Figura 22. Fotografías de la metodología experimental a) Perla preparada para una de las muestras en un crisol de grafito. b) Disolución de perlas en planchas de calentamiento

Se emplearon para esta etapa crisoles de grafito (figura 22.a), debidamente pulidos, resistentes a altas temperaturas y baja reactividad bajo las condiciones de experimentación con los constituyentes inorgánicos presentes en las muestras.

Por otro lado, se preparó una mezcla de metaborato de litio (LiBO_2) y tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) en una relación 1:1, el cual constituye un fundente bastante efectivo en el tratamiento de muestras geológicas (Ej. Valencia, 2007).

En un crisol de grafito se introdujeron en este orden los siguientes materiales: 625 mg de fundente y 125 mg de muestra. Esta mezcla se homogeneizó con la ayuda de una espátula de vidrio de 3 mm de diámetro aproximadamente, y luego se colocó en una mufla a 1000 °C por 45 min. Una vez enfriado el crisol posterior a su retiro de la mufla, se extrajo la perla de manera cuidadosa y fue colocó en un beacker de 250 mL.

La disolución de las perlas u obtención del **extracto fusión** (figura 22.b), se realizó adicionando 60 mL de ácido nítrico (HNO_3) 1,6 M al beaker que contiene la perla. El mismo se coloca en una plancha con agitación constante y calentando a una temperatura comprendida entre



40 y 60 °C, se logra la disolución completa de las perlas. Luego de la disolución de las perlas las muestras fueron filtradas y el líquido transferido de manera cuantitativa, a balones aforados de 100 mL. Posteriormente fueron trasvasadas a botellas de plástico con tapas de rosca de 125 mL quedando listas para el análisis.

A través de estos procedimientos se obtuvieron tres extractos ácidos (HCl, HNO₃ y fusión) que fueron examinados empleando las técnicas analíticas y las condiciones de experimentación que se especifican en el siguiente apartado.

2.3 Determinaciones químicas y mineralógicas

2.3.1 Espectroscopía de emisión óptica inductivamente acoplada con fuente de plasma (EEO-IAP): Las concentraciones de los elementos mayoritarios (Al, Ca, Fe y Mg), minoritarios (Ti) y traza (Mn, Ba, Pb, Sn, Zr, Co y Cr), fueron determinadas a través la técnica EEO-IAP. Para ello, se empleó el equipo modelo *Ultima 2*, marca *HORIBA Jobin Yvon*. Las condiciones de trabajo y el rango espectral abarcado, se presentan en el apéndice 1.

2.3.2 Espectroscopía de emisión atómica con llama, EEA-llama: A través de EEA-llama se determinaron las concentraciones de los elementos Na y K. Se empleó el instrumento modelo 200, marca *Perkin Elmer*. De igual manera que para el instrumental anterior, las condiciones de trabajo y el rango espectral abarcado, se presentan en el apéndice 1.

2.3.3 Análisis de mercurio total: La determinación de Hg se llevó a cabo empleando el equipo analizador de mercurio total TMA~80. Para ello se pesaron $0,2000 \pm 0,0001$ g de la fracción lodo, de la mayoría de las muestras, salvo la muestra 6 debido a que, para el momento que se realizaron estos análisis la fracción lodo de esta muestra se había agotado en análisis precedentes. La masa de sedimentos se colocó en capsulas de níquel previamente lavadas y libres de residuos y luego fueron introducidas en el equipo TMA~80 para la determinación de Hg.

2.3.4 Análisis mineralógico secuencial: Mediante la técnica de Difracción de Rayos X, se determinaron las fases minerales para un conjunto de muestras seleccionadas al azar según su ambiente de origen. Este procedimiento se realizó de manera secuencial, es decir, para una misma



muestra se analizó: muestra total, residuo insoluble en HCl 1 M y residuo de las dos etapas de extracción secuencial.

Esto permitió hacer una caracterización más amplia de los sedimentos en estudio, y evaluar las correspondencias existentes entre los elementos químicos presentes o asociados a cada uno de los extractos ácidos, y las fases minerales de cada ambiente, bien sea sorbidos o formando parte de sus estructuras. Para ello se empleó un difractor marca *Bruker*, modelo *D8 Advance*, equipado con un generador de Rayos X de tubo con ánodo de cobre, y monocromador secundario de grafito.

3. Tratamiento de datos

De los procedimientos anteriores se obtuvieron varias matrices de datos que fueron tratadas estadísticamente con la finalidad de mejorar su visualización, manejo e interpretación.

Para el manejo de las matrices de datos obtenidas, se emplearon herramientas de la estadística básica paramétrica para evaluar y visualizar el comportamiento de las distintas variables en términos de forma y tendencia de la distribución. En función de esto, se realizaron los cálculos de estadísticos de tendencia central (media y mediana), dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación) y medidas de posición no central (máximos y mínimos, anómalos y extremos). Con ello se definieron los gráficos de cajas y bigotes e histogramas.

Por otro lado, se realizaron pruebas de hipótesis de dos colas o tipo I, con la finalidad de evaluar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre la distribución del conjunto de atributos químicos en distintos compartimientos o ambientes. Igualmente las fórmulas y los postulados tomados en cuenta para este cálculo se presentan en el apéndice .

Posteriormente, se hicieron gráficos de dispersión entre relaciones elementales, entre relaciones con materiales de referencia y gráficos comparativos entre la distribución en porcentajes de un elemento en distintas facies.

En conjunto, el tratamiento de los datos se llevó a cabo empleando los programas STATISTICA.8 y MICROSOFT OFFICE EXCEL 2007.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se exponen, describen e interpretan los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la metodología experimental que se llevó a cabo. Para una mejor comprensión de la información, los mismos fueron organizados en descripciones de campo, determinaciones físicas, químicas y comportamiento geoquímico. Finalmente, se hace una breve integración de los resultados, con el objetivo de obtener una idea global de las interpretaciones que resultan de este trabajo.

1. Descripciones de campo

Planicie costera: la planicie costera es un ambiente extenso, de topografía predominantemente plana, con escasa vegetación y amplios campos de dunas en su sección próxima al delta (figura 23). Superficialmente, presenta grietas de desecación y costras salinas duras con burbujas de aire dispersas en la misma.



Figura 23. Planicie costera y cristales de sal presentes en las costras salinas

Planicie de inundación y dunas: la planicie de inundación muestreada, desde el punto de vista topográfico, muestra similitud con la planicie costera. Sin embargo, se distingue de esta última por estar constituida por sedimentos más compactos, de coloración más clara, con ausencia de conchas marinas y menor humedad en campo. Presenta amplios campos de dunas, de alturas que van desde centímetros hasta metros, cuya morfología varía entre montículos piramidales y dunas pequeñas, longitudinalmente alargadas y dispuestas en dirección NE;

características que coinciden con las planteadas por Suárez (1999) para las dunas tipo *nebkhas* descritas en esta área (figura 24).



Figura 24. Planicie de inundación y dunas tipo *nebkhas*

Canal activo y barra de meandro: se lograron muestrear dos canales activos en la zona deltaica y uno correspondiente a la zona de intercepción entre la carretera Falcón-Zulia y el río Mitare. Los dos primeros se distinguen por su numeración (1 y 2), asociada a la cronología de la toma de sus muestras y el último se diferencia por la presencia de agua en su cauce; éste para fines prácticos se denota con el nombre de ambiente fluvial.

Los canales activos 1 y 2 se caracterizan por una sección transversal de aproximadamente 100 m, con presencia de sistemas de terrazas agradacionales no apareadas o asimétricas próximas a los 2 metros de alto. A nivel superficial presentan grietas de desecación gruesas y duras, y sistemas micro-deltaicos (figura 25) asociados a la desembocadura de pequeños drenajes que se relacionan con períodos de ligeras lluvias.

En el canal activo 1 se tomaron nueve muestras (figura 26), en secciones de tres unidades por punto (punto A, B y C). En el canal activo 2 se tomaron tres muestras al igual que en el resto de los ambientes. Por otra parte, a 200 m del punto de muestreo del canal activo 2 fueron recolectadas tres muestras correspondientes al ambiente de barra de meandro, el cual a nivel de campo guarda las mismas características que los canales activos.

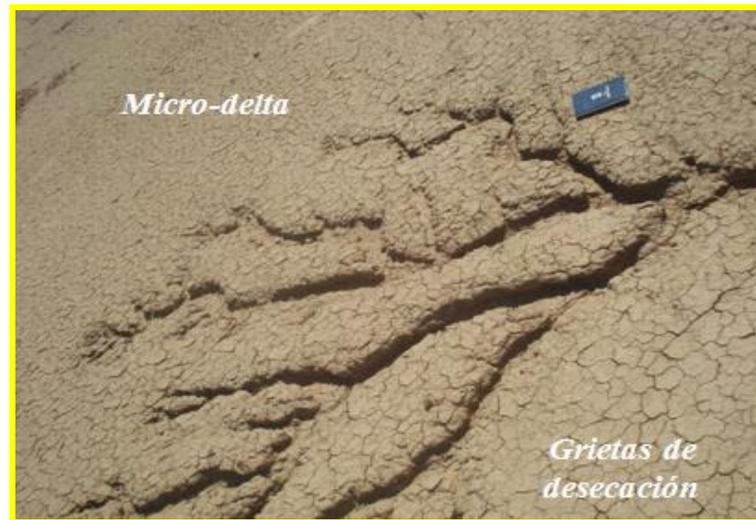


Figura 25. Micro-delta presente en el canal activo 2 y las grietas de desecación típicas de este ambiente



Figura 26. Imagen del canal activo 1, en donde se muestran los sistemas de terrazas no apareadas a ambos lados del canal y la ubicación de los puntos de muestreo A, B y C (en orden cronológico).



2. Determinaciones físicas

2.1. Descripción física de las muestras

En la tabla 3, se presentan las características físicas de las muestras determinadas en el laboratorio una vez culminado el secado de las mismas. Esta descripción sirve de complemento para el análisis granulométrico realizado que se presenta a continuación.

Tabla 3. Descripción física de las muestras

Muestras	Características generales
1, 2 y 3 Planicie costera	Granulometría de arenas gruesas a medias, de color marrón claro a beige, presencia de conchas pequeñas (mm), cristales de yeso y aglomerados no abundantes. Algunas con mal olor asociado a eses de chivo.
4, 5 y 6 Planicie costera	Granulometría de arenas medias a arenas muy gruesas, color marrón medio, presencia de abundantes conchas grandes (cm). Inodoras.
7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,15, 28, 29 y 30 Canal activo 1 y fluvial	Granulometría de arenas muy finas, finas a medias. Color marrón, más oscuras que las muestras de la planicie costera. Presencia de aglomerados duros y planares, y de conchas pequeñas (mm). Mal olor asociado a eses de chivo (algunas del canal activo).
16, 17 y 18 Planicie de inundación	Granulometría de lodo a arenas muy finas. Presencia de raicillas, color beige o marrón claro y abundante aglomerados duros. Inodoras.
19, 20 y 21 Dunas	Color y granulometría homogéneos, marrón rojizo y tendencia a las arenas finas respectivamente. Presencia de aglomerados fácilmente disgregables y cristales de CaCO ₃ , inferido por su reacción con HCl 10% v/v en campo. Inodoras.
22, 23, 24, 25, 26 y 27 Canal activo 2 y barra de meandro	Canal activo presenta granulometría de arenas gruesas a muy gruesas y las barras de meandro son lodosas. Coloración clara, marrón claro o beige. Presencia de raicillas y abundancia de aglomerados duros. Inodoras.

2.2 Análisis granulométrico

Como se indicó en la metodología, posterior al tamizado y obtención de las fracciones granulométricas presentes en los sedimentos de estudio, se realizó el cálculo de los parámetros



texturales: escogimiento (S_o), asimetría (SK_1) y curtosis (K_G), los resultados del mismo se muestran en la tabla 4. A continuación se explica la distribución de las fracciones granulométricas obtenidas en cada punto de muestreo.

Tabla 4. Resultados del cálculo de los parámetro de madurez textural

Muestra	X	S_o	SK_1	K_G	S_o	SK_1	K_G
PC-1	1,7	1,8	2,4	10,5	P	FF	EL
PC-2	1,5	1,9	2,2	9,3	P	FF	EL
PC-3	1,6	1,7	2,1	10,5	P	FF	EL
PC-4	1,9	1,8	2,3	10,3	P	FF	EL
PC-5	1,7	1,8	2,3	10,3	P	FF	EL
PC-6	1,2	1,5	2,3	12,5	P	FF	EL
CA1-7	3,1	1,9	2,1	7,8	P	FF	EL
CA1-8	2,4	2,4	2,2	6,7	MP	FF	EL
CA1-9	2,6	1,8	2,2	9,0	P	FF	EL
CA1-10	2,8	2,5	1,2	4,4	MP	FF	EL
CA1-11	3,2	2,5	1,3	4,4	MP	FF	EL
CA1-12	3,3	2,3	1,4	4,7	MP	FF	EL
CA1-13	3,7	2,4	1,4	3,9	MP	FF	EL
CA1-14	3,1	2,3	1,9	5,6	MP	FF	EL
CA1-15	2,5	2,2	2,2	7,3	MP	FF	EL
PI-16	6,4	3,4	-0,6	1,7	MP	FF	ML
PI-17	6,3	3,2	-0,4	1,3	MP	FF	L
PI-18	4,7	2,5	1,0	2,4	MP	FF	ML
D-19	3,6	2,0	2,1	6,1	MP	FF	EL
D-20	3,5	1,9	2,3	7,4	P	FF	EL
D-21	3,3	1,7	2,7	9,8	P	FF	ML
CA2-22	3,3	3,3	1,0	2,4	MP	FF	ML
CA2-23	2,0	3,2	1,5	3,8	MP	FF	EL
CA2-24	1,7	3,0	1,7	4,6	MP	FF	EL
BM-25	4,6	3,7	0,2	1,4	MP	F	L
BM-26	5,1	3,6	0,1	1,2	MP	F	L
BM-27	4,7	3,7	0,2	1,3	MP	F	L
F-28	3,2	2,9	1,1	3,1	MP	FF	EL
F-29	2,7	2,6	1,4	4,5	MP	FF	EL
F-30	2,0	2,0	2,2	8,5	MP	FF	EL

P: Escogimiento pobre; MP: Escogimiento muy pobre; FF: Fuerte asimetría hacia los finos; F: Asimétrica hacia los finos; EL: Extremadamente leptocúrtica; ML: Muy leptocúrtica; L: Leptocúrtica.

Planicie costera: Las seis muestras tomadas en la planicie costera manifiestan una distribución extremadamente leptocúrtica y fuerte asimetría hacia las fracciones finas. Adicionalmente cuentan con un escogimiento pobre.

En la figura 27.a se observa que el 50% de la frecuencia acumulada de cada distribución o la mitad de la masa considerada para cada muestra, se asocia a tamaños menores a 500 μm . Esto corresponde al intervalo de arenas medias a lodo.

Se distinguen los comportamientos particulares de las muestras PC-1 y la muestra PC-6. La muestra superficial PC-1 presenta una inflexión en el punto correspondiente a 1000 μm y 90% de frecuencia acumulada, esto indica que a nivel superficial hay un incremento constante del tamaño de grano desde lodos hasta arenas gruesas y esta secuencia granulométrica es dominante sobre las arenas muy gruesas (figura 27.b). El resto de las muestras presentan una inflexión más baja, ubicada en la sección 500-1000 μm y 60-90% de frecuencia acumulada.

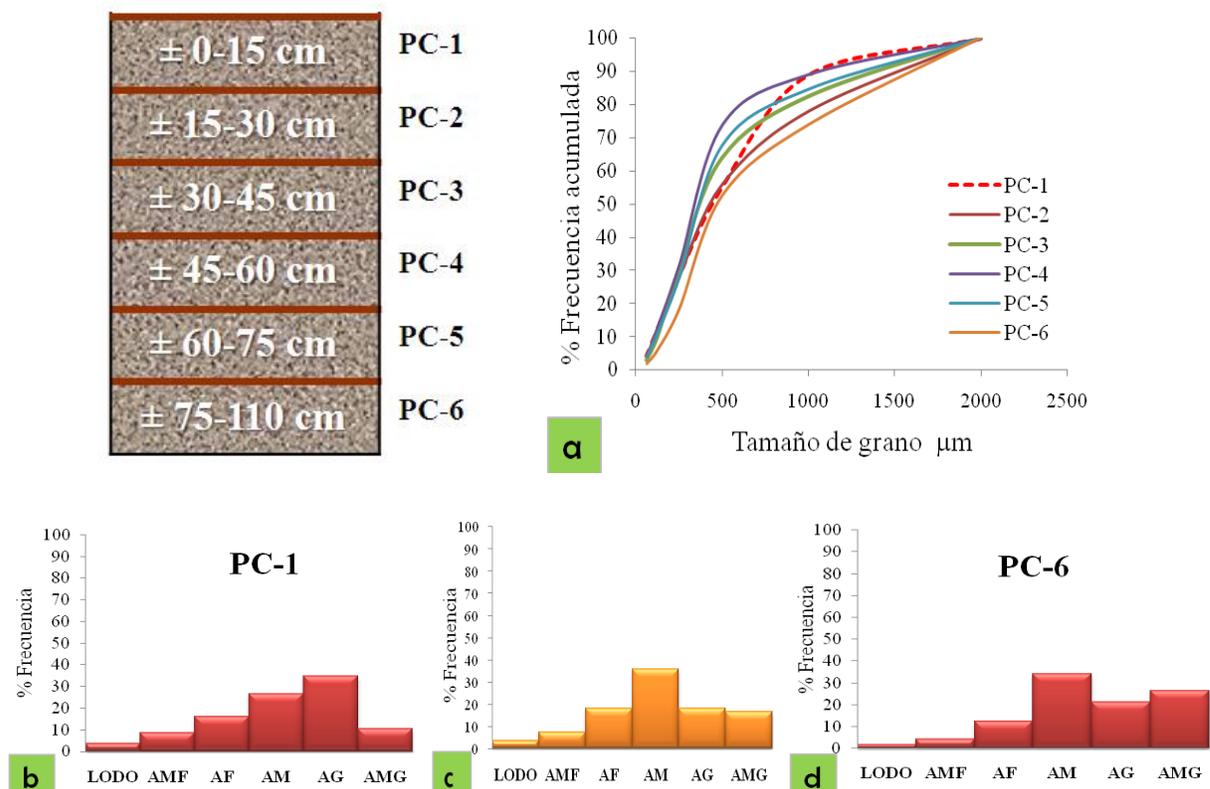


Figura 27. Análisis granulométrico de la planicie costera: (a) curva de frecuencia acumulada; (b) histograma de frecuencia para la muestra PC-1; (c) histograma de frecuencia para el promedio de las muestras centrales (PC-2,3,4,5); (d) histograma de frecuencia para la muestra PC-6

La curva de la muestra PC-6 ubicada entre 75 y 110 cm de profundidad, se presenta por debajo de las demás curvas, lo cual representa que la tendencia de esta muestra hacia las fracciones finas es menor al resto de las muestras (figura 27.d).

Canal activo 1: Los sedimentos de los tres puntos de muestreo tomados en el canal activo 1 describen una distribución fuertemente asimétrica hacia las fracciones finas, con forma extremadamente leptocúrtica y escogimiento pobre (salvo las muestras CA1-7 y CA1-9 del punto A que manifiestan escogimiento muy pobre).

En el punto A (figura 28.A), entre el 85 y 95% de la masa total de las muestras se asocia con las fracciones granulométricas menores a 500 μm (arenas medias a lodo). Los primeros 15 cm de profundidad (muestra CA1-7) presentan una tendencia mayor hacia las facies finas, le sigue la base de la secuencia (30-45 cm) y posteriormente la zona central, lo cual es indicativo de fluctuaciones en cuanto a la distribución de finos de base a tope en el espesor de sedimentos muestreado.

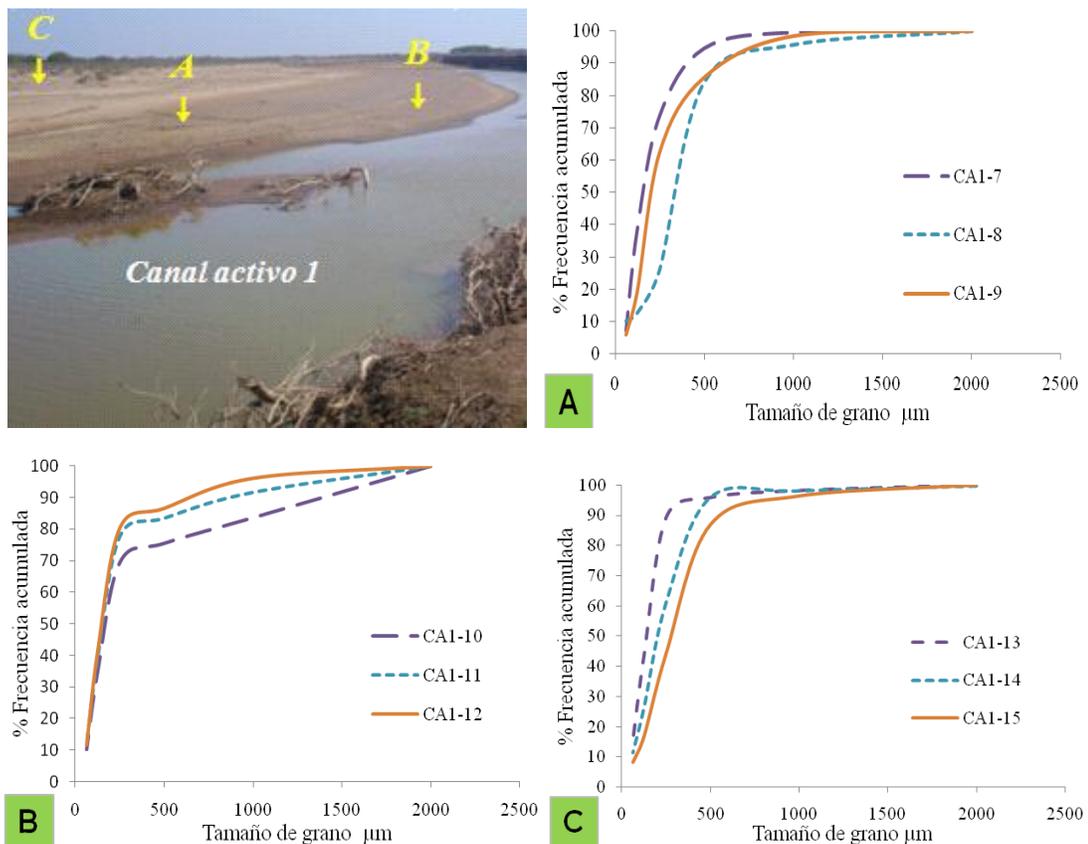


Figura 28. Análisis granulométrico de los tres puntos muestreados en el canal activo 1 y esquema de la ubicación de los mismos

Las muestras tomadas en el punto B (figura 28.B), tienen una distribución homogénea de las fracciones menores a 250 μm (arenas finas a lodo). A este conjunto de clases granulométricas se asocia el 70% de la frecuencia acumulada. Las facies granulométricas mayores a 500 μm , se encuentran en mayor proporción en la muestra superficial, como indicativo de una secuencia creciente de base a tope en el intervalo correspondiente a arenas medias a muy gruesas.

