

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE MINERALES PESADOS Y SU APLICACIÓN EN CORRELACIONES ESTRATIGRÁFICAS DE POZOS Y PROCE- DENCIA DE SEDIMENTOS A LO LARGO DE UN TRANSECTO NORTE-SUR, EN EL CAMPO CARABOBO FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Yegres B, Orlando J.
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo.

Caracas, 2018

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE MINERALES PESADOS Y SU APLICACIÓN EN CORRELACIONES ESTRATIGRÁFICAS DE POZOS Y PROCE- DENCIA DE SEDIMENTOS A LO LARGO DE UN TRANSECTO NORTE-SUR, EN EL CAMPO CARABOBO FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Marvin Baquero

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Yegres B, Orlando J.
Para optar al Título de Ingeniero Geólogo.

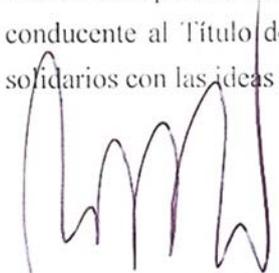
Caracas, 2018

Caracas, 07 Junio de 2018

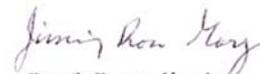
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Orlando J. Yegres B, titulado:

**“ESTUDIO DE MINERALES PESADOS Y SU APLICACIÓN EN
CORRELACIONES ESTRATIGRÁFICAS DE POZOS Y PROCEDENCIA DE
SEDIMENTOS A LO LARGO DE UN TRANSECTO NORTE-SUR, EN EL
CAMPO CARABOBO FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO”**

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



Prof. Ricardo Alezones



Prof. Rosa Jiménez



Dr. Marvin Baquero

Tutor Académico

DEDICATORIA

A tía Elira (Q.E.P.D). Siempre te recordaré por ser especial conmigo.

ORLANDO YEGRES

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a DIOS.

A mis padres a los cuales les debo todo; gracias por su esfuerzo.

A la UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, por las grandes experiencias.

Al doctor Marvin Baquero, por los conocimientos impartidos como tutor durante la elaboración de este trabajo de investigación.

Al doctor Mauricio Bermúdez por su confianza y brindarme la oportunidad de trabajar en el laboratorio de termo cronología.

A la profesora Marlene Flores por toda su paciencia y ayuda en este camino.

Al profesor José Díaz por su ayuda y colaboración.

A mis hermanos, quienes en momentos duros fueron de gran apoyo.

A mis sobrinos Cesar, Gabriela, Daniel y Gabriel en quienes pensaba, para servirles de ejemplo.

A mis tíos Chela y Chilo, que me apoyaron y me acompañaron durante todo este camino.

Asdrúbal y Zully, su ayuda y apoyo fue incondicional.

A todos los profesores de la Escuela de Geología Minas y Geofísica, quienes me ofrecieron sus conocimientos durante toda la carrera.

A todos mis compañeros de trabajo en el Consejo de Preservación y Desarrollo (CO-PRED UCV).

A todos mis amigos, que fueron parte de esta vida universitaria. Muchas gracias a todos.

Yegres Brito, Orlando Jose.

**ESTUDIO DE MINERALES PESADOS Y SU APLICACIÓN EN
CORRELACIONES ESTRATIGRÁFICAS DE POZOS Y PROCE-
DENCIA DE SEDIMENTOS A LO LARGO DE UN TRANSECTO
NORTE-SUR, EN EL CAMPO CARABOBO FAJA PETROLÍFE-
RA DEL ORINOCO**

Tutor Académico: Dr. Marvin Baquero.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. 2018, 86p.**

Palabras claves: Minerales Pesados, Estratigrafía-Correlación, Faja Petrolífera del Orinoco, Bloque Carabobo.