El cuanto al punto C (figura 28.C), se obtuvo que el 90% de la distribución de estas muestras se asocia con las fracciones menores a 500 μm y además se observa un aumento del dominio de las facies finas de base a tope.

Al comparar el conjunto de curvas correspondientes a los tres puntos de muestreo, se obtiene que la marcada asimetría hacia los finos, es mayor en los puntos A y C respecto a B. Esto puede relacionarse con cambios de facies distintivos entre las secuencias de canal activo y sistemas de terrazas, adicionalmente como lo indican Rivas y Rojas (1997), es probable que las facies finas que caracterizan al tope de los puntos A y C sean de origen eólico o de llanura de inundación, depositadas de manera abrupta y transicional respectivamente.

Planicie de inundación: la distribución granulométrica de las muestras del punto denotado como planicie de inundación responde a una fuerte asimetría hacia las fracciones finas, muy leptocúrtica (salvo la muestra central PI-17 que es leptocúrtica) y un escogimiento muy pobre.

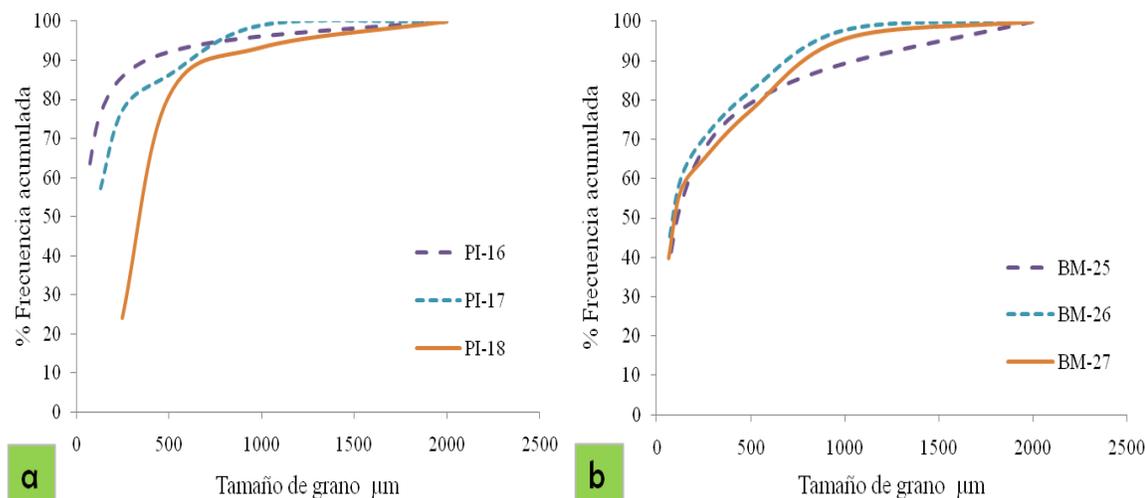


Figura 29. Curvas de frecuencia acumulada para (a) planicie de inundación y (b) barra de meandro

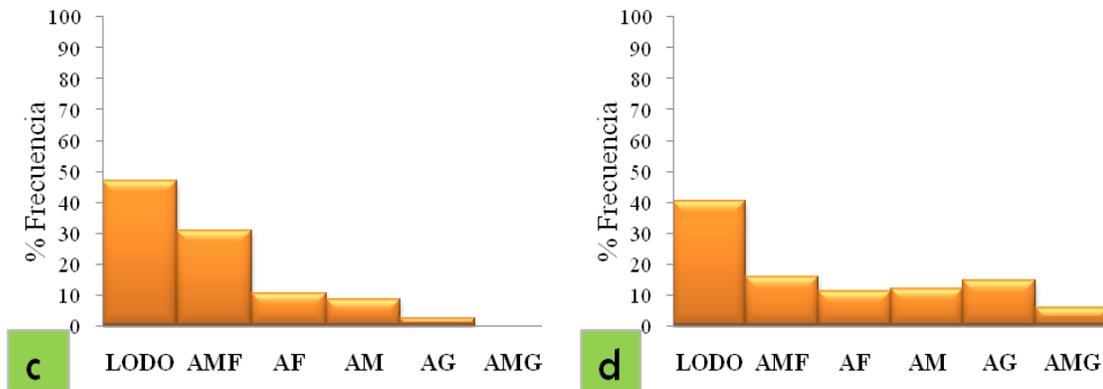


Figura 30. Histogramas de frecuencia promedio para (a) planicie de inundación y (b) barra de meandro

Los primeros 30 cm de profundidad de este punto, se encuentran dominados por la fracción lodo, con un 60% de frecuencia acumulada (figura 29.a), los siguientes 15 cm se encuentran en el dominio de la facies de arenas muy finas. En consecuencia, en las curvas de acumulación porcentual se observa que se logran porcentajes elevados a tamaños de granos menores a los 500 μm , particularmente la fracción lodo como se presenta en la figura 30.a.

Barra de meandro: este punto se caracteriza por distribuciones granulométricas asimétricas hacia los finos, leptocúrticas y escogimiento muy pobre. El mismo guarda similitud con la planicie de inundación por la dominancia de la fracción lodo sobre el resto, en este caso con un 40% de frecuencia acumulada.

En las curvas de acumulación porcentual (figura 29.b), se presentan dos inflexiones correspondientes a los primeros 30 cm de la secuencia. La primera separa a la fracción lodo dominante del resto y la segunda ubicada en 1000 μm indica el carácter bimodal de las distribuciones de estas muestras por la presencia de un aumento en la porción de arenas gruesas en esta sección del núcleo (figura 30.b), que representa entre 10 y 20% de la masa de muestra.

Al hacer una comparación de la distribución granulométrica de los puntos planicie de inundación y barra de meandro, se obtiene que el nivel de agudeza o curtosis en ambos puntos aumenta respecto a la planicie costera y el canal activo 1 antes descritos. Esto implica una distinción mayor entre las facies finas (lodo y arenas muy finas) y las gruesas que caracterizan a ambos puntos. Igualmente hay una tendencia general a la disminución del tamaño de grano de base a tope en ambos sistemas.

Duna: las muestras tomadas en la duna tipo *nebkha* que se muestra en la figura 31, se caracterizan por una distribución granulométrica bastante homogénea (figura 31.a), con asimetrías fuertes hacia las fracciones finas, particularmente las arenas finas (figura 31.b), un escogimiento de muy pobre a pobre y forma de extremadamente leptocúrtica a muy leptocúrtica. Estos resultados son indicios del carácter selectivo de tamaños de grano que tiene el viento como agente de erosión y transporte, que en este caso permite la acumulación gradual de sedimentos tamaño arena fina en estos pequeños montículos.

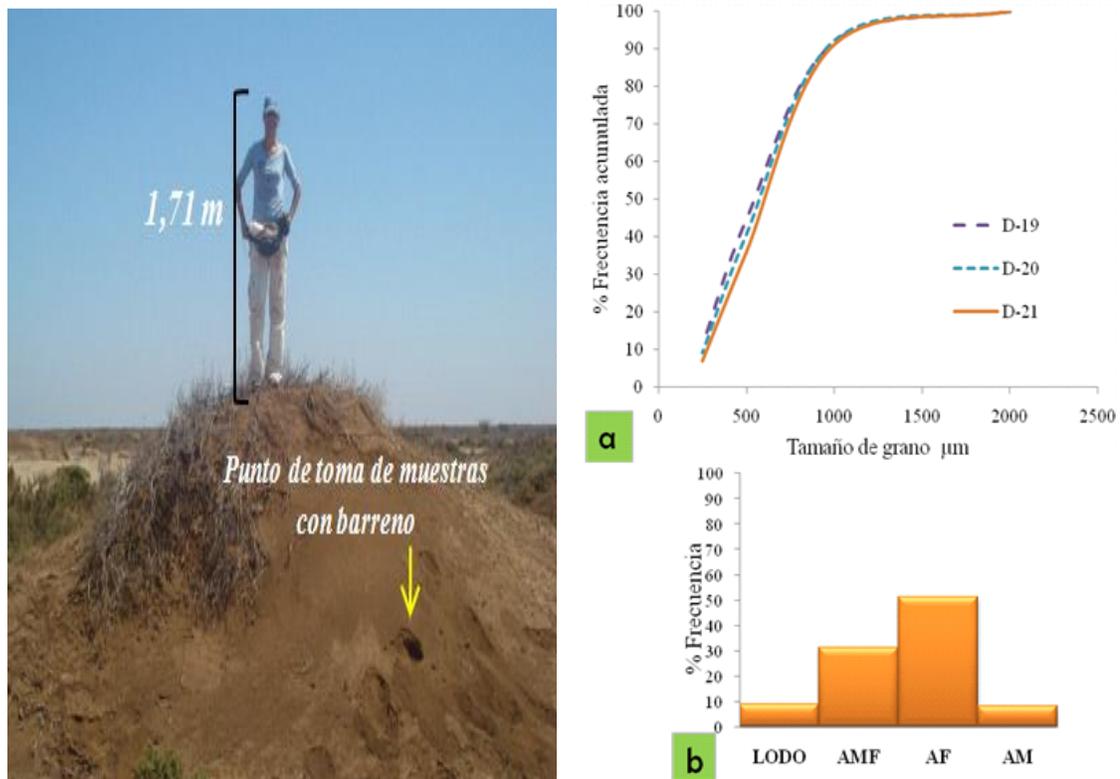


Figura 31. Duna tipo *nebkha* muestreada, (a) curva de frecuencia acumulada y (b) histograma de frecuencia para el promedio de las muestras de este ambiente

Canal activo 2: el canal activo 2 presenta distribuciones granulométricas fuertemente asimétricas hacia los finos, cuyas agudezas van desde muy leptocúrticas (CA2-22) hasta extremadamente leptocúrticas (CA2-23 y 24) y escogimientos muy pobres.

En la figura 32.a, se muestra la distinción existente entre la curva de CA2-22 relativa a los primeros 15 cm de profundidad y CA2-23 y CA2-24 que corresponden a los últimos 30 cm del núcleo tomado en este punto. La curva de CA2-22 se ubica muy por encima de las

correspondientes a CA2-23 y CA2-24. Adicionalmente, al comparar el histograma de frecuencia de CA2-22 (figura 32.b) y el promedio entre CA2-23 y CA2-24 (figura 32.c) se obtiene que la diferencia entre estas distribuciones se debe a la casi ausencia de la fracción de arenas muy gruesas en los primeros 15 cm de la secuencia, la cual es dominante en la base del núcleo.

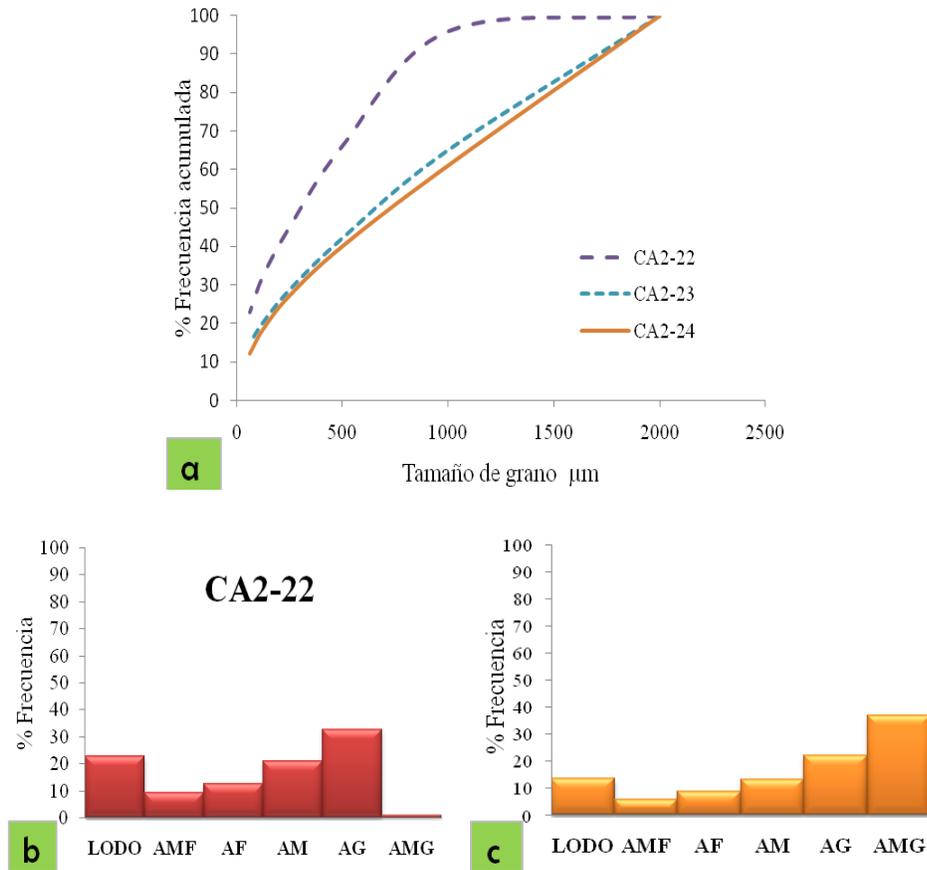


Figura 32. Análisis granulométrico del canal activo 2 (a) curva de frecuencia acumulada; (b) histograma de frecuencia de la muestra CA2-22 y (c) histograma de frecuencia para el promedio de las muestras CA2-23 y 24

Fluvial: El punto de muestreo denominado fluvial engloba tres muestras, dos correspondientes a la zona de dique fluvial (F-28 y F-29) y una de sedimentos de fondo (F-30). Este conjunto de muestras presentan distribuciones granulométricas fuertemente asimétricas hacia los finos, extremadamente leptocúrticas y escogimiento muy pobre.

En la zona de dique fluvial entre el 70 y 80% de la frecuencia acumulada se asocia a fracciones menores a 250 μm (arenas finas, arenas muy finas y lodo), con dominio de arenas

finas (figura 33.b). En la figura 33.a se muestra que hay una distinción entre la granulometría de los sedimentos de fondo y los de dique fluvial. Esto se relaciona con la presencia de mayor masa de muestra asociada con las fracciones mayores a 500 μm en los sedimentos de fondo (figura 33.c), particularmente arenas medias y gruesas, que marca posibles cambios de facies laterales en este cauce.

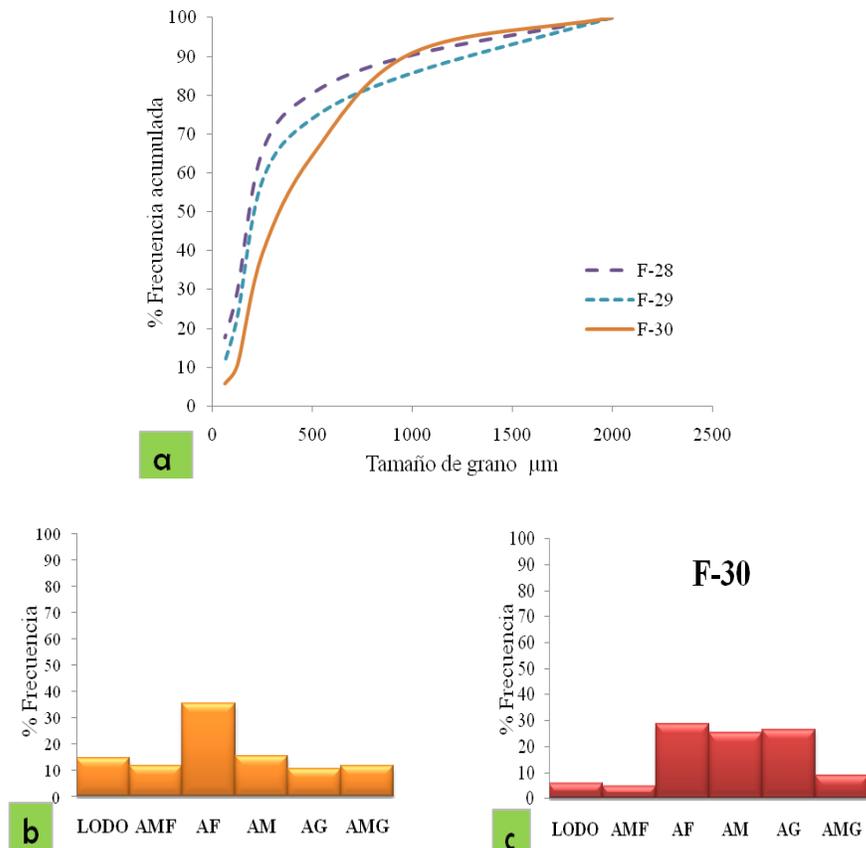


Figura 33. Análisis granulométrico del ambiente fluvial (a) curva de frecuencia acumulada; (b) histograma de frecuencia para el promedio de las muestras F-28 y 29 y (c) histograma de frecuencia para la muestra F-30

2.3 Análisis mineralógico

Fue seleccionado un conjunto de seis muestras para el análisis mineralógico secuencial, dos de la planicie costera, dos de los canales activos, una de duna, una de barra de meandro y la última de la planicie de inundación.



En la tabla 5 se resumen las fases mineralógicas asociadas al la determinación por DRX para: muestra total, residuo de la extracción con HCl y residuo de la extracción con HNO₃. De igual manera, en los apéndices se muestran los difractogramas correspondiente a los mismos.

En su dominio, las muestras de sedimentos del delta del río Mitare y su área de influencia presentan una constitución mineralógica homogénea fundamental, constituida por cuarzo, caolinita e illita. La estructura tectosilicatada del cuarzo, formado por fuertes enlaces covalentes Si-O, le dificulta su reacción en medios ácidos; lo que lo conduce a ser un mineral muy resistente a las condiciones del ambiente de meteorización y a prevalecer ante las etapas de extracción secuencial realizadas.

Tabla 5. Resumen de los resultados del análisis mineralógico secuencial

Ambiente	Muestra	Muestra total	Residuo HCl	Residuo extracción secuencial
Planicie costera	PC-2	Cuarzo Caolinita Ilita Halita Yeso	Cuarzo Caolinita Ilita	Cuarzo Caolinita Ilita
Planicie costera	PC-5	Cuarzo Caolinita Ilita Halita Calcita	Cuarzo Caolinita Ilita	Cuarzo Caolinita Ilita
Canal activo 1	CA1-8	Cuarzo Caolinita Ilita Calcita Halita	Cuarzo Caolinita Ilita	Cuarzo Caolinita Ilita
Planicie de inundación	PI-17	Cuarzo Caolinita Ilita Calcita	Cuarzo Caolinita Ilita	Cuarzo Caolinita Ilita
Duna	D-19	Cuarzo Caolinita Ilita Calcita	Cuarzo Caolinita Ilita	Cuarzo Caolinita Ilita
Canal activo 2	CA2-22	Cuarzo Caolinita Albita Calcita	Cuarzo Caolinita Ilita Albita	Cuarzo Caolinita Ilita Albita
Barra de meandro	BM-25	Cuarzo Caolinita Ilita Halita	Cuarzo Caolinita Ilita	Cuarzo Caolinita Ilita



En todos los casos, las fases minerales presentes en el residuo de la primera extracción permanecen luego de la segunda. Las mayores diferencias se observan al comparar los resultados para muestra total y su correspondiente residuo.

Adicionalmente, las muestras de estudio están constituidas por minerales de origen carbonático (calcita) y evaporítico (halita y yeso, este último en particular solo se logró identificar en la zona superficial de la planicie costera) determinados en la etapa previa a la extracción secuencial, cuyas distribuciones varían de una muestra a otra.

3. Determinaciones químicas

En esta sección, se presentan y describen las características composicionales de las muestras recolectadas en la llanura deltaica del río Mitare, la distribución de los atributos químicos determinados en varios depósitos sedimentarios que constituyen al sistema, y finalmente la variabilidad de los mismos asociada no solo con las características propias del ambiente estudiado sino también de la metodología de muestreo y experimental desarrollada. En conjunto con los resultados de humedad y pérdida al rojo que se muestran a continuación.

3.1. Determinación de humedad y pérdida al rojo

En la tabla 6, se presentan los resultados de humedad y pérdida al rojo, calculados para las muestras de estudio, y los estadísticos obtenidos para cada distribución de datos. En la misma se observa que los coeficientes de variación asociados a cada parámetro, representa una dispersión mayor al 50% respecto a la media; lo que indica un agrupamiento de las muestras, en cuanto a su contenido de volátiles, en más de un grupo.

Tabla 6. Resumen de los resultados de humedad y pérdida al rojo para las muestras de lodo de los sedimentos del delta del río Mitare

	% Humedad	% Pérdida al rojo
Media	2,3±0,6	14,3±0,5
Mediana	1,5±0,6	10,4±0,5
% Coeficiente de variación	67	54



Al observar los gráficos de distribución para humedad (figura 34.a) y pérdida al rojo por ambientes (figura 34.b), se puede corroborar que hay tres comportamientos distintivos dentro de la población de datos, asociados a: planicie costera (PC), dunas (D) y el resto de los ambientes.

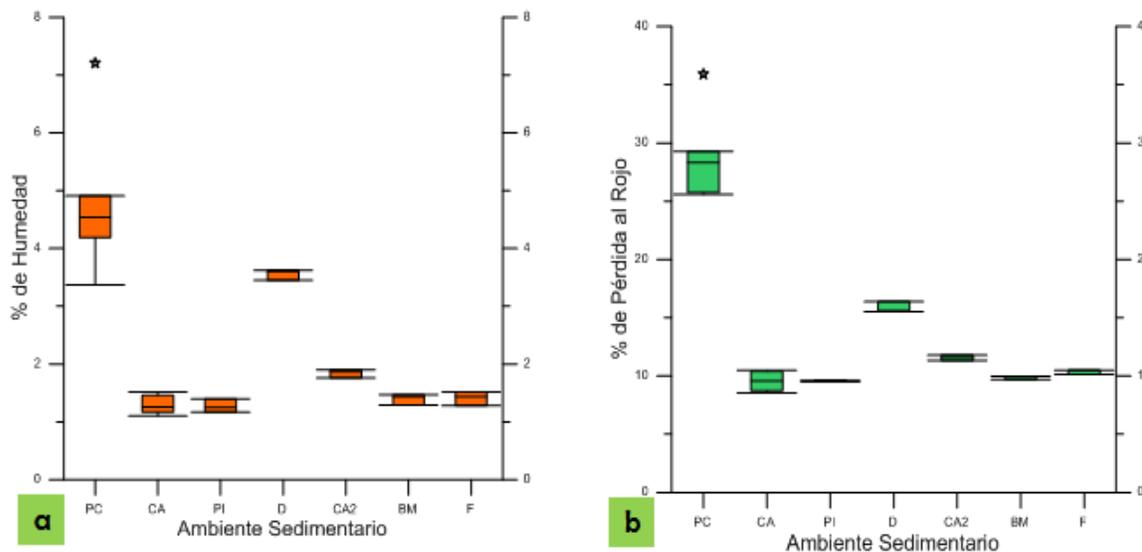


Figura 34. Humedad y pérdida al rojo para los subambientes muestreados (PC: planicie costera; CA: canal activo 1; PI: planicie de inundación; D: duna; CA2: canal activo 2; BM: barra de meandro; F: fluvial)

Las muestras de la planicie costera (PC) presentan los mayores porcentajes y variabilidad de estos parámetros, contando con una humedad y pérdida al rojo promedio de $4,8 \pm 0,6\%$ y $28,9 \pm 0,5\%$ respectivamente. Esta unidad se caracteriza por la presencia de conchas, yeso y materia orgánica, entre otros materiales, que aportan cantidades considerables de volátiles evidenciados en estos procesos.

En el grueso de los ambientes muestreados, están presentes los valores más bajos de estos parámetros, siendo su humedad y pérdida al rojo promedio $1,7 \pm 0,6 \%$ y $10,7 \pm 0,5 \%$ respectivamente. Ambas medidas cuentan con un coeficiente de variación de 16% en este grupo de ambientes, por lo cual indica que la diferencia interna dentro de cada punto de muestreo es baja.

3.2. Composición de los sedimentos

En la tabla 7 se presentan los datos de concentración promedio de los componentes mayoritarios, minoritarios y traza de los sedimentos superficiales del delta del río Mitare, el sistema fluvial y el área de influencia del delta. Así mismo con fines comparativos, son incluidas las abundancias promedio en la Corteza Continental (Taylor y McLennan, 1995), las lutitas norteamericanas -NASC- (Gromet *et al.*, 1984 y Condie, 1993) y el candidato a material de referencia de arcillitas de Falcón -MCAF- (Castillo, 2009 y Gámez, 2009).

Tabla 7. Concentraciones elementales en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare y en algunos materiales de referencia

	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Corteza Continental (1)	MCAF (2)	NASC (3)
Al₂O₃ (%)	15,1 ± 0,7	15,1	19,6	10,1	15,90	16,37	16,9
CaO (%)	3,2 ± 0,8	2,0	10,7	1,6	7,41	1,86	2,85
Fe₂O₃ (%)	8,0 ± 0,4	8,3	11,9	4,6	10,11	5,75	5,67
MgO (%)	2,2 ± 0,7	1,5	11,9	1,1	5,34	1,37	0,06
SiO₂ (%)	60 ± 3	64	73	34	57,35	73,4	64,8
Na₂O (%)	1,2 ± 0,4	0,6	4,6	0,5	3,11	0,74	3,56
K₂O (%)	1,43 ± 0,12	1,52	2,04	0,55	1,10	1,93	1,15
TiO₂ (%)	0,90 ± 0,05	0,93	1,16	0,48	0,90	0,84	0,78
MnO (mg/Kg)	384 ± 21	387	500	244	1806	640	51000
Ba (mg/Kg)	363 ± 19	372	457	224	250	283	636
Pb (mg/Kg)	24 ± 1	24	35	14	8	17	-
Zr (mg/Kg)	493 ± 122	308	1710	117	100	202	-
Co (mg/Kg)	6,3 ± 0,7	5,8	11,1	3,5	29	61	26
Cr (mg/Kg)	122 ± 8	124	189	68	185	92	125
Hg (µg/Kg)	110±11	108	214	34	40	33	-

(1) Taylor and McLennan (1995).

(2) Castillo (2009) y Gámez (2009).

(3) Gromet *et al.* (1984) y Condie (1993) para Fe y Al.

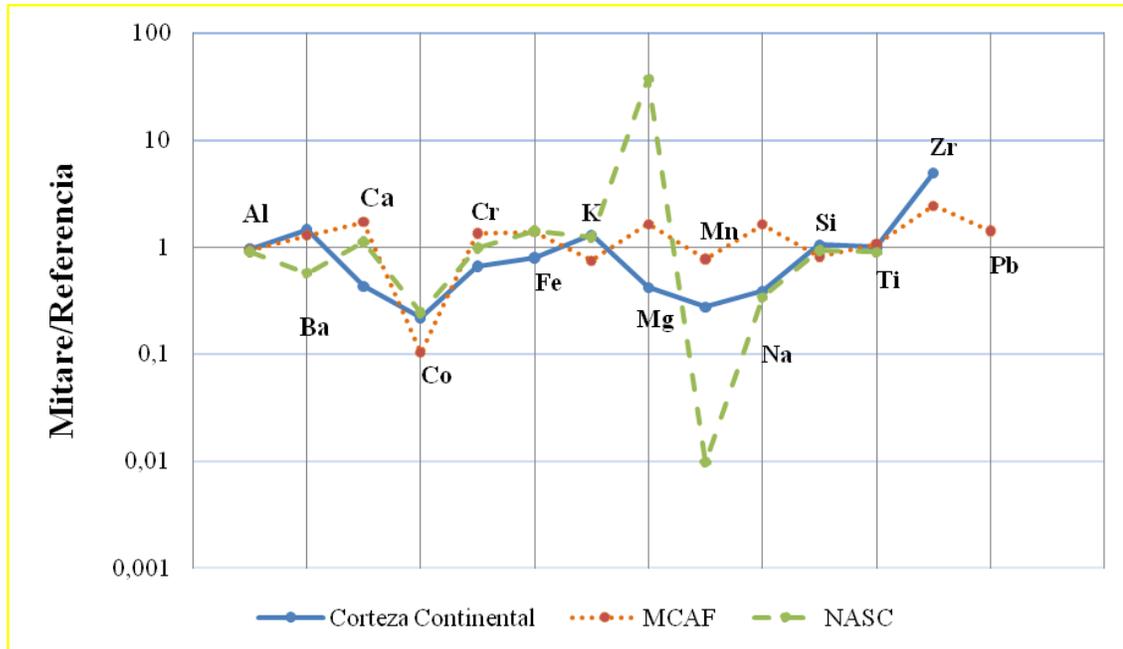


Figura 35. Normalización respecto a Corteza Continental, MCAF y NASC

Silicio, aluminio y titanio

Los elementos silicio, aluminio y titanio presentan concentraciones que guardan correspondencia con las abundancias reportadas para los materiales de referencia. Indicando que los mismos se distribuyen de manera homogénea en distintos compartimientos terrestres (figura 35).

La distribución de Si presenta la forma de “J” invertida o asimétrica negativa, tipificada por una tendencia bimodal (figura 36), que se relaciona con la influencia de seis valores extremos hacia el límite inferior de la distribución, que corresponden a las muestras asociadas a la planicie costera. El Al y el Ti por su parte (figura 37), presentan distribuciones simétricas, que se caracterizan por coeficientes de variación menores a 20% y relaciones entre la media y la mediana entre 0,97 y 1.

Los valores promedio obtenidos para estos tres elementos, expresados como su óxido correspondiente son: 15,1 % Al_2O_3 , 60 % SiO_2 y 0,90 % TiO_2 .

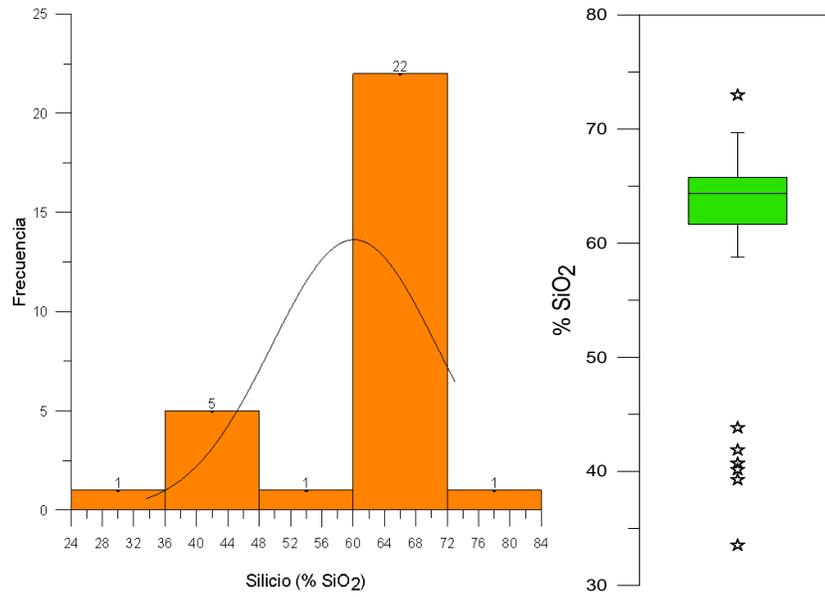


Figura 36. Cajas gráficas e histogramas para la distribución de silicio (SiO₂) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare

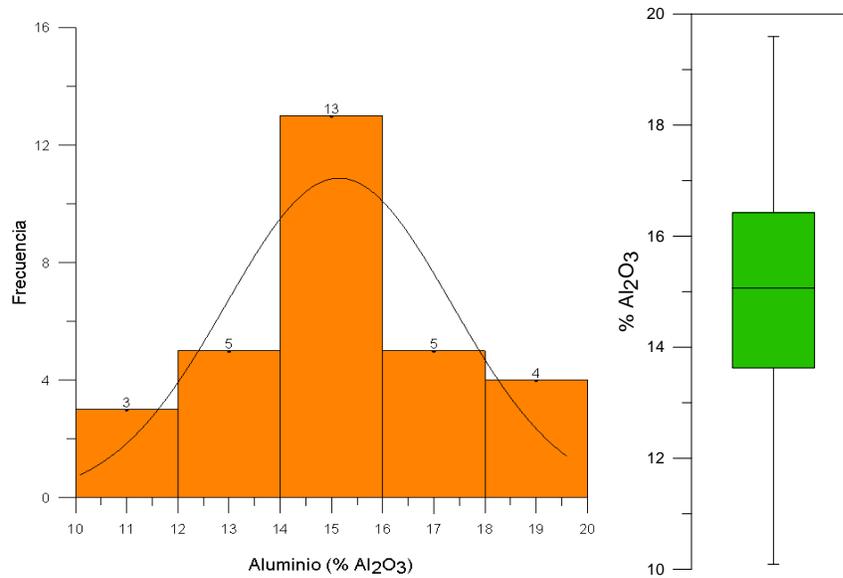


Figura 37. Cajas gráficas e histogramas para la distribución de aluminio (Al₂O₃) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare

Calcio, magnesio y sodio

En las muestras de estudio, las concentraciones de los elementos calcio, magnesio y sodio sobrepasan los valores de referencia de MCAF y NASC; por el contrario, en cuanto a la composición de la Corteza Continental las mismas se encuentran empobrecidas en estos elementos (figura 35).

Esto refleja que los sedimentos del sistema Mitare presentan una composición influenciada por un aporte de terrígenos de características félsicas a intermedias (como lo indican Castro, 2002 y Valencia, 2007 para las formaciones Cerro Pelado y Urumaco de la Cuenca Central de Falcón), que los distinguen de la composición promedio de la Corteza Continental, así como un aporte de sedimentos con rasgos carbonáticos y/o evaporíticos que pueden contribuir con concentraciones de estos componentes.

De manera contraria a los elementos de la sección anterior, los valores de calcio, magnesio y sodio que se asocian a la planicie costera son las concentraciones más altas de cada distribución, incluyendo a valores extremos y máximos de las mismas. Esto conlleva a que las distribuciones de estos elementos presenten una asimetría positiva (figura 38) y adicionalmente, una dispersión elevada respecto a los valores de tendencia central, que conlleva a que los coeficientes de variación para estos elementos sean superiores a 80%.

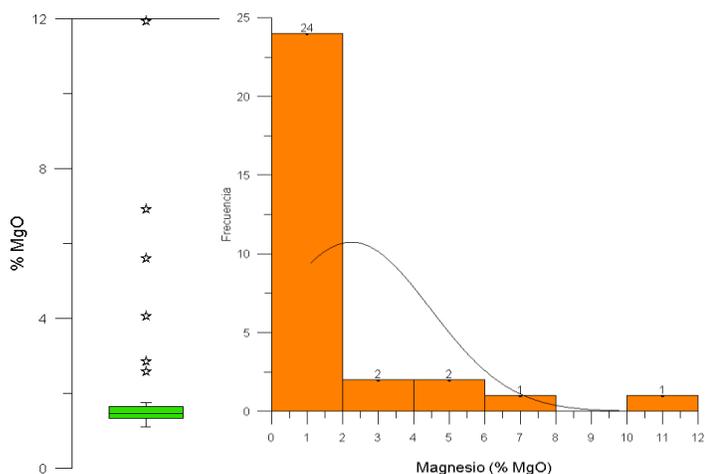


Figura 38. Caja gráfica e histograma para la distribución de magnesio (MgO) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare



Hierro y potasio

Las diferencias entre la concentración de hierro y potasio en las muestras de estudio y las abundancias reportadas para los materiales de referencia son bajas. Sin embargo, al comparar estos sistemas, se observa un patrón de comportamiento inverso entre ambos elementos. Así, la concentración de potasio para MCAF es ligeramente mayor al promedio correspondiente al sistema Mitare y éste a su vez, supera al que caracteriza a la Corteza Continental y NASC, en cambio, para el hierro la secuencia creciente en concentración es la siguiente: Corteza Continental, sistema Mitare y MCAF (figura 35).

Lo anterior pudiese relacionarse con el dominio de características intermedias en la composición de la Corteza Continental y con un enriquecimiento relativo de minerales secundarios de hierro en la cuenca del Mitare respecto a MCAF. Por otro lado, NASC se encuentra empobrecido en ambos elementos respecto al sistema deltaico del río Mitare y el resto de las referencias.

En la figura 39 se presenta la distribución del hierro, como ejemplo del comportamiento de las distribuciones de ambos elementos. Esta presenta la forma de “J” invertida o asimetría negativa, que implica un ligero desplazamiento de la media respecto a la mediana hacia el límite inferior de las distribuciones. De esta manera, hierro y potasio cuentan con medias de 8,0 y 1,43 y medianas de 8,3 y 1,52, respectivamente.

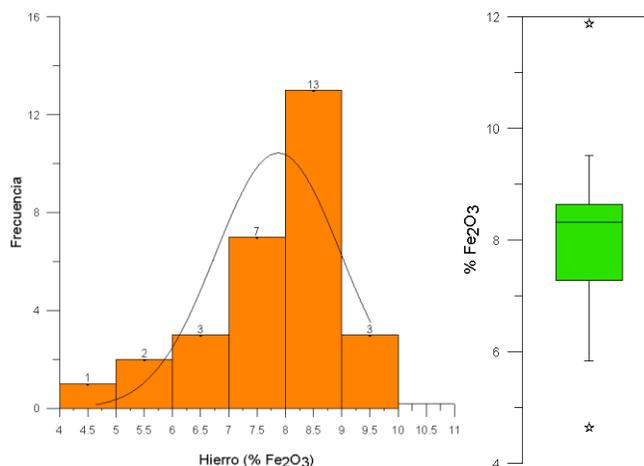


Figura 39. Caja gráfica e histograma para la distribución de hierro (Fe₂O₃) en los sedimentos superficiales del delta del río Mitare



Elementos traza

Los elementos que se presentan en concentraciones traza (<1000 ppm) en los sedimentos de estudio son: circonio, plomo, manganeso, cobalto, bario y cromo. Estos resultados se presentan igualmente en la tabla 7. La presencia o abundancia de estos elementos en determinados ambientes terrestres, estará condicionada por su función geoquímica dentro de tales sistemas.

Circonio y plomo, presentan una tendencia decreciente; considerando al sistema Mitare con las concentraciones más altas, luego MCAF y finalmente la Corteza Continental. Estos elementos, por su alto peso específico suelen relacionarse con fases de minerales pesados, bien sea coprecipitados o formando parte de sus estructuras. En consecuencia, estas fases suelen presentar gran tenacidad ante las condiciones de alteración química y física del ciclo sedimentario y se acumulan a medida que el ciclo evoluciona. Así la composición de la Corteza Continental, seguida de MCAF, pudiesen considerarse la representación de las etapas iniciales del ciclo sedimentario que culmina en la cuenca sedimentaria del delta del río Mitare y su área de influencia.

Por el contrario, manganeso y cobalto se encuentran en concentraciones bajas en los sedimentos de estudio respecto a todos los materiales de referencia, especialmente en la lutita promedio -NASC- en el caso de Mn. Esto pudiese asociarse a la ausencia de una fuente definida de estos elementos en el área. Particularmente el cobalto, se encuentra en concentraciones próximas a su límite de determinación en el análisis realizado; por ende, no se considera en las etapas subsiguientes de la interpretación de resultados.

Al comparar la concentración promedio de bario que deriva de este estudio, se observa un ligero enriquecimiento en los sedimentos del sistema Mitare respecto a MCAF y la Corteza Continental, y en contraparte, la abundancia de este elemento para NASC supera a la determinada en el sistema de estudio. La abundancia relativa de bario en la corteza terrestre es comparativamente baja, sin embargo puede relacionarse con fases minerales mayoritarias en forma de sustituyente, ocluido o adsorbido.

Finalmente, las concentraciones de cromo y hierro en los sedimentos de estudio en relación a las referencias cotejadas, son muy similares. Estos presentan mayores concentraciones respecto a MCAF y menores en función de la composición promedio de la Corteza Continental, por lo cual se plantea en primera instancia, que ambos elementos pudiesen estar asociados a las mismas especies químicas y/o mineralógicas en este sistema.

Mercurio

El mercurio es el único elemento de los determinados que se presenta en proporciones de ultratraza en los sedimentos de estudio. Sin embargo, al comparar la concentración promedio determinada con otros sistemas naturales, se obtiene que hay un enriquecimiento de este elemento en las muestras del delta del río Mitare respecto a la composición promedio de la Corteza Continental (Wedepohl, 1995), la pelita promedio mundial (Gao *et al.*, 1998) y MCAF (figura 40). Esto puede tener ciertas implicaciones de carácter ambiental, que serán descritas a través de la comparación con la distribución de este elemento en sistemas aledaños al área de estudio, considerado en la sección 5 de la discusión de resultados, sobre inferencias de geoquímica ambiental.