RESUMEN

Este trabajo permitió realizar la correlación estratigráfica entre los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1, bloque Carabobo Faja Petrolífera del Orinoco, mediante el proceso de separación e identificación de minerales pesados; en muestras de núcleos a distintas profundidades. Además, se estableció la procedencia de los sedimentos, aprovechando el comportamiento hidrodinámico de los mismos; así como, su potencial de preservación dada la resistencia a la meteorización. El reconocimiento de los minerales se efectuó, según las propiedades físicas, la forma cristalina, susceptibilidad magnética y densidad. Se utilizaron equipos especializados, ubicados en el Laboratorio de Termocronología de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela. Asimismo, se describen los fundamentos teóricos y prácticos que estipulan este tipo de investigación. La metodología aplicada, fue llevada a cabo siguiendo distintos procedimientos, tanto en la fase de laboratorio (donde se logró la separación de minerales pesados), como en la fase de oficina (donde se obtu-

vo la identificación de minerales pesados), se estudiaron las fracciones de interés mediante la técnica de microscopía óptica y DRX. Obteniendo como resultado que la fracción magnética 0.4A está constituida por ilmenita y hematita, la medianamente magnética 0.8A por epidotos y la no magnética 0.1A por zircones y monacitas. De igual manera, la fracción altamente magnética de 1.2 fue reservada para ser datada por termocronología. Con los resultados obtenidos del estudio morfométrico, se permitió conocer y describir las características de los sedimentos, donde se reconoció una fuente relativamente lejana desde su origen hasta que se depositaron en la cuenca. También, se determinó que la procedencia de los sedimentos proviene del Cratón de Guayana. En cuanto a la correlación estratigráfica resultante entre los pozos del bloque Carabobo se logró extrapolando las concentraciones de los minerales pesados identificados, a los registros de pozos en el intervalo de interés.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.-.....	1
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	4
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.6. ANTECEDENTES.....	5
1.7. ALCANCE.....	6
CAPÍTULO II: MARCO GEOLÓGICO.....	8
2.1. INTRODUCCIÓN.....	8
2.2. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA FPO.....	8
2.3. FORMACIONES GEOLÓGICAS.....	13
2.4. SISTEMA PETROLERO DE LA FPO.....	18
2.4.1 Roca Madre.....	19
2.4.2 Roca recipiente.....	19
2.4.3 Trampas.....	19
2.4.4 Migración.....	19
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	20
3.1. INTRODUCCIÓN.....	20
3.2. MARCO TEÓRICO.....	20
3.2.1 MINERALES PESADOS.....	20
3.2.2 SEPARACIÓN DE MINERALES PESADOS.....	22
3.2.3 CORRELACIONES ESTRATIGRÁFICA.....	22
3.2.4 ESCALAS DE CORRELACIÓN.....	23

3.2.5 MÉTODOS DE CORRELACIÓN.....	23
3.3. PROCEDIMIENTOS DE SEPARACIÓN DE MINERALES PESADOS.....	25
3.3.1. Separación magnética manual.....	25
3.3.2. Separación magnética vía Magnet-Lift.....	25
3.3.3. Separación por líquidos densos (Bromoformo >2,96g/cm ³).....	25
3.3.4. Separación magnética isodinámica Frantz.....	26
3.4. RECONOCIMIENTO DE MINERALES PESADOS.....	26
3.4.1 Trituradora de Mandil o Dientes.....	27
3.4.2 Trituradora de Rodillos.....	27
3.4.3 Pulverizadora de Disco.....	28
3.4.4 Mesa de Wilfley.....	29
3.5. PROPIEDADES Y SUCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LOS MINERALES.....	29
3.5.1 Minerales Ferromagnéticos.....	30
3.5.2 Minerales Paramagnéticos.....	30
3.5.3 Minerales Diamagnéticos.....	31
3.6 MÉTODOS ISOTÓPICOS DE ANÁLISIS DE PROCEDENCIA DE SEDIMENTOS.....	32
3.7 REGISTROS DE POZOS.....	35
CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO.....	37
4.1. INTRODUCCIÓN.....	37
4.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	37
4.3. ETAPA DE LABORATORIO.....	37
4.3.1 Tamizado.....	37
4.3.2 Mesa de Wilfley.....	39
4.3.3 Separación magnética manual (imán).....	40
4.3.4 Magnet–lift.....	40
4.3.5 Separador isodinámico Frantz.....	41
4.4. ETAPA DE OFICINA.....	43