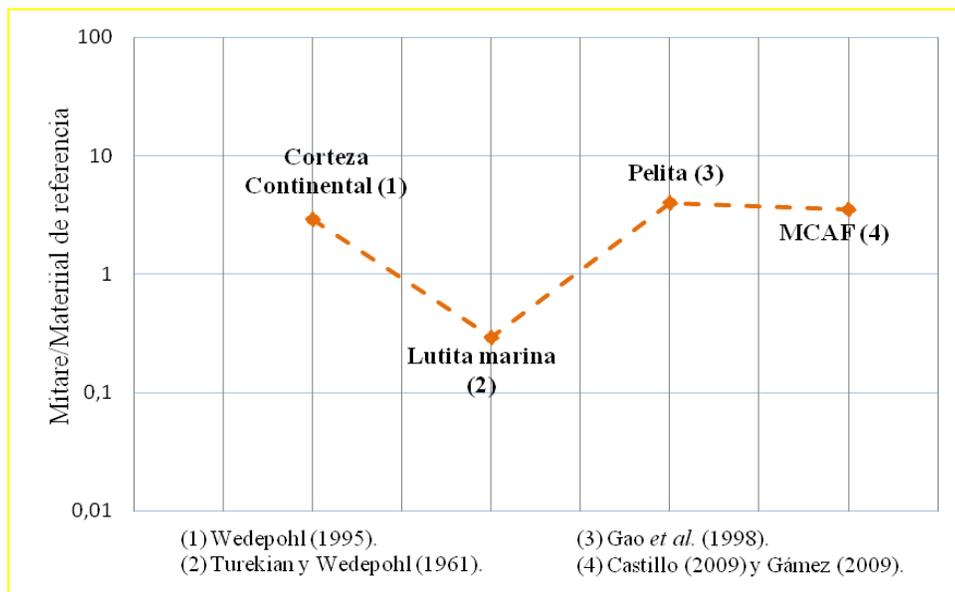


Figura 40. Normalización de la concentración media de Hg obtenida en este estudio en función de algunos materiales de referencia

3.3 Distribución por ambientes

En función de los promedios por ambiente para cada elemento químico, se observaron algunos patrones de distribución en los depósitos sedimentarios estudiados, que permiten agrupar a sus componentes de la siguiente manera:

- a) Al, Fe, K, Ti, Ba, Pb, Mn y Co: Estos elementos tienen una composición promedio similar en cada depósito, con la distinción del canal activo 2 (CA2) y las dunas (D) que presentan las medias más altas, y la planicie costera (PC) que en contraparte cuenta con las menores concentraciones para los mismos (figura 41).

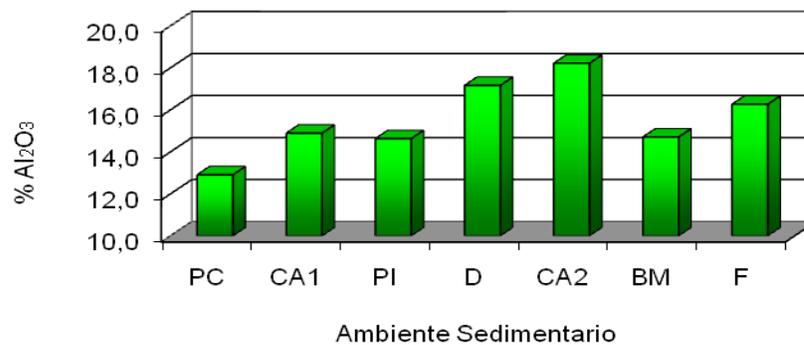


Figura 41. Distribución de aluminio por ambiente (PC: planicie costera; CA1: canal activo 1; PI: planicie de inundación; D: duna; CA2: canal activo 2; BM: barra de meandro; F: fluvial)

La distribución del Si en el sistema Mitare, es similar a la de los elementos anteriores con la única diferencia de que salvo en la planicie costera, en el resto de los depósitos su distribución se podría considerar constante. El Cr por su parte, también guarda gran similitud en cuanto a las concentraciones promedios en los distintos depósitos pero difiere de este grupo de elementos porque las concentraciones más bajas no solo se asocian a la planicie costera sino también a la planicie de inundación (PI).

- b) Ca, Mg y Na: En el caso de estos componentes su distribución en el sistema Mitare es opuesta a los elementos del grupo anterior (figura 42). La planicie costera reúne las concentraciones más elevadas y en el resto de los depósitos presentan pocas diferencias entre sí.

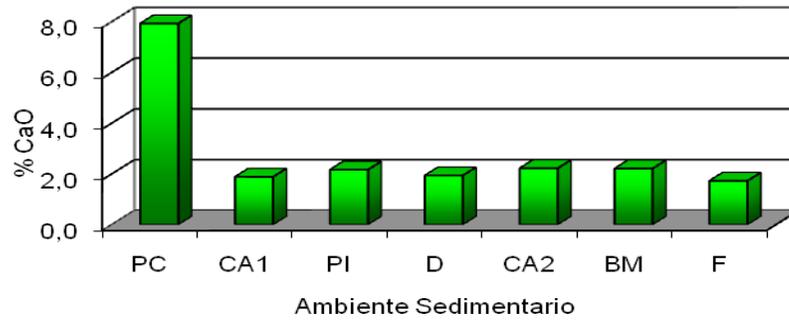


Figura 42. Distribución de calcio por ambiente (PC: planicie costera; CA1: canal activo 1; PI: planicie de inundación; D: duna; CA2: canal activo 2; BM: barra de meandro; F: fluvial)

c) Zr: Estos elementos no siguen ningún patrón definido para otro u otros elementos (figura 43).

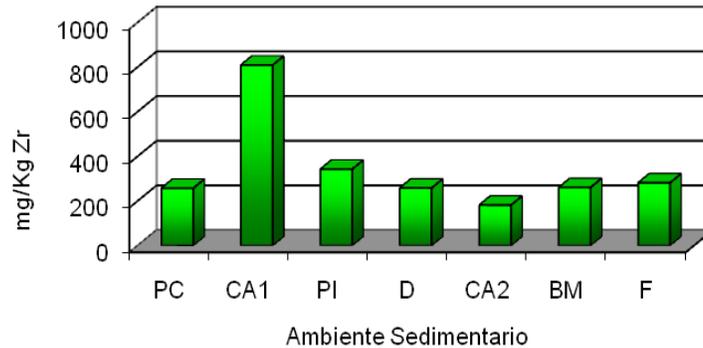


Figura 43. Distribución de circonio por ambiente (PC: planicie costera; CA1: canal activo 1; PI: planicie de inundación; D: duna; CA2: canal activo 2; BM: barra de meandro; F: fluvial)

Hasta este punto se han evidenciado ciertas distinciones composicionales entre los depósitos sedimentarios estudiados. Particularmente las distribuciones de Ca, Mg y Na son los principales ejemplos para indicar la existencia de diferencias geoquímicas entre la planicie costera (PC) y el resto de los subambientes.

Es por ello que se realizó una prueba de hipótesis con la finalidad de definir de manera estadística las discrepancias antes mencionadas. Así, se aplicó una prueba de hipótesis de dos colas o tipo I (Miller y Miller, 2002), en donde la hipótesis nula era equivalente a la igualdad de las medias poblacionales, tomando como poblaciones independientes los datos obtenidos para la planicie costera respecto a los correspondientes a los demás depósitos.



De lo anterior se obtuvo que para todos los elementos químicos estudiados, se rechaza la hipótesis nula, lo que significa que para el conjunto de elementos implicados ambas medias poblacionales son estadísticamente diferentes, refiriéndose a la planicie costera como una población y al resto de los ambientes como otra. Por consiguiente, la planicie costera será discutida aparte en lo sucesivo.

3.4. Variabilidad en la concentración de los elementos químicos

La capacidad para discriminar tendencias reales, relacionadas con causas naturales o antropogénicas en las características químicas de los sedimentos de estudio está condicionada por la distinción de la variabilidad inherente a la metodología desarrollada, particularmente, el muestreo y los procedimientos analíticos. Es por ello que en esta sección se hace una interpretación de los porcentajes de coeficientes de variación que se relacionan con: el muestreo, considerando como punto de muestreo a cada uno de los depósitos sedimentarios estudiados; los métodos analíticos, en este caso denotados como HCl, HNO₃ y fusión, que involucran toda la marcha experimental ejecutada e igualmente se evalúan las diferencias entre muestras de un mismo sistema (tabla 8).

En la columna (a) de la tabla 8, se observa que el 95% de las determinaciones elementales realizadas en las distintas muestras, se encuentran en el intervalo de coeficientes de variación menor a 20%. Este resultado sugiere que para el grueso de las mismas no hubo introducción de variabilidad apreciable que se relacione al muestreo realizado.

Los coeficientes de variación generales (tabla 8.c), que consideran al conjunto total de muestras estudiadas, reflejan que el sistema deltaico del río Mitare y su área de influencia, son heterogéneos desde el punto de vista de la distribución particular de los elementos Ca, Mg, Na, Zr y Hg.

La variabilidad asociada a los métodos analíticos empleados (tabla 8.b), es lo suficientemente baja como para considerarse despreciable ante las reflejadas en los porcentajes de coeficiente de variación globales, relacionadas con las características intrínsecas de sistema.



Tabla 8. Coeficientes de variación relacionados con el muestreo, los métodos analíticos empleados y la variabilidad general del sistema de estudio

	(a)									(b)			(c)
	PC	CA1 A	CA1 B	CA1 C	PI	D	CA2	BM	F	Fusión	HCl	HNO ₃	GENERAL
Al₂O₃	22	2	3	2	7	6	11	4	3	3	20	10	15
CaO	36	8	5	5	7	5	16	9	13	8	2	13	85
Fe₂O₃	15	5	4	3	14	5	20	2	1	6	18	8	17
MgO	62	2	5	5	5	7	2	6	5	6	3	16	101
SiO₂	9	3	3	5	3	5	4	2	5	2	6	N.D.	18
Na₂O	25	1	2	3	2	35	7	5	8	2	2	3	102
K₂O	21	8	0	5	4	1	9	4	11	3	4	N.D.	26
MnO	14	8	6	3	12	5	10	5	6	4	3	9	18
TiO₂	14	2	1	2	15	2	3	12	4	8	N.D.	N.D.	18
Ba	22	11	3	6	9	4	5	7	2	3	6	16	17
Pb	16	12	5	4	16	5	19	5	5	6	N.D.	8	18
Zr	42	36	3	16	36	9	9	14	8	9	N.D.	N.D.	80
Co	30	23	11	10	14	7	33	6	5	9	4	13	25
Cr	17	18	1	20	20	7	12	12	9	10	N.D.	12	21
Hg	57	35	12	23	26	8	16	14	13	-	-	-	33

- (a) Coeficientes de variación asociados al muestreo (PC: planicie costera; CA1: canal activo 1; PI: planicie de inundación; D: duna; CA2: canal activo 2; BM: barra de meandro; F: fluvial).
 (b) Coeficientes de variación relacionados con los métodos analíticos empleados.
 (c) Coeficientes de variación que involucran la variabilidad total.

4. Comportamiento geoquímico

Hasta esta sección se han descrito las características químicas de la zona de estudio y se han evaluado las distribuciones de los elementos mayoritarios y traza determinados, en los distintos depósitos sedimentarios muestreados. De igual manera, se establecieron diferencias estadísticas entre dos segmentos del sistema: el ambiente deltaico propiamente dicho, en conjunto con el fluvial y la planicie costera; con la inferencia de la existencia de dos poblaciones con rasgos geoquímicos distintivos.

En lo siguiente, se hace una interpretación de las posibles interacciones geoquímicas que definen al ambiente deltaico-fluvial y a la planicie costera, se presentan algunas inferencias realizadas aplicando herramientas de la geoquímica sedimentaria y ambiental y finalmente, se expone una interpretación global de la geoquímica que describen los sedimentos fino superficiales del sistema deltaico del río Mitare y su área de influencia.



4.1. Ambiente fluviodeltaico

Los elementos que se asocian preferencialmente a la fase residual de la extracción secuencial realizada son: Al (89%), Si (99,6%), K (99%), Na (94%), Cr (93%), Ba (73%) y Pb (68%). Esto representa que los mismos, se encuentran relacionados a fases minerales resistentes al ataque ácido, bien sea como constituyentes principales o sustituyentes en sus estructuras (figura 44).

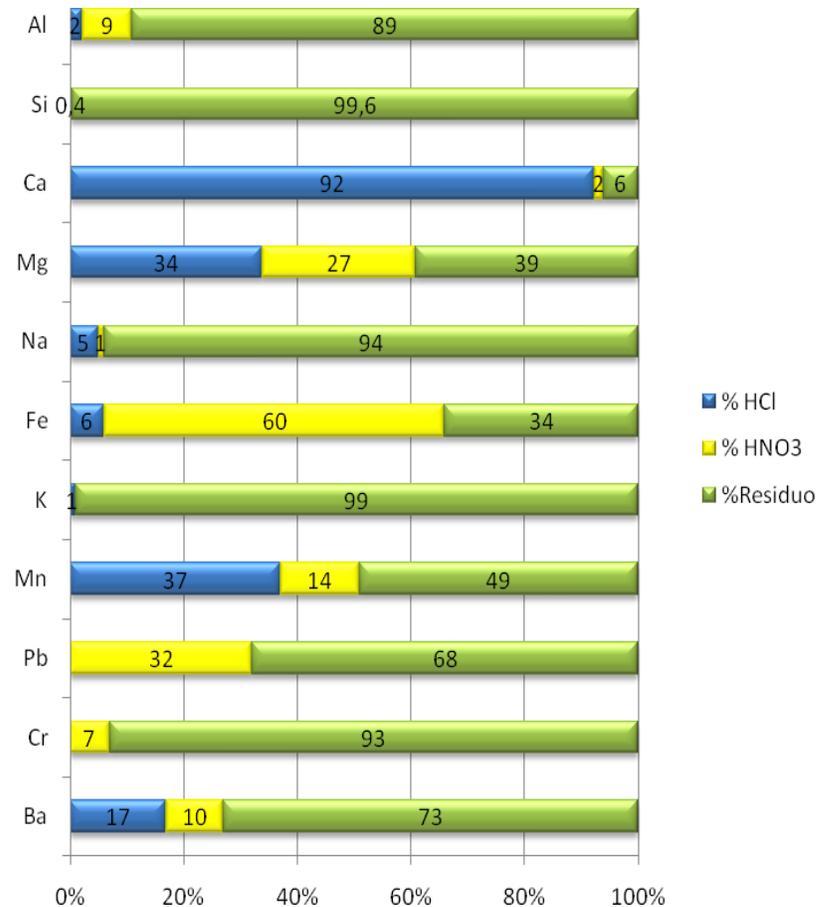


Figura 44. Fraccionamiento geoquímico por extracto y fase residual de los elementos determinados para el ambiente fluviodeltaico

Así, aluminio, silicio, sodio y potasio componen a fases minerales como caolinita, ilita, albita y cuarzo determinadas en el análisis mineralógico; el bario probablemente se encuentra en forma de barita ($BaSO_4$), mineral de origen evaporítico o hidrotermal, ampliamente difundido en distintos tipos de ambientes sedimentarios (Klein y Hurlbut, 1998) y finalmente, Pb y Cr pueden



haber sido incorporados a la matriz de aluminosilicatos o coprecipitados con oxi-hidróxidos de Fe y Mn (Rodríguez-Meza *et al.*, 2009).

El Ca se asocia casi en su totalidad a la fase de HCl (92%), y en función de la determinación de calcita en el estudio mineralógico realizado, se plantea que esta fase mineral es la representante del calcio en los sedimentos del sistema.

Tabla 9. Matriz de correlación para la concentración en muestra total de los elementos mayoritarios y traza que caracterizan al ambiente fluviodeltaico. Se resaltan en amarillo las correlaciones $>0,67$

	Al	Ca	Mg	Si	K	Mn	Ti	Ba	Pb	Zr	Cr	Na	Fe	Hg
Al	1													
Ca	-0,07	1												
Mg	0,70	0,29	1											
Si	-0,33	0,01	-0,49	1										
K	0,86	-0,02	0,59	-0,21	1									
Mn	0,65	0,09	0,72	-0,33	0,66	1								
Ti	0,44	0,24	0,58	-0,22	0,41	0,59	1							
Ba	0,63	0,06	0,55	-0,29	0,44	0,41	0,50	1						
Pb	0,62	0,16	0,59	-0,40	0,58	0,71	0,51	0,68	1					
Zr	-0,41	-0,20	-0,53	0,28	-0,51	-0,61	-0,43	0,19	-0,22	1				
Cr	0,09	0,01	0,19	-0,23	-0,09	0,12	0,17	0,75	0,47	0,52	1			
Na	0,49	0,34	0,60	-0,42	0,32	0,38	0,23	0,33	0,35	-0,27	0,04	1		
Fe	0,52	0,25	0,45	-0,18	0,48	0,67	0,38	0,59	0,90	-0,15	0,49	0,22	1	
Hg	0,34	-0,28	0,09	-0,26	0,39	0,41	0,10	0,27	0,41	-0,01	0,04	0,12	0,29	1

Aquellos elementos que presentan un porcentaje considerable en cada extracto o fase (HCl, HNO₃ y residuo) son: Mg (34%, 27% y 39%), Fe (7%, 60% y 34%) y Mn (38%, 14% y 49%). Para éstos, existe un factor geoquímico distintivo que condiciona su presencia en cada una de las fases. De esta manera, en función de las características generales del sistema y de los tipos de minerales determinados en el análisis por DRX se plantea que:

- El Mg asociado a la fase de HCl representa a minerales evaporíticos y carbonáticos; el resto deriva de minerales de arcilla amorfos o cristalinos, tipo montmorillonita. Esto último se complementa con buenas correlaciones lineales entre el Mg y los elementos Al y K constituyentes de este tipo de minerales (figura 45).

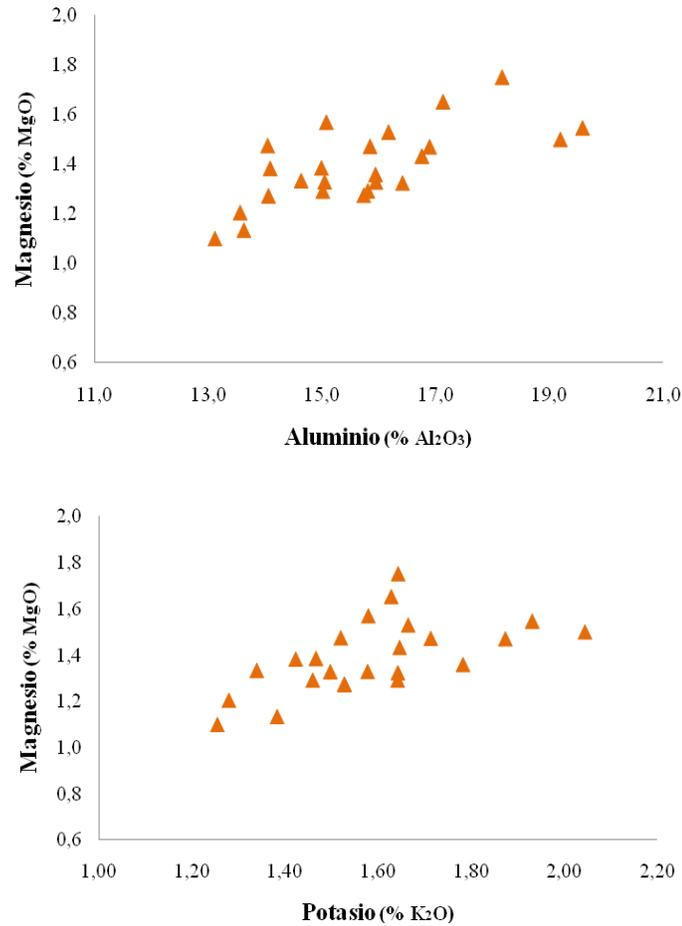


Figura 45. Relaciones entre las concentraciones en muestra total, de magnesio respecto a aluminio y potasio en el ambiente fluviodeltaico

- b) El Fe está relacionado preferencialmente con fases amorfas y cristalinas de oxi-hidróxidos, por su dominancia en el extracto HNO₃ y el residuo de este elemento, al igual que para Mg, se asocia a minerales de arcilla. La fuerte correlación existente entre Fe y Pb (figura 46), podría ser producto de la coprecipitación de trazas de Pb en las fases minerales que presentan Fe, particularmente aquellas asociadas a la fase residual.

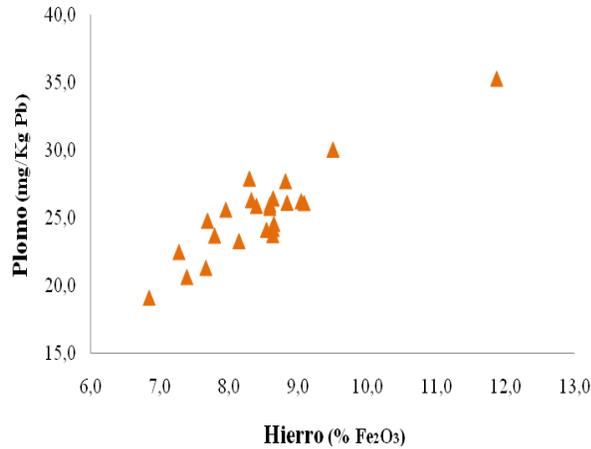


Figura 46. Relación entre las concentraciones en muestra total de hierro y plomo en el ambiente fluviodeltaico

- c) El Mn que se encuentra en los sedimentos de estudio en concentraciones traza, se manifiesta como sustituyente del Fe en sus fases minerales, o sorbido en partículas de minerales de arcilla y oxi-hidróxidos. Es por ello que este elemento presenta correlaciones lineales mayores a 0,60 al compararlo con Fe y Al (figura 47).

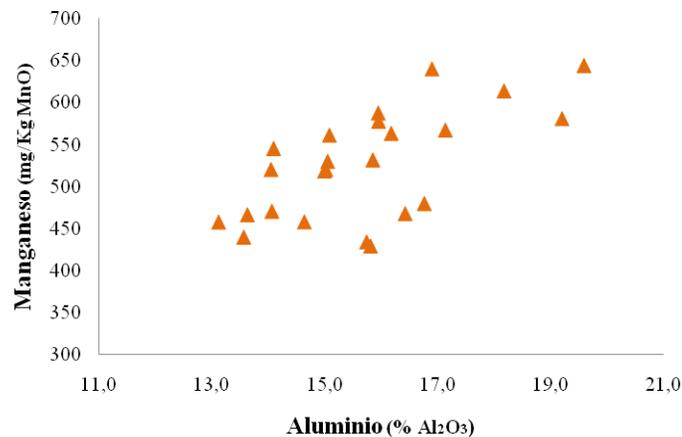


Figura 47. Relación entre las concentraciones en muestra total de manganeso y aluminio en el ambiente fluviodeltaico

Ti y Zr no fueron detectados en las etapas de extracción ácida desarrolladas. En consecuencia, se propone que su presencia en los sedimentos de estudio se encuentra directamente relacionada con fases minerales de alta resistencia química tales como rutilo y circón, respectivamente.



4.2. Análisis de factores para el ambiente fluviodeltaico

De manera individual, se han mencionado algunos de los procesos que controlan la distribución de los elementos químicos en el ambiente fluviodeltaico. Sin embargo, se precisó la aplicación de la técnica de la estadística multivariada, análisis de factores, con la finalidad de restringir las relaciones existentes entre los distintos elementos a grupos o factores relacionables con procesos geoquímicos particulares, considerando únicamente la varianza común entre los mismos.

De lo anterior, se obtuvo la tabla 10.a en la cual los valores asociados a cada elemento tendrán mayor peso estadístico para cada factor, a medida que se acerquen a la unidad y sean positivos. Se seleccionaron tres factores o asociaciones de elementos que reúnen el 64% de la varianza y que permiten referirlos a los procesos que se presentan en la tabla 10.b.

Tabla 10. Resultados del análisis de factores

a	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3
% VARIANZA	42	13	9
Al	0,76	0,28	-0,38
Ca	0,21	0,11	0,65
Mg	0,86	0,25	0,15
Si	-0,47	-0,13	0,14
K	0,74	0,16	-0,36
Mn	0,81	0,29	-0,03
Ti	0,55	0,30	0,20
Ba	0,33	0,84	-0,13
Pb	0,58	0,73	-0,10
Zr	-0,79	0,39	-0,20
Cr	-0,14	0,84	0,00
Na	0,58	0,10	0,04
Fe	0,42	0,75	0,03
Hg	0,26	0,19	-0,52

b	Factor 1	Clástico-evaporítico
	Factor 2	Oxi-hidróxidos de Fe
	Factor 3	Carbonatos



El **Factor 1**, muestra altas cargas positivas ($>0,50$) para Al, Mg, K, Na, Mn, Pb y Ti, y altas cargas negativas para Si y Zr. Este factor incluye los elementos de origen terrígeno, típicamente incorporados a la matriz de los aluminosilicatos.

Los rasgos geoquímicos que caracterizan al factor 1, particularmente Mg, Na y K pueden ser relacionados adicionalmente, a los procesos evaporíticos que caracterizan a la cuenca, que influyen en la presencia de porciones de estos elementos en el extracto de HCl obtenido y que en el caso del Na, condicionó la determinación de halita en la primera etapa del análisis mineralógico realizado.

La carga negativa de Si y Zr en el factor 1, indica que estos elementos en sus fases minerales cuarzo y circón, respectivamente, presentan una pequeña tendencia a la disminución en las muestras de estudio, a medida que se enriquecen en minerales de arcilla y evaporíticos. Esto guarda relación con el hecho de que estos minerales en el ambiente sedimentario, son propensos a ser acumulados en la fracción arena bien sea por la forma de sus granos (en el caso del cuarzo) o por su densidad (en el caso del circón), la cual no fue objeto de este estudio.

Finalmente la asociación de Ti a este factor puede deberse a dos razones. La primera, la presencia de rutilo de grano fino fácilmente transportado junto a la fracción de aluminosilicatos de grano fino y la segunda, la posible sustitución de Al por Ti en los minerales de arcilla que abundan en este sistema.

El **Factor 2** revela altos pesos estadísticos para Ba, Pb, Cr y Fe. Esta asociación agrupa al conjunto de fases amorfas y cristalinas de oxi-hidróxidos de Fe o minerales pesados, que como se indicó anteriormente guardan relación con coprecipitaciones de Pb y Cr. En esta matriz se incluyen cantidades traza de Ba en su forma mineral barita.

La varianza que corresponde al **Factor 3**, se restringe al elemento Ca como principal representante de los procesos carbonáticos que caracterizan a la cuenca.

4.3. Planicie costera

Anteriormente se indicó que las principales diferencias geoquímicas entre la planicie costera y el resto de los ambientes muestreados, se fundamentan en que este depósito cuenta con las mayores concentraciones de Na, Ca y Mg y los mínimos de los demás atributos químicos

estudiados. Estas características condujeron a proponer estadísticamente la existencia de discrepancias geoquímicas entre el área de influencias del delta, representada por este ambiente y el sistema deltaico propiamente dicho.

En el punto de muestreo seleccionado en la planicie costera fueron tomadas seis muestras a profundidad, este particular permitió hacer una observación e interpretación de las variaciones químicas verticales en este depósito, con el fin de plantear una secuencia de procesos geoquímicos que lo caracterizan.

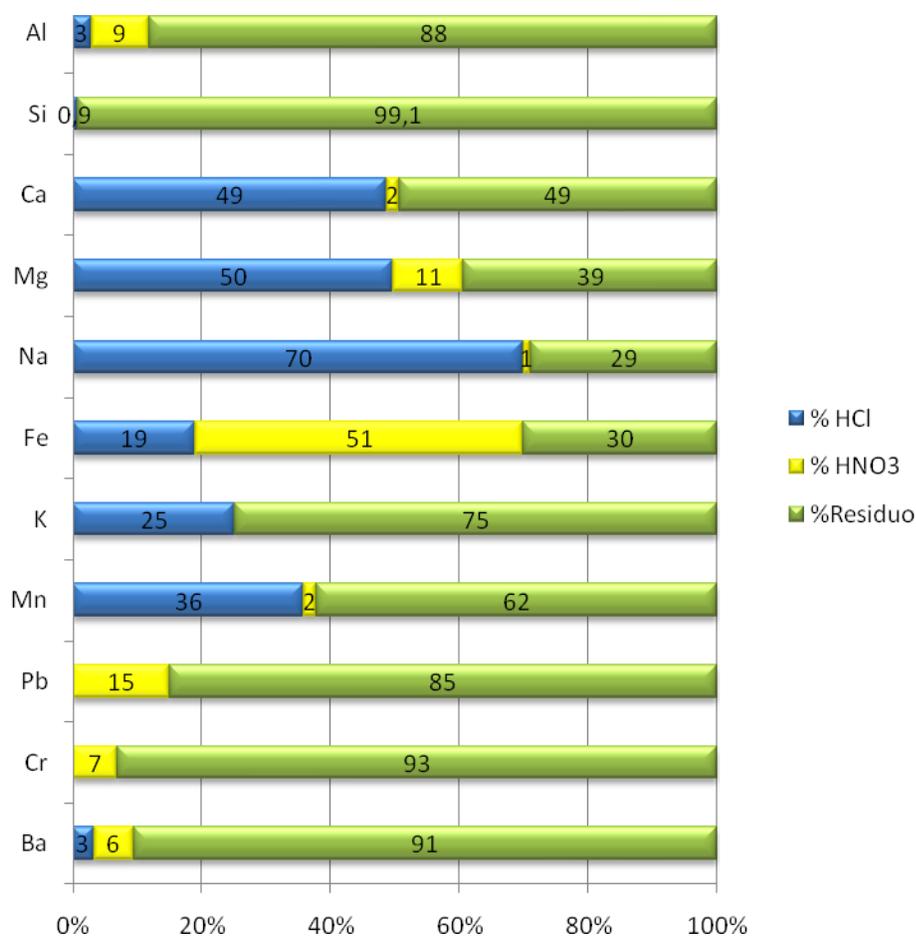


Figura 48. Fraccionamiento geoquímico por extracto y fase residual de los elementos determinados para la planicie costera

Al evaluar el fraccionamiento de los atributos químicos estudiados para la planicie costera en los extractos HCl, HNO₃ y la fase residual (figura 48), se obtuvo que Al, Si, K, Cr, Ba, Pb, Fe

y Mn presentan variaciones despreciables respecto a su correspondiente repartición en el ambiente deltaico; caracterizando así a fases de minerales de arcilla (Al, K y Mn), cuarzo (Si), oxi-hidróxidos amorfos y cristalinos (Fe) y coprecipitaciones en los mismos (Pb y Cr), fases sorbidas en superficie (Mn) y la posible presencia de barita de origen autigénico (Ba).

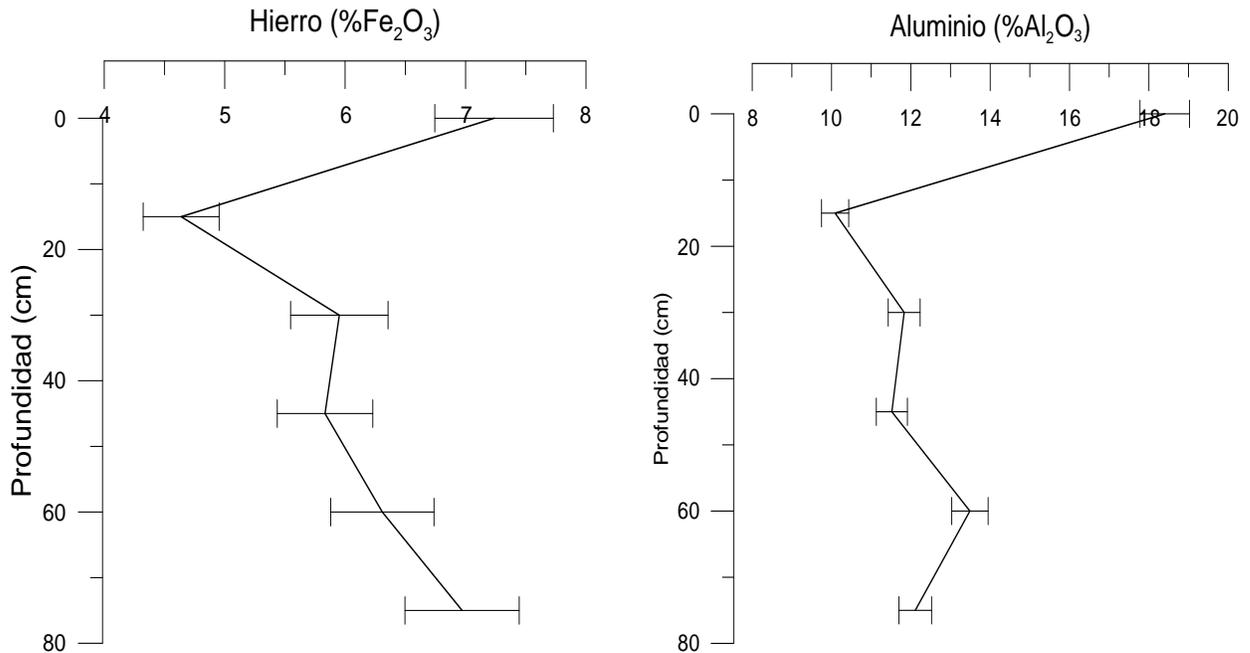


Figura 49. Perfiles geoquímicos de los elementos hierro y aluminio (en muestra total) en la planicie costera

Los perfiles elementales de Al, Ti, K, Fe y los elementos traza asociados (Mn, Ba, Pb y Cr) presentan una tendencia general a profundidad similar (figura 49), caracterizada por una disminución en sus concentraciones en la sección media del perfil (entre 15 y 30 cm de profundidad, aproximadamente). Adicionalmente, lo anterior puede ser complementado con buenas correlaciones lineales, con coeficientes $>0,67$, entre los elementos de este grupo (tabla 11).

En función de lo anterior, se propone la existencia de una relación a lo largo del perfil entre fases de aluminosilicatos (Al y Ti) y oxi-hidróxidos de Fe probablemente regulada por la formación de recubrimientos de oxi-hidróxidos de Fe sobre partículas de arcilla o alofano, como indica Yanes (1999) que es una característica distintiva de los sedimentos de los caños Manamo y Macareo del delta del río Orinoco. Estos rasgos geoquímicos pueden ser los condicionantes en la



movilidad de los elementos relacionados a estas fases, a lo largo del perfil de sedimentos de la planicie costera.

Tabla 11. Matriz de correlación para la concentración en muestra total de los elementos mayoritarios y traza que caracterizan a la planicie costera. Se resaltan en amarillo las correlaciones $>0,67$

	Al	Ca	Fe	Mg	Si	Na	K	Mn	Ti	Ba	Pb	Zr	Cr	Hg
Al	1													
Ca	-0,85	1												
Fe	0,77	-0,48	1											
Mg	-0,53	0,19	-0,89	1										
Si	0,29	0,08	0,79	-0,91	1									
Na	0,54	-0,81	0,36	-0,18	0,06	1								
K	0,47	-0,09	0,62	-0,40	0,52	-0,15	1							
Mn	0,88	-0,96	0,62	-0,30	0,02	0,68	0,24	1						
Ti	0,89	-0,53	0,91	-0,78	0,61	0,22	0,69	0,65	1					
Ba	0,78	-0,53	0,84	-0,65	0,42	0,13	0,56	0,74	0,87	1				
Pb	0,82	-0,62	0,96	-0,83	0,73	0,58	0,53	0,68	0,86	0,71	1			
Zr	-0,38	0,73	0,22	-0,53	0,70	-0,57	0,21	-0,60	0,07	0,02	0,05	1		
Cr	0,90	-0,57	0,83	-0,67	0,46	0,16	0,66	0,70	0,98	0,91	0,77	-0,04	1	
Hg	0,82	-0,76	0,60	-0,22	0,02	0,34	0,55	0,89	0,70	0,83	0,57	-0,48	0,78	1

La presencia de concentraciones elevadas de Na en la planicie costera, se asocia a las costras salinas que caracterizan a este ambiente, que están constituidas por minerales evaporíticos principalmente halita, fase que condiciona la dominancia de la fracción HCl en la distribución geoquímica de este elemento.

El comportamiento de Na a lo largo del perfil muestreado (figura 50), puede ser relacionado con aquel descrito para los elementos del grupo anterior. En donde se manifiesta una disminución notoria de la concentración de este elemento la región central del mismo, en este caso correspondiente al intervalo de profundidad de 30 a 45 cm.

Los elementos Ca y Mg, presentan un comportamiento opuesto a los elementos del conjunto anterior en el perfil estudiado (figura 51). Así, las mayores concentraciones de los mismos, se presentan en la sección media del perfil (entre 15-30 cm de profundidad).

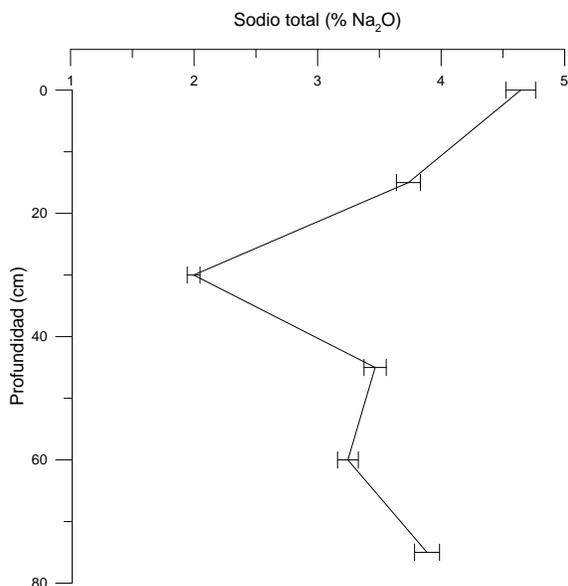


Figura 50. Perfil geoquímico del sodio (en muestra total) en la planicie costera

La distribución de Ca en este ambientes domina de manera equitativa en el extracto HCl y en el residuo. Lo cual implica que a diferencia del sistema deltaico, en la planicie costera el proceso carbonático no es el único que controla la distribución de este elemento. La porción de calcio residual, probablemente esté relacionada con procesos externos a la cuenca, que están adicionando a este sistema material detrítico rico en el mismo, bien sea en forma de silicatos, aluminosilicatos o fosfatos.

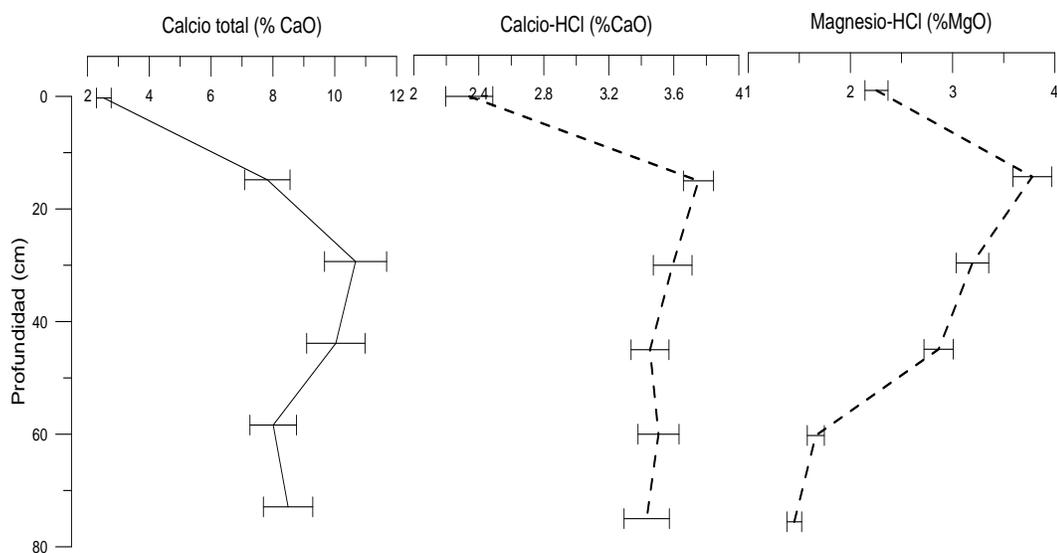


Figura 51. Perfiles geoquímicos de los elementos calcio (en muestra total y en el extracto HCl) y magnesio (en el extracto HCl) en la planicie costera



Por su parte, el comportamiento dominante del Mg en la fracción HCl (figura 51), se complementa con la ausencia de correlación lineal entre este elemento y Al. De esta manera, el proceso geoquímico que condiciona su movilidad en este ambiente es el proceso carbonático.

En función de descrito hasta este punto, se deduce que este sistema a estado controlado por un flujo relativamente continuo de sedimentos clásticos, relacionado con el aporte fluviodeltaico que deriva de la actividad sedimentaria terminal del río Mitare, y asimismo, ha sido influenciado de manera constante por el efecto de aguas marinas o subterráneas ricas en iones en solución, que bajo las condiciones climáticas que enmarcan a este sistema se propicia la evaporación del agua y la precipitación de sales en este depósito en particular.

Se plantea que lo que ha condicionado la tendencia a la disminución de concentración, de los elementos que componen a las facies clásticas y evaporíticas en la sección media del perfil (relativa al intervalo de profundidad de 15-45 cm), es la posible relación de este segmento, con un período de sedimentación de material detrítico de características composicionales carbonáticas y clásticas ricas en Ca, que conlleva a un empobrecimiento relativo de las facies que dominan en el resto del mismo.

5. Inferencias sobre geoquímica sedimentaria

Las herramientas gráficas que brinda la geoquímica sedimentaria, permiten de una manera complementaria hacer una descripción más completa de los procesos que han afectado a la cuenca y que se evidencian en este caso, en los sedimentos superficiales de un sistema. En este trabajo las mismas darán indicios de los regímenes de meteorización química y de la tectónica del ambiente de depositación y formación de sedimentos y adicionalmente, permitirán obtener aproximaciones sobre las propiedades del área fuente.

5.1. Meteorización química y actividad tectónica

Una manera cuantitativa de estimar el grado de meteorización química de sedimentos siliciclásticos, se obtiene por medio del cálculo del índice de alteración química (Pierini *et al.*, 2002) (ecuación 1).

$$\% \text{ CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Nota: Concentraciones expresadas en molaridad.



Fedo *et al.* (1995) en Roy *et al.* (2010), expresa que los valores de CIA de rocas y minerales frescos o no meteorizados se encuentran por debajo de 50%, valores de CIA menores a 60% representan niveles de meteorización química baja, entre 60 y 80% indican meteorización química moderada y mayores a 80% exhiben rasgos de meteorización química extrema.

En este apartado se hizo el cálculo del índice de alteración química no solo para las muestras de estudio, sino también para los valores reportados por otros autores para MCAF y algunas formaciones de la Cuenca Central de Falcón (tabla 12) que podrían considerarse representantes de las posibles fuentes de sedimentos.

En esta operación fueron consideradas las concentraciones de Ca, Na y K que corresponden al residuo insoluble de la extracción secuencial realizada. Por ello, los valores de CIA de los sedimentos superficiales del sistema deltaico del río Mitare y MCAF se acompañan con un asterisco (*).

Tabla 12. Resultados del cálculo del Índice de Alteración Química (CIA) para el delta del río Mitare, la planicie costera, MCAF y distintas formaciones pertenecientes a la Cuenca Central de Falcón

	% CIA*promedio	% CIA promedio
Ambiente fluviodeltaico	84 ± 2	-
Fm. Cerro Pelado (Guerra, 2002)	-	59 ± 7
Fm. Urumaco (Valencia, 2007)	-	78 ± 13
Fm. Querales (Guerrero, 2008)	-	63 ± 11
MCAF	84	-

Al considerar los resultados que se presentan en la tabla 9, se discrimina que no hay distinción considerable entre el valor de CIA* obtenido para el promedio de MCAF, el calculado para el ambiente deltaico-fluvial y el que corresponde a distintas formaciones pertenecientes a la Cuenca Central de Falcón.