4.4.1 Análisis óptico de minerales pesados mediante el microscopio petrográfico.....	43
4.3.2 Difracción de rayos X.....	44
4.4.3 Análisis de imágenes de minerales pesados mediante ImageJ.....	45
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
5.1 INTRODUCCIÓN.....	48
5.2 Análisis de las fracciones separadas con el Imán común.....	48
5.2 Estudio con el microscopio petrográfico.....	49
5.3 Análisis por Difracción de rayos X.....	56
5.4 Calculo de redondez y esfericidad.....	59
5.5 Grafico de correlación.....	62
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de la zona de estudio y Ubicación relativa del Bloque Carabobo F.P.O. (Elaboración propia, 2016; a partir de la herramienta Google Earth).....	2
Figura 1.2 Ubicación relativa de los pozos en estudio, pertenecientes al bloque Carabobo F.P.O. (Tomado y modificado de Proyecto Cretácico FPO, 2015)....	3
Figura 2.1. Corte esquemático. Cuenca oriental de Venezuela, donde se evidencia la ubicación de la FPO. (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 1997).....	9
Figura 2.2 Marco geológico regional en Venezuela durante el Cámbrico. (Tomado y modificado de WEC, 1997).....	10
Figura 2.3 Evolución y distribución de estructuras graben Jurásicas en Venezuela. Apure-Mantecal, Graben de espino, (Tomado y modificado de WEC, 1997).....	11
Figura 2.4 Sección esquemática de la evolución tectónica en la Cuenca Oriental de Venezuela. (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 1997).....	13
Figura 2.5 Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Oriental de Venezuela (Tomado del L.E.V, 1997).....	14
Figura 2.6 Columna estratigráfica con las Formaciones presentes en el bloque Carabobo. (Tomado y modificado de PDVSA-Proyecto Magna reserva (2006).	15
Figura. 3.1 Trituradora de dientes, Laboratorio de Metalurgia UCV.....	27
Figura. 3.2 Trituradora de Rodillos, Laboratorio de Metalurgia UCV.....	28
Figura. 3.3 Pulverizadora de Disco, Laboratorio de Metalurgia UCV.....	28
Figura. 3.4 Pulverizadora de Disco, Laboratorio de Metalurgia UCV.....	29
Figura. 3.5 Carta índice de esfericidad y redondez. (Tomado y modificado de Adams y Cols, 1997).....	34
Figura 4.1 (a) Ilustración del Tamiz, (b) Fotografía donde se observa los tamices utilizados.....	38
Figura 4.2 (c) Esquema del funcionamiento de la mesa de Wilfley. (d) Foto de	39

la separación de minerales pesados con la mesa de Wilfley.....	
Figura 4.3 (e) Ilustración de la muestra esparcida sobre la hoja de papel, (f) Fotografía de la separación de minerales pesados con imán común.....	40
Figura 4.4 (g) Esquema de la separación de minerales, en fracciones magnéticas con el Magnet-Lift, (h) fotografía con el Magnet-Lift del laboratorio de termocronología de la UCV.....	41
Figura 4.5. (i) Ilustración del separador isodinámico Frantz y sus partes, (j) Foto del separador Magnético Frantz, existente en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.....	42
Figura 4.6 (k) Foto de las secciones montadas para el análisis, con el microscopio laica DMLP, (L) identificación de minerales pesados.....	44
Figura 4.7 Fotografías de las muestras para el estudio de DRX, realizado en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).....	45
Figura 4.8 Imagen utilizando el programa Paint, para la edición de las fotografías tomadas a las secciones montadas.....	46
Figura 4.9 Procedimiento para calcular los valores de esfericidad y redondez con el programa Image J. (Elaboración propia, 2018).....	46
Figura 4.10 Resumen de la metodología utilizada en el estudio de minerales pesados. (Elaboración propia, 2018).....	47
Figura 5.1 Gráfico de barras con la variación en los porcentajes de minerales pesados, obtenidos con el imán común; para las muestras de los pozos en estudio, pertenecientes al bloque Carabobo F.P.O.....	49
Figura 5.2 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CH-2...	50
Figura 5.3 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CH-38.	51
Figura 5.4 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CNX1.	52
Figura 5.5 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CRM1.	53

Figura 5.6 Agrupación de todos los porcentajes resultantes de minerales pesados identificados, en cada uno de los pozos en estudio.....	54
Figura 5.7 Fotografías y características de los granos de minerales pesados más abundantes reconocidos con el microscopio petrográfico.....	55
Figura 5.8 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CH-2 Amperaje 0.1 A fracción no magnéticos/espectro de difracción de rayos x.....	57
Figura 5.9 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CH-38 Amperaje 0.1 A fracción no magnéticos/espectro de difracción de rayos x.....	57
Figura 5.10 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CRM-1 Amperaje 0.1A fracción no magnéticos/espectro de difracción de rayos x.....	58
Figura 5.11 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CNX-1 Amperaje 0.1A fracción no magnéticos/Espectro de difracción de rayos x.....	58
Figura 5.12 Resultados de los valores de esfericidad para los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 del Bloque Carabobo de la FPO.....	60
Figura 5.13 Resultados de los valores de redondez para los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 del Bloque Carabobo de la FPO.....	60
Figura 5.14 Comparación de las variaciones de los valores redondez y esfericidad de los pozos.....	61
Figura 5.15 Correlación por minerales pesados entre los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1. Tomando como referencia las capas que está por encima del basamento ígneo (Elaboración propia, 2018).....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Descripciones litológicas y ubicación de las Formaciones presentes en el área de estudio.....	16
Tabla 3.1 Lista de minerales pesados más comunes. Datos tomados del manual de mineralogía Klein y Hurlbult (2002).....	21
Tabla 3.2 Clasificación de los minerales pesados según su diafanidad. Datos tomados del Boog (2006).....	22
Tabla 3.3 Asociaciones de minerales pesados para el estudio de procedencia. Tomado de Carver (1971).....	32
Tabla 4.1. Peso inicial de las muestras para el tamizado.....	38
Tabla 4.2 Minerales pesados separados por Franz, obtenidos conforme al índice de susceptibilidad magnética. Tomado de Bermúdez y Anaya (2007).....	42
Tabla 4.3 Formato para registrar los minerales pesados identificados, a través del análisis óptico.....	44
Tabla 5.1 Tabla de minerales pesados, obtenidos con el uso del imán común.....	48
Tabla 5.2 Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CH-2, profundidad 3430’–3431’.....	50
Tabla 5.3. Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CH-38, profundidad 3296’– 3296’5’.....	51
Tabla 5.4 Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CNX-1 profundidad 1901’ – 1901’5’’.....	52
Tabla 5.5 Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CRM-1 profundidad 1901’ – 1901’5’’.....	53
Tabla 5.6 Pesos iniciales de las muestras para el estudio DRX.....	56
Tabla 5.7 Valores de esfericidad y redondez calculados con el Image J.....	59

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El presente estudio surge del análisis de minerales pesados en muestras de arenas; a lo largo de un transecto Norte-Sur (conformado por los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1) del Bloque Carabobo de la FPO-Venezuela. Con este estudio Petróleos de Venezuela aspira tener datos de procedencias de sedimentos y características del terreno fuente en la zona de estudio; asimismo aportara la correlación entre pozos separados a varios kilómetros, para deducir la dinámica de los diferentes procesos geológicos y llevar a cabo la reconstrucción de los ambientes de depósito. Además, establecer las relaciones entre masas continentales (fuente de aporte) y zonas de depósito (cuencas), para modificar modelos paleogeográficos y paleotectónicos a escala continental (Gehrels y Dickinson, 1995).

En la presente investigación se plantea la concentración y beneficio de minerales pesados de tales arenas con la finalidad de estudiar su concentración y plantear nuevos métodos de datación en la Faja Petrolífera del Orinoco.

1.2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de interés se encuentra en la Faja Petrolífera del Orinoco, específicamente en la zona centro-este de Venezuela, que incluye a los estados Anzoátegui, Monagas, Guárico y Delta Amacuro; posee una extensión de 55.000,00 km² y fue descubierta en 1938 (Méndez, 2003). La FPO, ha sido dividida de oeste a este en cuatro grandes bloques: Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo, anteriormente Machete, Zuata, Hamaca y Cerro Negro, respectivamente (ver figura n° 1.1). Éstos a su vez divididos en subconjuntos, para un total de 27 bloques:

- a) Boyacá: 6 bloques.
- b) Junín: 10 bloques.
- c) Ayacucho: 7 bloques.
- d) Carabobo: 4 bloques.