Lo anterior indica que es posible, que el grado de alteración química impreso en estos sedimentos derive directamente de los rasgos que tipifican a las fuentes o en otras palabras, que la diagénesis reflejada en estos, no se asocie a procesos inherentes a la cuenca deltaica actual,

sino a ciclos primarios relacionados con las etapas y condiciones de formación de las secuencias sedimentarias terciarias de la Cuenca Central de Falcón. De esta forma se puede considerar que la misma no ha sido afectada por procesos de alteración química recientes.

En la figura 52 se presenta el gráfico A-CN-K (Cingolani *et al.*, 2003). El mismo es una representación ternaria de las variables Al_2O_3 , $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ y K_2O , que permite la realización de inferencias sobre la influencia de procesos erosivos asociados a períodos de importante actividad tectónica, y procesos químicos o diagenéticos que caracterizan al sistema luego de su sedimentación.

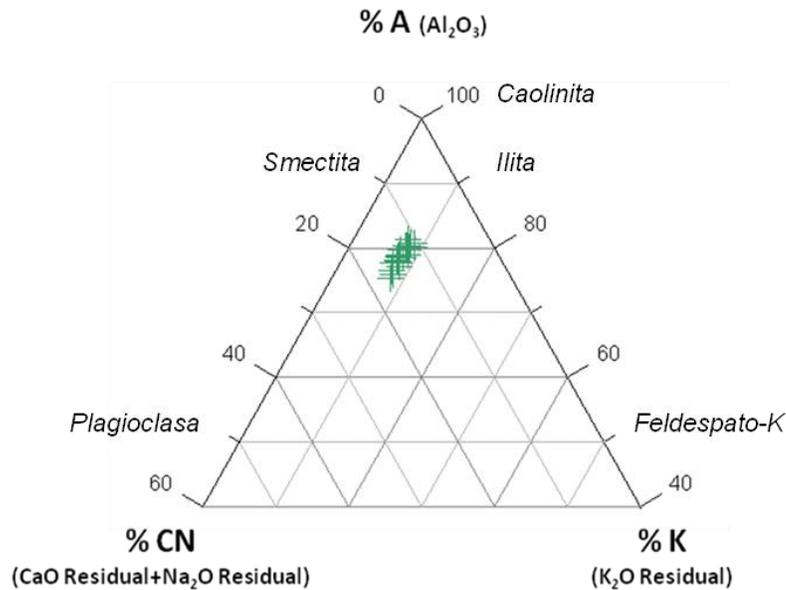


Figura 52. Gráfico A-CN-K en donde se ubican las muestras del ambiente fluviodeltaico del río Mitare

En este gráfico se observa que las muestras del ambiente deltaico-fluvial y MCAF, presentan cierto paralelismo con el eje CN-A, se agrupan en una sola población ubicada entre 75 y 85% de Al_2O_3 y hacia la izquierda del límite central del eje CN-K.

La ubicación de las muestras en el gráfico, se asocia a niveles de meteorización química de moderada a alta como lo indican Cingolani *et al.* (2003). Esto corresponde a su vez, con la zona de dominio de minerales del grupo de las smectitas según los mismos autores. De esta manera como se propuso anteriormente, el grado de alteración química que se refleja en los



rasgos geoquímicos de los sedimentos, derivan de las características y condiciones de formación del material parental.

Por otro lado, el paralelismo con el eje CN-A de las muestras de estudio que se observa en el gráfico, según Moreno *et al.* (2009) es reflejo de una influencia considerable de procesos tectónicos durante la generación y depositación de estos sedimentos. Esto último, es concordante con la actividad tectónica cuaternaria permanente, que enmarca a toda la región norte del estado Falcón.

5.2. Proveniencia

Hasta este punto de la discusión, se conoce que las diferencias entre la planicie costera y el ambiente deltaico-fluvial del río Mitare, no solo se reflejan en cambios composicionales, sino que también se asocian con el grado de los procesos de alteración química y física que han afectado a los componentes del sistema. Esto ha llevado a suponer que existen distintos puntos de partida para los sedimentos que lo constituyen.

En función del interés por conocer si era posible estimar, con las herramientas que derivan de este estudio exploratorio, la magnitud de esta diferencia, y evaluar la existencia de distinciones particulares entre el resto de los depósitos muestreados, se aplicó una modificación de la metodología matemática desarrollada por Kamber y Marx (2010), en donde a través de la suma total de las diferencias entre la concentración en muestra de cada elemento y la concentración en una referencia propuesta como la fuente de los sedimentos, se establece cuan disímiles son cada uno de los depósitos considerados respecto a esta referencia.

En este particular, se consideraron como referencias los resultados obtenidos para el ambiente fluvial, con el fin de comparar con el resto de los depósitos, y los datos de concentración reportados para MCAF, en representación de las características químicas de las secciones de grano fino de la Cuenca Central de Falcón.

La representación espacial de los resultados de este cálculo, se presenta en la figura 53. En la misma a través del establecimiento de tres intervalos (0-10, 10-20 y >20) se plantea que a medida que el ambiente o depósito sedimentario se aleje del cero o del primer intervalo, su distinción respecto a la referencia será mayor.

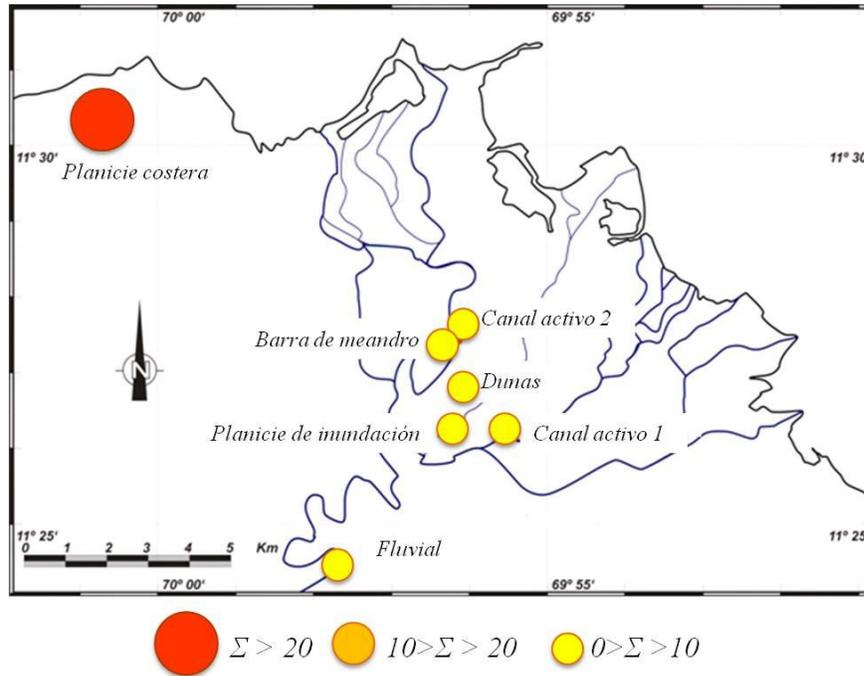


Figura 53. Mapa del delta del río Mitare. Se representan los intervalos de similitud geoquímica entre depósitos

De esta manera, se obtuvo que respecto a MCAF (tabla 13.a) los ambientes que presentan mayor similitud geoquímica son: dunas > fluvial > barra de meandro > canal activo 1 > planicie de inundación > canal activo 2.

Tabla 13. Comparación de los resultados obtenidos para las fuente MCAF y fluvial en el análisis de proveniencia

(a)		(b)	
Planicie costera	21,08	Planicie costera	24,83
Canal activo 2	7,72	Canal activo 2	3,66
Planicie de inundación	6,84	Planicie de inundación	3,46
Canal activo 1	6,52	Canal activo 1	2,77
Barra de meandro	6,11	Duna	1,99
Fluvial	4,80	Barra de meandro	1,88
Duna	4,31		
Referencia MCAF	0	Referencia fluvial	0



Por otro lado, en relación al ambiente fluvial (tabla 13.b) se obtiene una mayor similitud entre este ambiente y el resto de los depósitos, debido a que los valores calculados se aproximan más al cero que los resultados de MCAF. Esto refleja que los procesos fluviales juegan un papel protagónico y dominante, en la distribución de los atributos químicos en la zona estudiada del delta.

Finalmente la planicie costera, es el ambiente que presenta mayor disimilitud respecto a la huella geoquímica brindada tanto por MCAF como por el ambiente fluvial, ubicándose en el último intervalo establecido (>20).

Uno de los aspectos interesantes de esta interpretación es que permite dilucidar que las dunas tipo *nebkhas*, que caracterizan a este sistema, están constituidas por sedimentos finos delicadamente escogidos, que derivan del retrabajo y redistribución que se desarrolla dentro del mismo ambiente deltaico, y que corresponden con las características composicionales no solo del ambiente fluvial, sino con las fuentes de material sedimentario fino de la Cuenca Central de Falcón. De esta manera se establece que los procesos eólicos locales, también juegan un papel fundamental en la definición de los rasgos geoquímicos de la zona terminal del río Mitare.

6. Inferencias sobre geoquímica ambiental

En secciones precedentes, se pudo comprobar que los valores de concentración de los elementos estudiados presentan diferencias estadísticamente significativas en el área de la planicie costera y el resto de los depósitos. Debido a este hecho, en esta sección se seleccionaron las medianas correspondientes al grueso de los ambientes, sin considerar a la planicie costera, en lo que concierne a muestra total y a la extracción ácida realizada.

En la tabla 14, se muestran de manera comparativa los resultados de este estudio en conjunto con los reportados por Yanes (1999) para el Estudio Geoambiental del Delta del Orinoco, los obtenidos por Andara (1993) en su investigación del transporte de nutrientes en el río Mitare y los estudios geoquímicos de Mogollón *et al.* para el Lago de Valencia (1996) y la sección sureste del río Tuy (1995).



Tabla 14. Tabla comparativa entre los resultados obtenidos en este estudio y los reportados para el río Mitare, el delta del río Orinoco, el lago de Valencia y el río Tuy

Elemento	Delta del Mitare		Río Mitare (1)			Delta del Orinoco (2)	Lago de Valencia (3)	Río Tuy (4)
	Muestra total	Extracción ácida	<44µm	44-63 µm	<44-63 µm			
% Al ₂ O ₃	15,8	1,02	10,65	7,67	18,32	2,46	2,49	-
% CaO	2,0	1,88	1,39	1,31	2,7	0,16	12,75	-
% Fe ₂ O ₃	8,6	4,12	4,95	5,06	10,01	4,43	3,88	8,58
% MgO	1,4	0,70	0,59	0,58	1,17	0,50	4,97	-
% SiO ₂	65	0,21	30,19	34,38	64,57	-	-	-
% Na ₂ O	0,6	0,03	0,63	0,59	1,22	-	0,39	-
% K ₂ O	1,58	0,01	1,06	0,91	1,97	-	0,37	-
% TiO ₂	0,95	-	-	-	-	0,011	-	-
MnO mg/Kg	525	265	-	-	-	503	871	850
Ba mg/Kg	381	86	-	-	-	142	-	-
Pb mg/Kg	26	8	-	-	-	14	47	42
Zr mg/Kg	294	-	-	-	-	-	-	-
Co mg/Kg	6	15	-	-	-	-	19	48
Cr mg/Kg	129	10	-	-	-	25	21	95
Hg µg/Kg	110	-	-	-	-	-	-	-

(1) Andara (1993). Método de digestión ácida de Agemian y Chau (1976).

(2) Yanes (1999). Método de digestión ácida de la EPA 3050.

(3) Mogollón et al. (1996). Extracción en HNO₃ 1M.

(4) Mogollón et al. (1995). Extracción en HNO₃ 1M.

Respecto a las características composicionales, particularmente los elementos mayoritarios, de los sedimentos de fondo del río Mitare reportados por Andara (1993), se observa que no hay diferencias considerables con los reportados en este estudio para el grueso de los depósitos muestreados. Esto implica que desde el punto de vista de los tipos de aporte de sedimentos que afectan a la cuenca deltaica, no ha habido gran variación al menos en las últimas décadas.

Por otro lado, cuando se comparan los resultados que derivan de la extracción ácida realizada, con aquellos reportados para el Delta del río Orinoco, se observa que este último presenta concentraciones más altas para la mayoría de los atributos químicos.

Estas diferencias podrían asociarse con el hecho de que en ambos trabajos se aplicaron distintas técnicas de extracción secuencial. El método 3050 de la EPA aplicado en Yanes (1999),



es un procedimiento en cuatro etapas que incluye HNO₃ 1:1, HNO₃ concentrado, mezcla agua-peróxido de hidrógeno y HCl concentrado. Por el contrario, la metodología aplicada en este estudio considera dos etapas la primera con HCl 1M y la segunda HNO₃ concentrado.

Aquellos elementos que se presentan ligeramente enriquecidos en el sistema de estudio respecto al Delta del Orinoco, son Ca y Mg en sus fases carbonáticas respectivas. Esto puede relacionarse con tres factores. El primero de ellos la proximidad que presenta la zona muestreada del delta del Mitare con fuentes de composición litológica predominantemente carbonática (ej. Fm. San Luis), segundo, la influencia directa que tienen sobre la planicie deltaica del Mitare los procesos eólicos de redistribución de sedimentos, y tercero, el hecho de que los sedimentos transportados por los ríos de Guayana y los llanos, que se depositan continuamente sobre el delta del Orinoco, han sido sometidos a un proceso muy eficiente de meteorización química, y prácticamente, los minerales que lo constituyen son resistentes e hidrolizatos, ricos en sílice y aluminio (Yanes, 1999).

Finalmente, se cotejaron los resultados obtenidos en este trabajo con aquellos reportados, para los sedimentos de fondo, de dos de las cuencas hidrográficas del norte de Venezuela más intervenidas desde el punto de vista antrópico: Lago de Valencia y río Tuy en su sección sureste.

De lo anterior se obtuvo, que ambas cuencas se caracterizan por presentar mayores concentraciones para la mayoría de los metales pesados, respecto a las reportadas tanto en la porción extraíble de las muestras de estudio como en muestra total. La presencia de concentraciones comparativamente elevadas en muestra total, de Cr y Ba, se asocian a procesos de acumulación natural, como se ha venido indicando hasta ahora, por coprecipitación y autigénesis.

Adicionalmente, lo reportado en este estudio se encuentra por debajo de las cifras recomendadas por la normativa holandesa de suelos contaminados por metales y compuestos inorgánicos (SAG, 2010): Co 50 mg/Kg, Cr 250 mg/Kg y Pb 150 mg/Kg; y la US.EPA norma 503-40 CFR/1993 (SAG, 2010) para la disposición de lodos de perforación: Pb y Cr no deben ser superiores a 420 y 3000 mg/Kg, respectivamente.



6.1. Mercurio

Las concentraciones de mercurio determinadas en este estudio para el delta del río Mitare (tabla 15), superan a los promedios que representan la composición de otros sistemas naturales (corteza continental y pelita promedio mundial). Para MCAF se reporta una concentración de Hg de $33 \pm 11 \mu\text{g/Kg}$ y como este material representa a la composición general de las fuentes de sedimentos finos, se obtiene que el sistema estudiado está enriquecido en este elemento respecto a su material parental.

Tabla 15. Concentraciones de mercurio obtenidas para el sistema deltaico del río Mitare

Muestra	Hg ($\pm 11 \mu\text{g/Kg}$)	Muestra	Hg ($\pm 11 \mu\text{g/Kg}$)	Muestra	Hg ($\pm 11 \mu\text{g/Kg}$)
PC-1	214	CA1-11	121	D-21	111
PC-2	79	CA1-12	105	CA2-22	103
PC-3	129	CA1-13	104	CA2-23	126
PC-4	34	CA1-14	99	CA2-24	142
PC-5	80	CA1-15	147	BM-25	63
PC-6	105	PI-16	69	BM-26	79
CA1-7	68	PI-17	58	BM-27	82
CA1-8	123	PI-18	96	F-28	123
CA1-9	144	D-19	118	F-29	145
CA1-10	133	D-20	129	F-30	160
				Promedio	110

Al observar la distribución de este elemento en los distintos ambientes (figura 54), se obtiene que las concentraciones más bajas se asocian a los ambientes de barra de meandro y planicie de inundación, y las concentraciones más altas se relacionan al resto de los depósitos, particularmente al ambiente fluvial. A su vez, las muestras de la planicie costera se reparten en todo el intervalo de concentraciones de mercurio que caracterizan al sistema, incluyendo el máximo, correspondiente a su muestra superficial, y el mínimo de toda la distribución (figura 55).

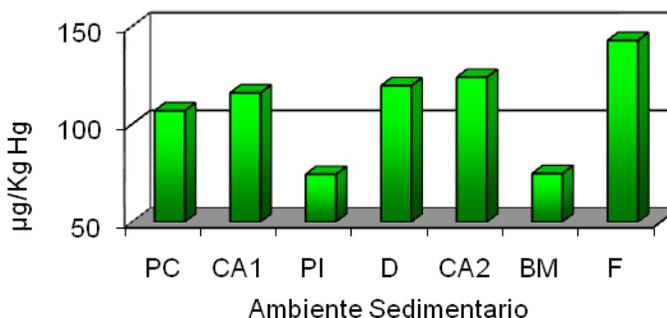


Figura 54. Distribución de mercurio por ambiente (PC: planicie costera; CA1: canal activo 1; PI: planicie de inundación; D: duna; CA2: canal activo 2; BM: barra de meandro; F: fluvial)

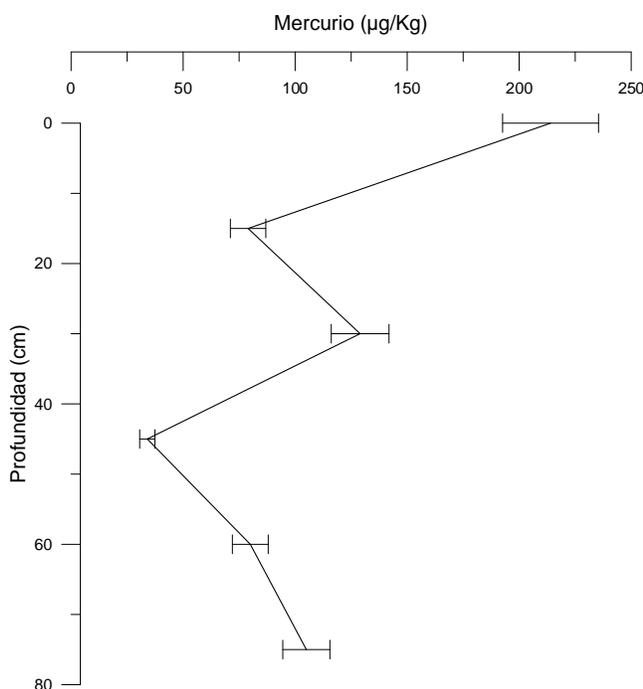


Figura 55. Perfil de distribución de mercurio en la planicie costera

La concentración de Hg promedio obtenida en este trabajo (110 µg/Kg), se cotejó con las reportadas por Moreno (2009) y De Freitas (2008) para los sedimentos de fondo del Golfete de Cuare y su zona próxima costera (44 y 100 µg/Kg respectivamente) y las obtenidas por Romero (2011) en los suelos de manglar de la zona sur de punta Caimán (mínimo 19 y máximo 51 µg/Kg) y la laguna de Boca de Caño al noreste de la Península de Paraguaná (mínimo 1 y máximo 9 µg/Kg).

Estos datos indican que la zona costera del estado Falcón presenta una amplia variabilidad desde el punto de vista de la distribución de Hg. Aquellos ambientes que se ubican hacia el sur de



la Península de Paraguaná, incluyendo el delta del río Mitare, se encuentran enriquecidos en este elemento. Lo anterior podría ser consecuencia de la redistribución de mercurio de origen atmosférico, que deriva de aerosoles asociados a la actividad industrial-petroquímica, por efecto de los agentes eólicos que dominan en la región, en dirección oeste-suroeste (Quintero y Terejova, 2008).

7. Integración de resultados

Este trabajo, como una primera aproximación a la definición de las características físicas y geoquímicas de la fracción de grano fino de los sedimentos superficiales del delta del río Mitare, permitió a partir de la conjunción de tales rasgos naturales establecer diferencias sedimentológicas, composicionales y genéticas entre la planicie costera, como representante del área de influencia del delta y el sistema fluviodeltaico propiamente dicho.

Se logró evidenciar que el proceso clástico domina y condiciona la abundancia, distribución y migración de la mayor parte de los atributos químicos estudiados. Sin embargo, los procesos carbonáticos y evaporíticos también juegan un papel importante en las distinciones particulares dentro del sistema, afectando la magnitud de parámetros físicos como la pérdida al rojo.

La hidrodinámica de agentes fluviales y eólicos, ha controlado no solo los rasgos sedimentológicos del delta sino también sus rasgos geoquímicos. Estos agentes a pesar de ser selectivos en cuanto a la distribución y generación de asociaciones de facies, también han influido en la repartición casi homogénea de las características composicionales en todo el sistema fluviodeltaico, permitiendo de esta manera, que los rasgos geoquímicos de los sedimentos del delta del río Mitare, sean un reflejo directo de las características geoquímicas de las secciones de grano fino de la Cuenca Central de Falcón.

Finalmente, se establece que el delta del río Mitare es un ambiente prístino desde el punto de vista de la distribución de la mayoría de los metales estudiados. Pero que presenta ciertas anomalías de mercurio que son congruentes con lo reportado en sistemas aledaños del estado Falcón, que conllevan a suponer que la región está siendo influenciada por actividades antrópicas de carácter industrial-petroquímico.