El área de Carabobo es la más oriental de las cuatro y pertenece al grupo de campos del área mayor de la FPO, Cuenca Oriental de Venezuela. Se extiende desde el sureste del estado Anzoátegui y ocupa, toda la parte sur del Estado Monagas y un sector del Occidente del Territorio Federal Delta Amacuro. Cubriendo un área aproximada de 7.100 Km², posee el 22% de las reservas totales certificadas de la faja; con una total de 793 pozos activos, los cuales tienen una producción estimada de 346 MBD.

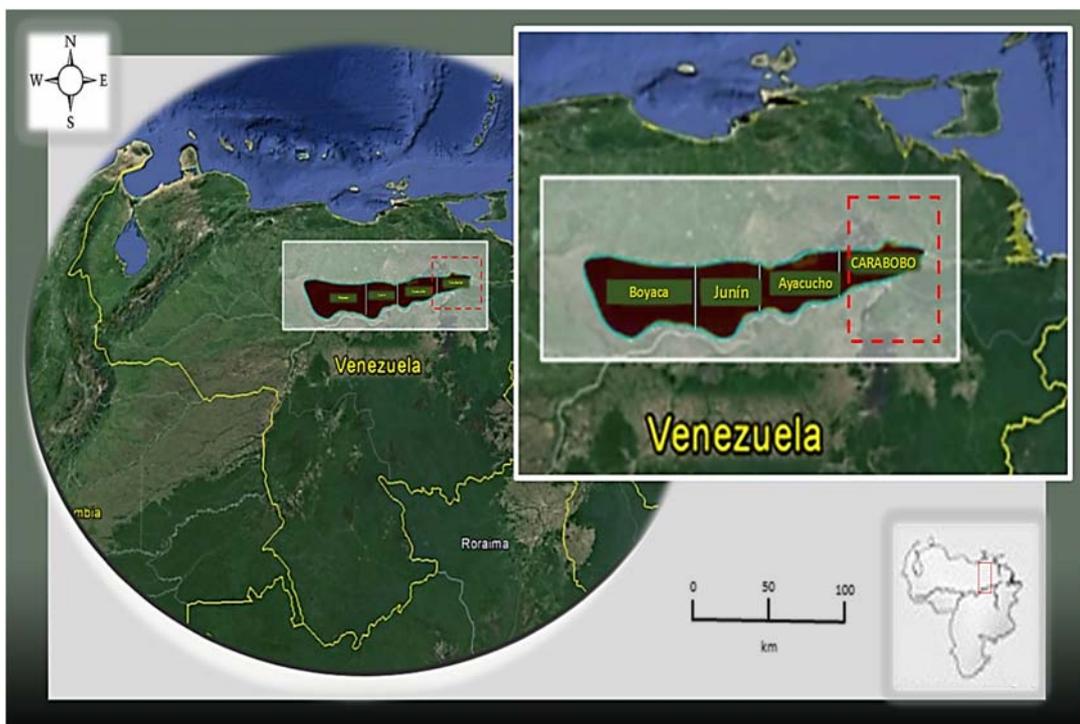


Figura 1.1 Mapa de la zona de estudio y Ubicación relativa del Bloque Carabobo F.P.O. (Elaboración propia, 2016; a partir de la herramienta Google Earth).

La figura 1.2, ilustra los distintos núcleos disponibles para este estudio, dentro del bloque Carabobo de la FPO.