CONCLUSIONES

Del conjunto de resultados obtenidos en este trabajo se extraen las siguientes conclusiones:

1. Las facies granulométricas determinadas para el área muestreada del delta del río Mitare se caracterizan por un escogimiento pobre a muy pobre, fuerte asimetría hacia las fracciones finas y una distribución mesocúrtica a platicúrtica para algunas muestras.
2. La abundancia promedio de los elementos químicos estudiados en la fracción menor a 62,5 μm de los sedimentos del delta del río Mitare son las siguientes: $15,1 \pm 0,7\%$ Al_2O_3 ; $3,2 \pm 0,8\%$ CaO ; $8,0 \pm 0,4\%$ Fe_2O_3 ; $2,2 \pm 0,7\%$ MgO ; $60 \pm 3\%$ SiO_2 ; $1,2 \pm 0,4\%$ Na_2O ; $1,43 \pm 0,12\%$ K_2O ; $0,90 \pm 0,05\%$ TiO_2 ; 384 ± 21 mg/Kg MnO; 363 ± 19 mg/Kg Ba; 24 ± 1 mg/Kg Pb; 493 ± 122 mg/Kg Zr; $6,3 \pm 0,7$ mg/Kg Co; 122 ± 8 mg/Kg Cr y 110 ± 11 $\mu\text{g/Kg}$ Hg.
3. Los sedimentos del delta del río Mitare están constituidos por las siguientes fases minerales: cuarzo, ilita, caolinita, albita, calcita, halita y yeso.
4. La distribución y asociación de distintas facies granulométricas en cada ambiente sedimentario, están condicionadas por cambios puntuales en el régimen hidráulico del río Mitare en aquellos ambientes de dominio fluvial, para la influencia de agentes marinos en el caso de la planicie costera y los patrones eólicos locales que modifican los rasgos morfológicos de la llanura fluviodeltaica.
5. A través de la aplicación de la herramienta análisis de factores y de la interpretación de relaciones binarias, para el ambiente fluviodeltaico se determinación tres asociaciones de elementos relacionadas a los siguientes procesos: clástico-evaporítico, oxi-hidróxidos de Fe y carbonático.



6. La planicie costera presenta diferencias geoquímicas respecto al resto de los ambientes, condicionadas principalmente por la presencia de las mayores concentraciones de los elementos Ca, Mg y Na. Esto se refleja en parámetros como la pérdida al rojo (PAR).
7. La distinción geoquímica de la planicie costera está controlada por el aporte de sedimentos carbonáticos y clásticos ricos en Ca, que dominan hacia la sección media del perfil estudiado (entre 15 y 45 cm de profundidad) y que condicionan el empobrecimiento relativo de las facies clásticas y evaporíticas que caracterizan al sistema.
8. Dados los índices de alteración química (CIA) para el sistema de estudio y las secciones de grano fino de la Cuenca Central de Falcón, se obtiene que el grado de meteorización química deriva directamente de las características y condiciones de formación del material parental de los mismos.
9. Los sedimentos finos de la Cuenca Central de Falcón, son la fuente principal del material sedimentario que caracteriza al delta del río Mitare y los procesos fluviales son los principales encargados de redistribuir su huella geoquímica.
10. Las dunas tipo *nebkhas* que caracterizan a la llanura deltaica del río Mitare presentan rasgos composicionales que corresponden con los encontrados para el resto de los ambientes fluviodeltaicos. Este resultado corrobora el hecho de que tales montículos corresponden a la sedimentación local.
11. La mayoría de los metales estudiados en la fracción menor a 62,5 μm , se encuentran por debajo de los valores promedio que presentan los sedimentos de otras cuencas fluviales del país poco muy contaminadas, y de los valores recomendados por algunos organismos internacionales para suelos. No obstante, la distribución de concentraciones elevadas de Hg a lo ancho de la cuenca conlleva a inferir que el sistema está siendo influenciado en cierta medida, por las actividades industriales-petroquímicas que se desarrollan en la zona norte del estado Falcón.



RECOMENDACIONES

A continuación se presenta una serie de recomendaciones que pueden complementar la presente investigación y reforzar los resultados obtenidos para las características evaluadas:

1. Realizar la caracterización geoquímica completa de todas las fracciones granulométricas obtenidas en este estudio, que representen con un mayor porcentaje los procesos que conllevan al modelaje global del sistema deltaico del río Mitare.
2. Efectuar un muestreo sistemático de sedimentos en distintos puntos del delta y evaluar sus características geoquímicas a través de la aplicación de la metodología experimental desarrollada en este trabajo, y así poder establecer valores de línea base ambiental que representen a todo el sistema.
3. Llevar a cabo estudios de datación radiométrica a perfiles de sedimentos deltaicos y costeros, con el fin de establecer la tasa de sedimentación en el delta, evaluar las migraciones de la línea de costa en períodos recientes y hacer inferencias sobre cambios en el tiempo del sistema deltaico.
4. Evaluar cuales son las especies químicas en las que se presenta en Hg en los sedimentos del delta del río Mitare.
5. Emplear un patrón estándar certificado para el proceso de extracción secuencial, que permita el cálculo de la exactitud del método empleado en este trabajo.
6. Hacer un estudio petrográfico de la fracción arena de los sedimentos del sistema, que a través de la determinación de rasgos morfológicos, texturales y composicionales en los minerales pueda conducir a una mejor definición del material parental estos sedimentos.
7. Desarrollar estudios de carácter geoquímico en los sedimentos suspendidos y de fondo del Golfete de Coro.



BIBLIOGRAFÍA

- Allen, P. (2001). Principles of physical sedimentology. Blackburn Press. Londres. 272 p.
- Andara, A. (1993). Transporte de nutrientes por los ríos Mitare, Tocuyo, Yaracuy, Unare, Neverí y Manzanares. Tesis de Maestría, Postgrado en Geoquímica, UCV. Caracas. 129 p.
- Arellano, R. y Umérez, J. (2004). Interpretación estructural y restauración de dos secciones del flanco norte de la sierra de San Luis ubicadas entre el río Mitare y la carretera Coro-Cruz de Taratara, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Escuela de geología, minas y geofísica, Caracas. 115 p.
- Audemard, F. (1995). La Cuenca Terciaria de Falcón, Venezuela noroccidental: síntesis estratigráfica, génesis e inversión tectónica. FUNVISIS. Caracas. 18 p.
- Audemard, F. (1997). Tectónica activa de la región septentrional del la Cuenca Invertida de Falcón, Venezuela Occidental. Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano. Tomo I.
- Audemard, F. (1999). Neotectonic and paleoseismicity studies on the Urumaco Fault, northern Falcón Basin, Northwestern Venezuela. Tectonophysics, vol. 308, p. 23-35.
- Betancourth, E. (1983). Geología y estratigrafía de una región al oeste del río Mitare, Falcón noroccidental. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Escuela de geología, minas y geofísica, Caracas. 257 p.
- Bird, E. (2003). Coastal Geomorphology: An Introduction. Editorial Wiley. EEUU. 322 p.
- Boggs, S. (1995). Principles of Sedimentology and Stratigraphy. 2da. Edición. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, EEUU. 774 p.
- Brown, K.J. y Pasternack, G.B. (2006). Natural and anthropogenic geochemical signatures of floodplain and deltaic sedimentary strata, Sacramento-San Joaquin Delta, California, USA. ENVIRONMENTAL POLLUTION, vol. 141, p. 295-309.
- Brownlow, A., 1996. Geochemistry. Segunda edición. Prentice Hall. New Jersey. 580 p.



Castellan, G. (1998). *Fisicoquímica*. Segunda edición. Addison Wesley Longman. México. 452 p.

Castillo, L. (2009). Estudio de la homogeneidad química de las variables Si, Ca, Fe, K, Ti, Ba, Ce, Pb, Ni, Sc, Sn, Sr, Sb, La, Y y Mo, en la muestra compuesta de arcillita de Falcón (MCAF), candidata a material de referencia. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 110 p.

Castro, G. (2002). Quimiestratigrafía de la sección superior de la Formación Cerro Pelado (Mioceno), Cuenca de Falcón, Venezuela. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, UCV. 107 p.

Chacartegui, F., Delgado, M. y Cortiula, B. (1997). Modelos sedimentológico de un sistema deltaico de flujo intermitente en clima tropical húmedo: Delta de la Quebrada San Ignacio, estado Miranda, Venezuela. Memorias del 1er. Congreso Latinoamericano de Sedimentología. Tomo 1, p. 193-200.

Cingolani, C.A., Manassero, M. y Abre, P. (2003). Composition, provenance, and tectonic setting of Ordovician siliciclastic rocks in the San Rafael block: Southern extensión of the Precordillera cristal fragment, Argentina. *Journal of South Earth Sciences*, vol. 16, p. 91-106.

Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, COPLANARH. (1975). Inventario nacional de tierras: estudio geomorfológico de las regiones Costa Noroccidental, Centro Occidental y Central. Caracas, vol. 1 y vol. 2, 216 p.

Condie, K.C. (1993). Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, vol.104, p. 1-37.

Creole Petroleum Corporation y Exxon Production Research Company (1976). *Manual de Facies Clásticas*. Editado por D.C. Swanson – EPRCo. EEUU.

De Abreu, D. (2005). Estudio quimioestratigráfico de las lutitas de la Formación Paraíso, quebrada Paraíso, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 103 p.



De Freitas, F. (2008). Distribución de Al, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Zn y Hg en los sedimentos de fondo del Golfete de Cuare, Chichiriviche, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 112 p.

Díaz de Gamero, M. (1977). Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno inferior del centro de la Cuenca de Falcón, Venezuela. Geos 22-03-60, p.3-5.

Escorcía, L. (2008). Preparación y caracterización preliminar de una muestra compuesta, representativa de una cuenca de mangen activo (Cuenca de Falcón, Venezuela). Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 77 p.

Fragiel, S. (2006). Estudio quimiestratigráfico de los litotipos de grano fino de la Formación Socorro, Cuenca Central de Falcón. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 86 p.

Galloway, W. y Hobday, D. (1983). Terrigenous Clastic Depositional Systems. Springer-Verlag. Berlín, Alemania. 489 p.

Gámez, C. (2009). Estudio de la homogeneidad química de las variables Al, Mg, Mn, Na, P, Co, Cu, Cr, V, Zn y Zr, en la muestra compuesta de arcillita de Falcón (MCAF), candidata a material de referencia. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 120 p.

Gao, S., Luo, T.-C., Zhang, B.-R., Zhang, H.-F., Han, Y.-W., Zhao, Z.-D. and Hu, Y.-K. (1998). Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.62, núm. 1, p. 959-975.

GERM (2010). Geochemical Earth Reference Model. Página web disponible en línea en: <http://earthref.org/GERM/> [Consulta Junio 2010-Febrero 2011].

Gonzalez de Juana, C., J.M. Iturralde y X. Picard. (1980). Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. 3era. Edición. Editorial FONVIVES. Tomo I y II. Caracas. 1031 p.



- Graf, C. (1968). Quaternary geology of northwest-Venezuela coastal plains of Falcón and Zulia; Ph.D. Thesis, Rice University. 189 p.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A. & Korotev, R.I. (1984). The “North American Shale Composite”: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol. 48, p. 2469-2482.
- Guerra, E. (2002). Quimiestratigrafía de la sección inferior de la Formación Cerro Pelado (Mioceno), Cuenca de Falcón, Venezuela. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 165 p.
- Guerrero, R. (2008). Estudio quimiestratigráfico de la sección inferior de la Formación Querales (Mioceno), Cuenca Central de Falcón, Venezuela. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 149 p.
- Jacome, J. (1986). Ecosistemas marinos de Venezuela. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos*, vol.45, p.7-27.
- Kamber, B.S. y Marx, S.K. (2010). Trace-element systematics of sediments in the Murray-Darling Basin, Australia: Sediment provenance and paleoclimate implications of fine scale chemical heterogeneity. *Applied Geochemistry*, vol. 25, p. 1221-1237.
- Klein, C. y Hurlbut Jr., C. (1998). Manual de mineralogía, Tomo II. Cuarta Edición. REVERTÉ, S.A. Madrid. 679 p.
- Ley de zonas costeras (2000). Decreto con Fuerza de Ley de Zonas Costeras, Venezuela. 16 p.
- Liberatore, P.A. (1993). Determination of major elements in geological samples by ICP-AES. Varian Australia Pty Ltd. ICP-AES Instruments at work: 1-4.
- Liberatore, P.A. (1994). Determination of trace elements in geological samples by ICP-AES. Varian Australia Pty Ltd. ICP-AES Instruments at work: 1-9.
- Macellari, C.E. (1995). Cenozoic Sedimentation and Tectonics of the Southwestern Caribbean Pull-Apart Basin, Venezuela and Colombia. *A.A.P.G. Memoria* 62, p.757-780.



- Martínez, M. (2007). Introducción a la quimioestratigrafía y a la geoquímica de yacimientos. Cap. I, II, y III. [Guías de estudio]. Caracas. Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV, 32 p.
- Mason, B., Moore, C. (1982). Principles of Geochemistry. Cuarta edición. Jhon Willey & Sons. 350 p.
- Miller, J.N. y Miller, J.C. (2002). Estadística y quimiometría para química analítica. Cuarta Edición. PEARSON EDUCACIÓN, S.A. Madrid. 296 p.
- Mogollón, J.L., Ramirez, A.J. y Bifano, C. (1995). Influence of sampling strategy, lithology, vegetation and rainfall on metal background concentrations in sediment of the tropical Tuy River basin, Venezuela. *Chemical Geology*, vol. 121, p. 263-272.
- Mogollón, J.L., Bifano, C. y Davies, B.E. (1996). Geochemistry and anthropogenic inputs of metals in a tropical lake in Venezuela. *Applied Geochemistry*, vol. 11, p. 605-616.
- Montero, J. (2004). Determinación, caracterización y correlación de quimiofacies de la Formación Cerro Pelado (Mioceno), Cuenca Central de Falcón, estado Falcón, Venezuela. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 90 p.
- Moreno, N., Gelvez, J. y Mora, A. (2009). Procedencia de sedimentos durante el Mioceno en el Borde Este de la Cuenca Llanos Orientales, Colombia. X Simposium Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas, Cartagena Colombia, 2009. 10 p.
- Moreno, R. (2009). Caracterización geoquímica de los sedimentos de fondo de la zona este del Golfete de Cuare y su zona próxima costera, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 73 p.
- Noya, J. (2001). Estudio de proveniencia y ambiente de sedimentación de la Formación Pedregoso, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 75 p.



Petróleos de Venezuela, PDVSA (1992). Imagen Atlas de Venezuela una Visión Espacial. Editorial Arte. Caracas. 271 p.

Perini, C., Mizusaki, A.M., Scherer, C. y Alves, D. (2002). Integrated stratigraphic and geochemical study of the Santa Maria and Caturrita formations (Triassic of the Parana´ Basin), southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 15, p. 669–681.

Pramod, S. y Rajamani (2001). REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: Implication to source area weathering and sedimentary processes. *Geochimica et cosmochimica acta*, Vol. 65, No. 18 p.

Pueyo, M., Mateu, J., Rigol, A., Vidal, M., López-Sánchez, J.F. y Rauret, G. (2008). Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils. *Environmental Pollution*, vol. 152, núm. 2, p. 330-341.

Quintero, A. y Terejova, G. (2008). Influencia de las corrientes marinas sobre el transporte de sedimentos en la boca del Golfo de Coro, Venezuela. *Boletín Instituto Oceanográfico de Venezuela*. Cumaná. Vol. 47, núm. 1, p. 77-87.

Rabassó, J. (1974). El Delta del río Mitare, noroeste de Venezuela. *Boletín Informativo de la Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo*, vol. 17, núm. 7, 8 y 9, p. 131-140.

Rayner-Canham, G. (2000). *Química inorgánica descriptiva*. Segunda edición. Prentice Hall. México. 595 p.

Rivas D. y Rojas T. (1997). Modelo sedimentológico, análisis de facies y estratigrafía del delta del río Mitare, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Escuela de geología, minas y geofísica, Caracas. 204 p.

Rodríguez-Meza, G.D., Shumilin, E., Sapozhnikov, D., Méndez-Rodríguez, L. y Acosta-Vargas, B. (2009). Evaluación geoquímica de elementos mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos de Bahía Concenpción, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 1, núm. 1, p. 57-72.



Rojas, H. (2001). Quimioestratigrafía de la Formación Pedregoso, estado Falcón: variaciones redox y patrones cíclicos. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 67 p.

Romero, M. (2007) Quimioestratigrafía y geoquímica sedimentaria en una sección de la Formación Paraíso, Quebrada Puruche, Cuenca de Falcón, Venezuela. Trabajo de Grado de Maestría en Ciencias Geológicas, Facultad de Ingeniería, UCV. 166 p.

Romero, G. (2011). Caracterización geoquímica de los suelos asociados a distintas especies de mangle de la zona oeste del Golfete de Coro y noreste de la Península de Paraguaná, estado Falcón. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela.

Roy, P.D., Caballero, M., Lozano, R., Ortega, B., Lozano, S., Israde, I. y Morton, O. (2010). Geochemical record of Late Quaternary paleoclimate from lacustrine sediments of paleo-lake San Felipe, western Sonora Desert, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 29, p. 586-596.

Shumilin, E., Carriquiry, J., Camacho-Ibar, V., Sapozhnikov, D., Kalmykov, S., Sánchez, A., Aguíñiga-García, S., y Sapozhnikov, Y. (2002). Spatial and vertical distributions of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California. *Marine chemistry*, vol. 79, p.113-131.

Suárez, C., Lara, S., González, L.F., Gil, R. y González, O. (1999). Estudio sedimentológico de las nebkhas de Mitare, Costa Norcentral del estado Falcón, Venezuela. *Bol. Soc. Venezolana de Geól.*, vol. 24, núm. 2, p. 22-32.

Singer, J.M. (1997). WEC Evaluación de pozos. Schlumberger Oilfield Services. Cap. 1. 46 p.

Taylor y McLennan (1995). The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews in Geophysics*, vol. 33, p. 241-265.



Thorner, M. (1992). The chemical mobility and transport of elements in the weathering environment (chapt. 1.5), en Butt, C. y Zeegers, H. (Eds.). *Geochemistry in tropical and subtropical terrains*. Elsevier, p. 79-96.

Tosiani, T., Yanes, C. y Ramirez, A. (2005). Sedimentos recientes frente al delta del Orinoco, Venezuela. p. 38-61. En: Gómez, M.G., Capaldo, M., Yanes, C. y Martín, A. (Eds.) (2005). *Frente Atlántico Venezolano. Investigaciones geoambientales: Ciencias de la Tierra. Tomo II*. Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA). Fondo editorial Fundambiente. Caracas. 159 p.

Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of the Elements in some major units of the Earth's crust. *Geological Society of America, Boletín* 72, p. 175-192.

Valencia, L. (2007). Estudio quimioestratigráfico de la sección inferior de la Formación Urumaco (Mioceno tardío) Cuenca Central de Falcón, Venezuela. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 164 p.

Villaroel, V. (2007). Estudio quimioestratigráfico de la sección superior de la Formación Urumaco (Mioceno tardío), Cuenca Central de Falcón, Venezuela. Trabajo especial de grado. Facultad de Ciencias, Departamento de Geoquímica. Universidad Central de Venezuela. 105 p.

Vittorio, P., Dinelli, E., Lucchi, M. y Vaiani, S. (2006). Paleoenvironmental control on sediment composition and provenance in the late Quaternary deltaic successions: a case study from the Po delta area (Northern Italy). *Geological Journal*, vol. 41, p. 591–612.

Wedepohl, K.H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* vol.59, núm. 1, p. 217-239.

Yanes, C. (1999). Estudio geoambiental del delta del río Orinoco: Aspectos geoquímicos. Informe técnico. Caracas PDVSA, VENEZUELA. 168 p.

Yariv, S. y Cross, H. (1979). *Geochemistry of Colloid Systems*. Springer-Verlag. Berling. 450 p.

**APÉNDICE I****Condiciones de experimentación**

Tabla 16. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEO-IAP (HORIBA Jobin Yvon, modelo Ultima 2)

Componente	Características/Definición
Gas plasmógeno	Argón
Flujo del gas de plasma	12 L/min
Nebulizador	Concéntrico
Flujo en el nebulizador	0,8 L/min
Flujo del gas de arrastre (sheet gas)	0,2 L/min
Potencial generador	1100 W
Cámara	Ciclónica
Flujo de muestra	1,0 mL/min
Rango espectral	160-800 nm
Velocidad de la bomba	20 RPM
Montaje óptico	Czerny Turner
Distancia focal	50 cm

Tabla 17. Condiciones de trabajo del equipo utilizado en el análisis de EEA- llama (modelo 200, marca *Perkin Elmer*)

Componente	Característica/Definición
Gas oxidante	Aire
Flujo de aire	10 L/min
Gas combustible	Acetileno
Flujo de acetileno	2,5 L/min
Nebulizador	Concéntrico

Tabla 18. Longitudes de onda seleccionadas para el análisis de las muestras por EEO-IAP

Elemento	Longitud de onda (nm)	Elemento	Longitud de onda (nm)
Al	396,152	Ba	455,403
Ca	422,673	Zr	339,198
Fe	273,955	Cr	283,563
Mg	279,553	Co	228,616
Si	251,611	Pb	261,418
Ti	336,121		
Mn	259,373		

Tabla 19. Longitudes de onda seleccionadas para el análisis de las muestras por EEA-llama

Elemento	Longitud de onda (nm)
Na	589,00
K	766,49



Tabla 20. Condiciones del equipo utilizado en el análisis de mercurio total (TMA~80)

Componente	Característica/definición
Fuente de luz	Lámpara de Hg de baja presión
Detector	Fotodetector UV de silicón
Límite de detección	0.005 ng Hg
Rango de trabajo	Rango bajo: 0–20 ng Hg Rango alto: 20–1,000 ng Hg
Gas de arrastre	Oxígeno
Reproducibilidad	<1,5%

Tabla 21. Límite de determinación (en mg/L) para los métodos HCl, HNO₃ y fusión con EEA-ICP y EEA-llama (Na y K)

Elemento	Método fusión	Método HCl	Método HNO ₃
	L.D. (mg/L)	L.D. (mg/L)	L.D. (mg/L)
Al	5,82	6,80	1,20
Ba	0,02	0,02	0,04
Ca	14,36	24,90	1,22
Co	0,01	0,003	0,02
Cr	0,03	0,02	0,086
Fe	13,14	49,20	65,70
Mg	13,58	0,40	7,62
Mn	0,16	0,93	0,78
Pb	0,98	0,17	0,09
Si	2,28	1,72	2,93
Ti	0,26	-	-
Zr	14,2	-	-
Na	1,07	2,30	0,89
K	0,15	0,50	0,15

APENDICE II

Exactitud

Para evaluar la exactitud del método fusión aplicado para las determinaciones a través de EEO-IAP, se empleó un conjunto de patrones estándar certificados y la muestra compuesta de arcillita de Falcón (MCAF), candidata a material de referencia, con la finalidad de calcular factores de corrección para los errores asociados al cotejo de las concentraciones elementales obtenidas para MCAF en este trabajo y las reportadas por Castillo (2009) y Gámez (2009).