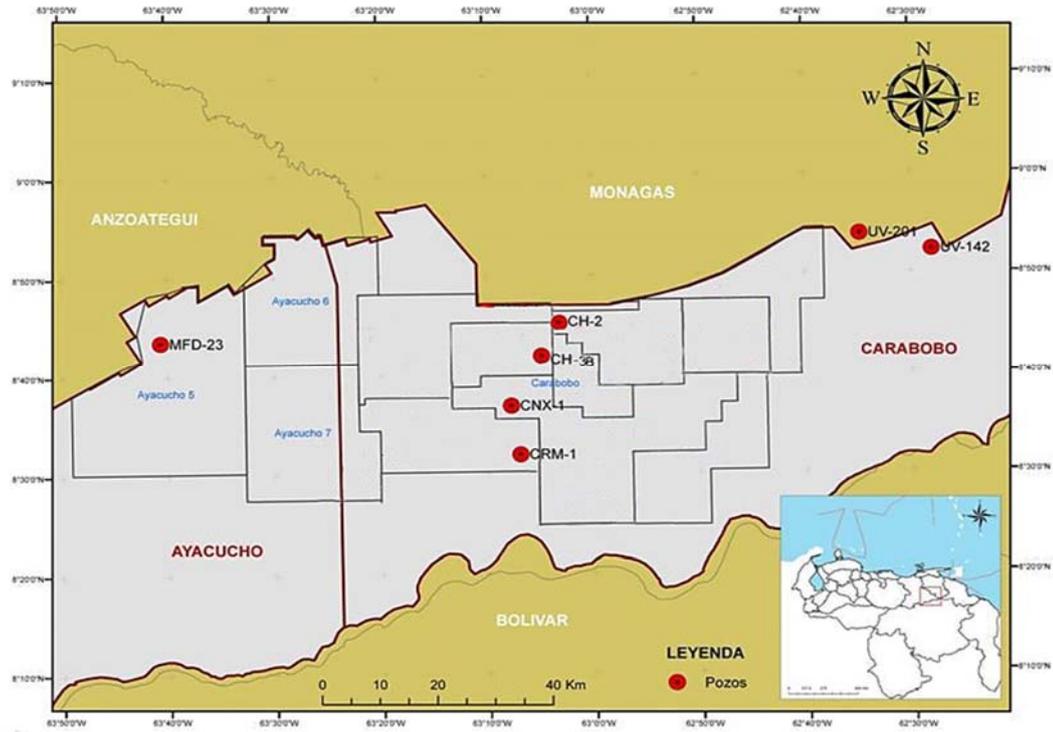


Figura 1.2 Ubicación relativa de los pozos en estudio, pertenecientes al bloque Carabobo F.P.O. (Tomado y modificado de Proyecto Cretácico FPO, 2015).

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente Petróleos de Venezuela requiere mejorar los resultados en las correlaciones mediante el uso de técnicas distintas a las bioestratigráficas convencionales. Debido al bajo contenido fosilífero de las secuencias siliciclásticas, considerando la alta frecuencia y abundancia de minerales pesados presentes en las areniscas en estudio, surge la posibilidad de considerarlos útiles para mejorar las correlaciones, al mismo tiempo el estudio de minerales pesados permitiría analizar la forma como se ven afectados los registros litológicos (Gamma Ray), con esto se pretende caracterizar y calibrar la herramienta de registros petrofísicos lo que permitiría refinar la correlación y definir con más precisión los yacimientos. Adicionalmente la datación de minerales pesados puede establecer la ventana del petróleo, historia de la cuenca y su evolución.

Como un producto adicional, la caracterización morfométrica permitiría re-

conocer si a nivel de los distintos pozos existen distintas fuentes para esos minerales o si por el contrario es una única fuente y junto a la aplicación de otras técnicas tratar de definir el marco cronoestratigráfico de la cuenca, el cual no se ha podido datar con precisión por métodos radiométricos.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Realizar un estudio de minerales pesados de sedimentos, en los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 desde 1901' hasta 3431', a lo largo de un transecto Norte-Sur del Bloque Carabobo de la FPO-Venezuela.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar la identificación de minerales pesados y estimar su composición, mediante análisis óptico, microscopía electrónica de barrido y análisis de difracción de rayos X.
- b) Analizar las características morfométricas de los minerales pesados (redondez y esfericidad) a través de programas de análisis de imágenes; tales características darían una idea de la distancia a la fuente.
- c) Analizar la procedencia de los minerales pesados presentes en los sedimentos de los pozos (CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1), determinando la disposición de los minerales en la matriz por petrografía.
- d) Determinar la textura de minerales de cuarzos existentes en las arenas, para reconocer mecanismos de erosión, transporte y depositación.
- e) Realizar la correlación estratigráfica entre los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1. Bloque de Carabobo.

1.5 JUSTIFICACIÓN

En vista de la reciente caída de los precios del petróleo y los problemas económicos que afectan al país; Petróleos de Venezuela está realizando una serie de trabajos de investigación que ayuden a mejorar la exploración de hidrocarburos en la Faja Petrolífera del Orinoco. La presente investigación constituiría un aporte para

determinar la procedencia de sedimentos y establecer las correlaciones de pozos, en el Bloque Carabobo. Con el fin de conocer la composición química y mineralógica, así como el análisis estadístico de sus diversos componentes, a través de la investigación de minerales pesados.

1.6 ANTECEDENTES

Grosz et al (1992), identificaron que las anomalías aeroradiométricas de los registros Gamma-Ray reportadas en los sedimentos cretácicos en Carolina del Norte estaban asociadas con concentraciones de minerales pesados.

Macías (1995), estudio las características petrofísicas en las arenas de la formación oficina, a partir de la información obtenida en registros eléctricos Gamma Ray. Además efectuaron correlaciones litoestratigráficas, donde pudieron definir un ambiente sedimentario y definir mapas isópacos para las arenas U1 y U2.

Flores y Méndez (2005), utilizaron el método de huellas de fisión basado en la técnica del detector externo aplicado a apatitos detríticos contenidos en la Formación Betijoque, estableciendo la correlación estratigráfica, para determinar relaciones entre terreno fuente y procedencia sedimentaria.

Machado (2010), realizó un modelo sedimentológico estratigráfico de las secuencias paleozoicas; en la cuenca oriental de Venezuela, Faja Petrolífera del Orinoco. De igual manera, describieron la estratigrafía en las formaciones carrizal y hatoviejo, donde se muestra la evolución geológica durante este periodo. Utilizaron para este trabajo análisis sedimentológicos de núcleos.

Arévalo Jonathan (2012), realizó un modelo sedimentológico - estratigráfico, donde se determinó el sentido de la sedimentación, a partir de la correlación de pozos y propuso un ambiente de depositación, correspondiente a un sistema deltaico. Para un intervalo que desde la arena U2 de la formación Merecure, hasta la arena R3 de la Formación oficina, perteneciente a la Faja Petrolífera del Orinoco.

Flores (2013), efectuó la discriminación entre relieve, clima, y tectónica utilizando los mismos métodos mencionados en este proyecto a lo largo de la cuenca del Río Guárico, con la finalidad de conocer las relaciones entre clima y tectónica en el

contexto geodinámico actual conformado por las Placas Caribe y Suramérica. Sus principales conclusiones indican diferencias en términos de erosión dentro de las subcuencas y un patrón de redondez y esfericidad heredados posiblemente durante los procesos de depositación de la Formación Guárico.

García (2013), realizó una caracterización de las areniscas en los bloques Petrocarabobo y Carabobo 1, con base en los tipos de roca, a partir de la integración de rasgos sedimentológicos y petrofísicos, como descripción de núcleo, registros petrofísicos y datos sísmicos.

Viana y Arcia (2014), establecieron las relaciones entre clima, relieve y tectónica mediante la caracterización mineralógica–geoquímica (análisis de secciones finas, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, análisis granulométricos de minerales pesados pertenecientes a sedimentos modernos del sistema hidrológico (Ríos Nirgua o Buria, Tucuragua, Peña, tributario de Cojedes, Apure, Boconó, y la Quebrada Las Palmas, los cuales drenan hacia el Río Orinoco).

Carmona y González (2014), establecieron la relación entre clima y tectónica como agentes controladores en el desarrollo de relieve de orógenos, por medio del análisis de minerales pesados en sedimentos de las cuencas hidrográficas de los ríos Canaguá, Caparo, Michay y Uribante.

López y Uzcátegui (2014), generaron las diferencias en cuanto al contenido de minerales pesados, textura de granos e índices de erosión en los sectores norte y sur de la Formación Mesa, en la parte central de la cuenca del río Orinoco.

Duhamel (2016), efectuó un reconocimiento de minerales pesados y analizó los efectos de la presencia de los mismos sobre los registros petrofísicos del grupo Temblador, Campo Dobokubi, estado Anzoátegui.

1.7 ALCANCE

Este proyecto tiene como finalidad el análisis de minerales pesados, en la Faja Petrolífera del Orinoco, bloque Carabobo; para aportar datos en la correlación entre los pozos (CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1), separados a varios kilómetros e identificar procedencias de sedimentos y características del terreno fuente. Mediante una

serie de diferentes técnicas de separación en el laboratorio de termocronología de la Universidad Central de Venezuela.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la geología regional y local del área de estudio, ubicada en el bloque Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco. Se detalla además la evolución de la cuenca y las formaciones y estructuras geológicas presentes; así como los principales procesos del sistema petrolero, esto incluye, roca madre, roca recipiente, trampas y migración de los hidrocarburos.