Tabla 22. Patrones estándar certificados utilizados para el cálculo de los factores de corrección para MCAF

Siglas	Descripción
DR-N	Diorite DR-N 1968, A.N.R.T, Geostandars, France
MA-N	Granite MA-N. Centre de recherches petrographiques et geochimiques, France
BE-N	Basalte BE-N, A.N.R.T, Geostandars, France

Tabla 23. Factores de corrección para los resultados obtenidos por el método de fusión para MCAF

Patrón certificado	Al	Ba	Ca	Fe	Mg	Mn	Pb	Si	Ti	Na	K
DR-N		1,19	1,05	1,15		0,67	1,01		1,21	-	-
BE-N	1,14	-	-	-	1,18	-	-	1,10	-	-	-
MCAF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,20	0,99

Una vez corregidos los resultados de MCAF, se relacionaron con los valores de concentración reportados por Castillo y Gámez (2009) y se obtuvieron los factores de corrección para las muestras de estudio que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 24. Factores de corrección para fusión alcalina

Elemento	F.C.	Elemento	F.C.
Al	2,00	Mn	0,74
Ca	2,08	Ti	1,83
Fe	1,31	Ba	1,68
Mg	1,62	Pb	75,29
Si	1,30	Zr	8,58
Na	1,20	Co	17,71
K	0,99	Cr	2,53



APÉNDICE III

Fórmulas empleadas

1. Cálculo de parámetros de madurez textural

Media (x)

$$x = \frac{\sum f \cdot m}{100}$$

Asimetría (SK_1)

$$SK_1 = \frac{\sum f \cdot (m - x)^3}{100 \cdot S_o^3}$$

Escogimiento (S_o)

$$S_o = \sqrt{\frac{\sum f \cdot (m - x)^2}{100}}$$

Curtosis o agudeza (K_G)

$$K_G = \frac{\sum f \cdot (m - x)^4}{100 \cdot S_o^4}$$

(f) porcentaje en peso; (m) punto medio de cada intervalo de clase.

2. Humedad y pérdida al rojo

Humedad

Volátiles libres de humedad

Pérdida al rojo

$$\%H = \frac{M_o - M_f}{M_o} \cdot 100$$

$$\%V.L.H. = \frac{M_{o(lh)} - M_f}{M_o} \cdot 100$$

$$\%PR = \%H + \%V.L.H$$

(M_o) masa inicial; (M_f) masa final; (lh) libre de humedad.

APÉNDICE IV

Resultados de la prueba de hipótesis

Tabla 25. Resultados de la prueba de hipótesis: planicie costera-resto de los ambientes (n1=6, n2=24 y 28 grados de libertad).

Ho: la planicie costera y el resto de los ambientes son geoquímicamente iguales

	<i>t</i> calculado	<i>t</i> teórico ($\alpha/2=0,025$)	Ho: $\mu_1=\mu_2$
Al	-3,21	2,05	Se rechaza
Ca	10,66	2,05	Se rechaza
Fe	-5,50	2,05	Se rechaza
Mg	6,41	2,05	Se rechaza
Si	-18,56	2,05	Se rechaza
Na	16,83	2,05	Se rechaza
K	-9,55	2,05	Se rechaza
Mn	-5,42	2,05	Se rechaza
Ti	-9,08	2,05	Se rechaza
Ba	-6,66	2,05	Se rechaza
Pb	-5,19	2,05	Se rechaza
Zr	-1,75	2,05	Se rechaza
Co	-2,10	2,05	Se rechaza
Cr	-4,33	2,05	Se rechaza
Hg	-0,10	2,05	Se acepta

Tabla 26. Resultados de la prueba de hipótesis: tres punto de muestreo del canal activo 1 (n1=9, n2=3 y 10 grados de libertad).

Ho: los tres puntos son geoquímicamente iguales

	<i>t</i> calculado			<i>t</i> teórico ($\alpha/2 =0,025$)	Ho: $\mu_1=\mu_2$
	Punto 1	Punto 2	Punto 3		
Al	-0,01	-0,82	0,84	2,23	Se acepta
Ca	-0,75	0,53	0,27	2,23	Se acepta
Fe	-0,82	0,12	0,73	2,23	Se acepta
Mg	-0,33	-0,52	0,86	2,23	Se acepta
Si	0,26	0,37	-0,57	2,23	Se acepta
Na	-0,16	-0,67	0,81	2,23	Se acepta
K	0,05	-0,81	0,74	2,23	Se acepta
Mn	-0,59	0,27	0,38	2,23	Se acepta
Ti	-0,60	-0,27	0,87	2,23	Se acepta
Ba	-0,56	-0,17	0,78	2,23	Se acepta
Pb	-0,54	-0,10	0,71	2,23	Se acepta
Zr	-0,43	0,22	0,32	2,23	Se acepta
Co	-0,53	0,12	0,50	2,23	Se acepta
Cr	-0,63	0,19	0,48	2,23	Se acepta
Hg	0,10	-0,11	-0,01	2,23	Se acepta



APÉNDICE V

Determinaciones químicas

Tabla 27. Concentraciones elementales para las muestras analizadas por el método de fusión alcalina (muestra total). Para cada elemento se indica un error relativo, obtenido a partir de las réplicas para un nivel de confianza de 95 %

	Al ₂ O ₃ ±0,5 %	CaO ±0,2 %	Fe ₂ O ₃ ±0,5 %	MgO ±0,1 %	SiO ₂ ±1,6 %	Na ₂ O ±0,02 %	K ₂ O ±0,05 %	MnO ±0,002 %	TiO ₂ ±0,08 %	LOI ±2 %	Σ Óxidos	Ba ±12 mg/Kg	Pb ±1,8 mg/Kg	Zr ±35 mg/Kg	Co ±0,8 mg/Kg	Cr ±13 mg/Kg	Hg ±11 µg/Kg
PC-1	18,4	2,5	7,2	4,1	40,1	4,64	0,94	0,047	0,75	26	104	338	22,1	117	3,8	114	214
PC-2	10,1	7,8	4,6	11,9	33,5	3,73	0,55	0,036	0,48	36	109	n.d.	14,0	124	6,3	68	79
PC-3	11,8	10,7	6,0	6,9	39,3	2,00	0,97	0,034	0,64	28	106	229	16,2	321	4,1	96	129
PC-4	11,5	10,0	5,8	5,6	41,9	3,47	0,82	0,031	0,60	29	109	n.d.	17,9	314	4,1	82	34
PC-5	13,5	8,0	6,3	2,9	40,7	3,25	0,63	0,037	0,66	26	102	224	18,3	313	3,5	97	80
PC-6	12,1	8,5	7,0	2,6	43,8	3,89	0,81	0,038	0,63	28	108	226	20,2	354	6,9	88	105
CA1-7	14,6	2,2	8,6	1,3	67,3	0,60	1,34	0,046	0,96	9	106	457	23,8	1710	8,3	189	68
CA1-8	15,0	2,1	9,1	1,3	62,9	0,61	1,46	0,052	0,94	9	103	371	26,1	811	6,8	131	123
CA1-9	15,0	1,9	9,5	1,3	64,6	0,61	1,58	0,053	0,91	10	105	432	30,1	1198	5,2	171	144
CA1-10	16,8	1,8	8,4	1,4	62,7	0,64	1,65	0,048	0,92	10	105	407	25,9	941	5,1	131	133
CA1-11	16,4	1,6	8,1	1,3	66,6	0,61	1,64	0,047	0,91	10	108	382	23,3	921	5,3	130	121
CA1-12	15,8	1,7	7,7	1,3	64,1	0,63	1,64	0,043	0,92	10	104	388	24,8	978	6,2	128	105
CA1-13	13,6	1,8	7,7	1,2	68,5	0,59	1,28	0,044	0,84	9	104	354	21,3	1054	5,2	143	104
CA1-14	13,1	1,8	7,4	1,1	73,0	0,56	1,26	0,046	0,88	9	108	317	20,7	881	4,4	97	99
CA1-15	13,6	1,9	7,3	1,1	65,5	0,58	1,38	0,047	0,85	10	102	326	22,5	774	5,2	110	147
PI-16	15,7	2,2	6,9	1,3	65,7	0,62	1,53	0,043	0,89	10	104	312	19,1	231	6,6	87	69
PI-17	14,1	2,0	7,8	1,3	65,8	0,62	1,53	0,047	0,93	10	104	337	23,7	319	5,0	112	58
PI-18	14,1	2,3	9,0	1,4	68,7	0,60	1,42	0,055	1,16	10	108	372	26,3	478	5,8	131	96
D-19	18,2	2,0	8,3	1,8	58,8	0,97	1,64	0,061	1,07	16	109	428	27,9	233	6,6	136	118
D-20	17,1	1,9	8,8	1,7	62,8	0,62	1,63	0,057	1,04	16	111	421	27,7	261	6,3	140	129
D-21	16,2	1,8	8,0	1,5	64,4	0,50	1,67	0,056	1,08	16	111	397	25,6	280	5,8	123	111
CA2-22	19,2	1,9	8,6	1,5	69,7	0,64	2,04	0,058	1,06	12	116	430	25,8	198	11,1	120	103
CA2-23	19,6	2,2	11,9	1,5	64,8	0,70	1,93	0,064	1,02	12	115	434	35,3	181	n.d.	145	126
CA2-24	15,8	2,6	8,6	1,5	64,5	0,74	1,71	0,053	0,99	11	108	393	26,0	166	6,9	118	142
BM-25	15,1	2,1	8,7	1,6	65,8	0,64	1,58	0,056	0,84	10	106	335	24,6	219	5,8	125	63
BM-26	15,0	2,1	8,3	1,4	62,8	0,59	1,47	0,052	1,06	10	103	383	26,3	294	5,2	148	79
BM-27	14,0	2,5	8,5	1,5	64,3	0,64	1,52	0,052	0,97	10	104	353	24,1	269	5,8	119	82
F-28	16,0	1,6	8,6	1,3	62,1	0,58	1,50	0,058	0,95	10	103	380	24,2	260	5,8	138	123
F-29	15,9	1,6	8,6	1,4	61,7	0,58	1,78	0,059	1,02	10	103	368	26,5	280	5,6	128	145
F-30	16,9	2,0	8,8	1,5	67,1	0,66	1,87	0,064	0,98	10	110	376	26,1	304	6,2	115	160



Tabla 28. Concentraciones elementales para las muestras analizadas por el método de extracción con HCl 1 M. Para cada elemento se indica un error relativo, obtenido a partir de las réplicas para un nivel de confianza de 95 %

	Al₂O₃ ±301 mg/Kg	CaO ± 232 mg/Kg	Fe₂O₃ ± 744 ppm	MgO ± 88 ppm	SiO₂ ± 66 ppm	MnO ± 4 ppm	Na₂O ± 5 ppm	K₂O ± 4 ppm	Ba ± 0,08 ppm	Co ± 0,004 ppm
PC-1	4800	23415	8124	22551	3417	2060	76966	1928	24,90	3,858
PC-2	2497	37517	7315	37791	4647	2801	83639	2034	7,69	2,801
PC-3	4807	35928	12640	31935	3706	2234	26858	2091	6,44	4,561
PC-4	4269	34534	14675	28629	3782	2280	48544	1997	5,66	4,742
PC-5	2846	35058	13654	16613	2926	1764	62416	1657	3,74	5,333
PC-6	3031	34332	14653	14511	2030	1224	60587	1743	3,45	4,209
CA1-7	2986	17565	6964	4882	2079	1253	281	132	93,53	4,532
CA1-8	2360	18475	4316	4147	1711	1032	247	125	58,51	4,543
CA1-9	2191	20221	4910	4630	1951	1176	412	139	91,67	4,812
CA1-10	2026	19228	n.d.	4220	1294	780	315	126	37,86	4,274
CA1-11	2113	18767	3625	4066	1392	839	267	139	61,33	4,601
CA1-12	3342	17842	6419	4801	2282	1375	269	145	82,96	4,937
CA1-13	3780	18789	8197	4995	2564	1545	n.d.	121	109,79	4,956
CA1-14	3095	19046	7072	4862	1909	1151	254	117	87,90	5,067
CA1-15	1826	19152	4552	4448	1470	886	267	128	62,93	4,884
PI-16	2874	19142	5633	4546	1943	1171	327	133	73,77	4,744
PI-17	3016	19245	6087	4761	2578	1554	357	123	74,42	5,194
PI-18	2963	20177	6165	5508	2021	1218	379	110	77,18	5,328
D-19	3405	17861	4378	4933	2618	1578	9174	287	53,69	4,489
D-20	5815	16861	8954	5812	3103	1870	6768	285	55,57	5,336
D-21	4131	17649	6160	5539	2414	1455	6259	250	54,45	4,747
CA2-22	2176	18237	3665	3780	1884	1135	426	208	56,37	4,904
CA2-23	2810	17865	4435	3820	2160	1302	468	207	55,82	5,084
CA2-24	4258	18961	7896	4658	2494	1503	472	188	59,48	5,801
BM-25	1786	19267	3807	4357	1491	899	347	119	40,63	5,095
BM-26	3403	19612	5981	4825	2085	1257	430	123	65,91	5,353
BM-27	5235	18440	8984	5213	3202	1930	365	136	69,37	5,798
F-28	3857	14385	7674	4301	2214	1335	243	140	59,48	6,848
F-29	3059	14932	7360	3949	1989	1199	196	144	53,05	7,158
F-30	3214	17491	6120	3910	2312	1393	270	157	57,26	6,646

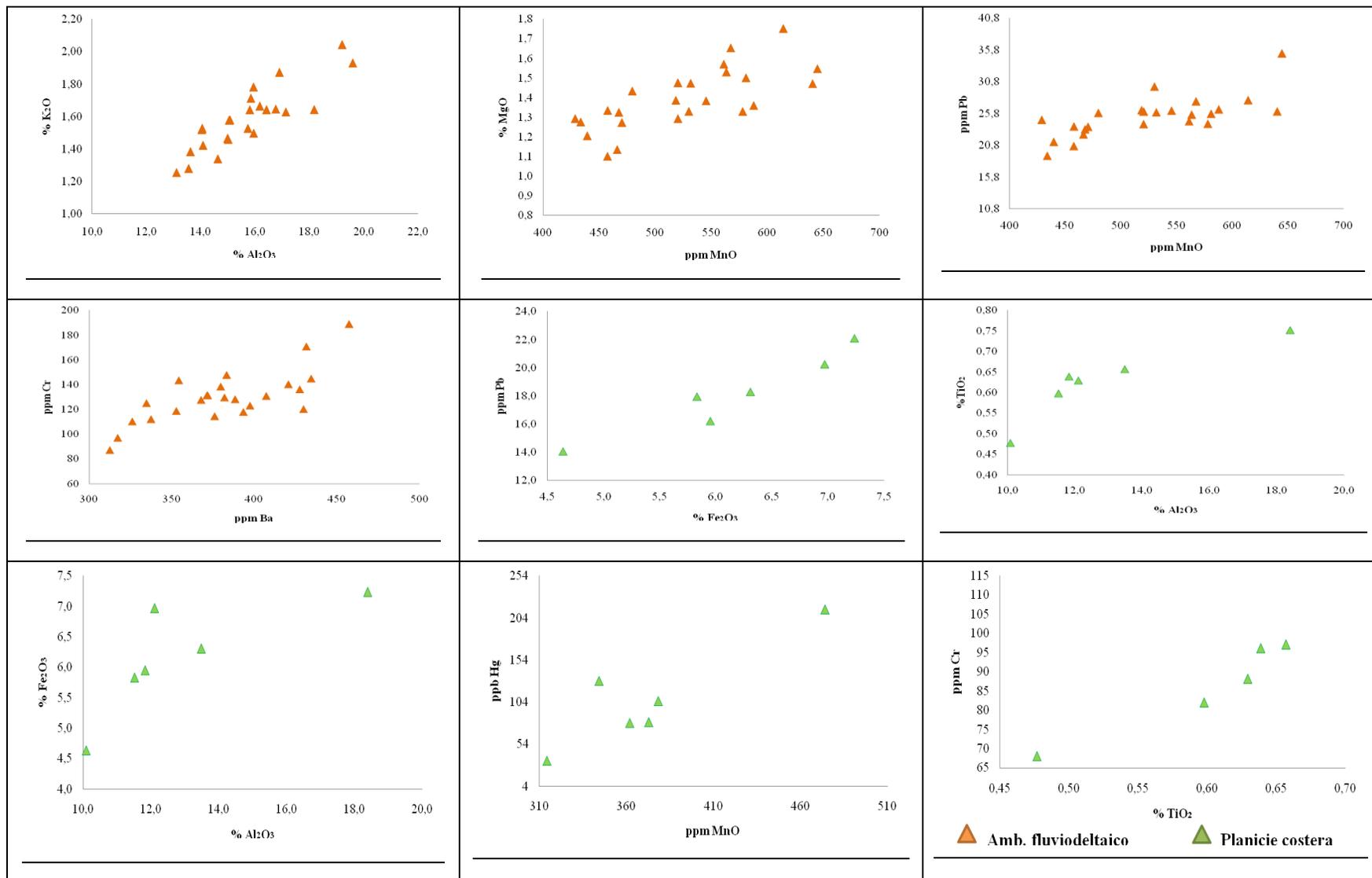
Tabla 29. Concentraciones elementales para las muestras analizadas por el método de extracción con HNO₃ concentrado. Para cada elemento se indica un error relativo, obtenido a partir de las réplicas para un nivel de confianza de 95 %

	Al₂O₃	CaO	Fe₂O₃	MgO	MnO	Ba	Co	Pb	Cr
	±635 mg/Kg	±23 mg/Kg	±2190 mg/Kg	±313 mg/Kg	±4 mg/Kg	± 2 mg/Kg	± 1,0 mg/Kg	±0,5 mg/Kg	± 0,9 mg/Kg
PC-1	7898	250	27828	2361	68	34	8,4	6,3	8,8
PC-2	6371	1279	19038	11195	26	22	7,3	2,3	6,5
PC-3	5068	1535	17884	2719	26	19	5,1	2,3	5,7
PC-4	4940	1216	17616	2242	26	10	5,1	2,3	2,2
PC-5	6970	887	25482	2501	26	8	7,4	5,9	7,9
PC-6	5089	1264	23163	1886	26	5	7,0	5,3	6,3
CA1-7	6577	33	37085	1978	68	121	10,1	8,7	8,2
CA1-8	5207	310	22933	1894	26	43	7,5	2,3	7,0
CA1-9	7566	291	41825	2462	96	70	12,0	9,6	10,8
CA1-10	8935	376	45005	2843	101	97	12,7	10,8	11,8
CA1-11	8823	349	43277	2769	95	77	12,9	10,6	12,3
CA1-12	7115	248	36499	2390	80	53	11,4	8,1	9,1
CA1-13	5381	n.d.	32107	1405	63	42	8,1	7,3	7,6
CA1-14	6493	210	35821	1940	75	48	10,1	9,0	9,6
CA1-15	6931	286	37654	2420	83	64	10,9	8,5	10,2
PI-16	7047	168	33380	2435	64	14	9,3	7,5	9,4
PI-17	6522	187	30028	2040	59	16	8,1	6,9	8,0
PI-18	6540	n.d.	34792	1942	65	27	9,6	7,9	7,6
D-19	8970	204	34393	2779	91	27	10,4	7,4	11,4
D-20	7231	n.d.	29253	1914	65	22	9,1	7,0	8,5
D-21	8176	158	34399	2552	88	33	10,3	7,8	10,8
CA2-22	7872	182	33240	2578	79	10	10,9	7,6	10,3
CA2-23	6487	297	25653	2224	56	7	7,4	5,6	8,6
CA2-24	7347	125	35645	2261	66	7	8,4	8,0	9,6
BM-25	7714	201	35816	2523	75	22	10,0	8,4	10,2
BM-26	7703	96	35392	2160	66	16	8,6	8,1	10,5
BM-27	6242	139	31630	1810	56	14	7,9	7,0	8,6
F-28	6931	96	33502	2025	64	9	8,9	7,2	9,1
F-29	7841	268	39251	2497	87	20	12,0	8,7	10,4
F-30	7358	142	35824	2364	74	24	10,1	8,4	10,7



APÉNDICE VI

Relaciones binarias





APÉNDICE VII

Histogramas y cajas gráficas