2.2. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA FPO

La Faja Petrolífera del Orinoco, se ubica en la región Norte-Centro-Este de Venezuela cubriendo un área aproximada de 55.000 km². Comprende los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, Delta Amacuro y una parte del estado Sucre (figura 2.1). Esta cuenca por su contenido en hidrocarburos, es la segunda más importante en cuanto a su concentración petrolífera; se caracteriza por ser una depresión estructural y topográfica, limitada al norte por la Cordillera de la Costa, al sur por el Río Orinoco y el Escudo de Guayana, al este con el Golfo de Paria y al oeste con el lineamiento de El Baúl (PDVSA, 1997).

LA FPO pertenece a la Cuenca Oriental venezolana. Parnaud et al. (1999) plantea que es una cuenca antepaís flexurada (“foreland”) que se desarrolló durante el Neógeno sobre un antiguo margen pasivo mesozoico del cratón suramericano. El área total, tanto costa afuera como costa adentro, se aproxima a los 200.000 km².

Esta cuenca es elongada y asimétrica, contiene alrededor de 8 km de espesor de sedimentos terciarios, que están por encima del basamento ígneo-metamórfico del cratón guayanés (Di Croce et al., 1999).

Estructuralmente se encuentra limitada por la Falla El Pilar hacia el norte y al sur por el lineamiento del Baúl, que la separa de la Cuenca Barinas-Apure (figura 2.1).

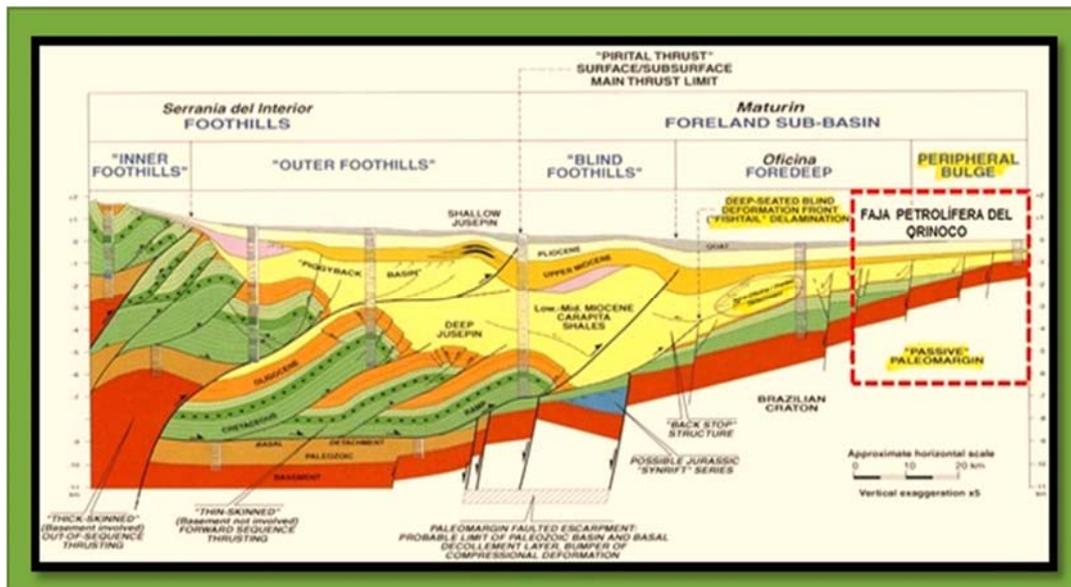


Figura 2.1. Corte esquemático. Cuenca oriental de Venezuela, donde se evidencia la ubicación de la FPO. (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 1997).

A continuación se destaca la evolución en las fases tectono-sedimentarias que se han reconocido dentro de la FPO. Según González de Juana (1980): desde el (Cámbrico-Pérmico), aproximadamente 500 M.a. Inicia la sedimentación del margen pasivo Paleozoico, sobre el borde estable del Cratón de Guayana.

En esta etapa ocurren movimientos de orogénesis y hundimientos, que ocasionaron transgresiones y regresiones extensas, tal y como se observa en la figura 2.2, que sirvieron para el aporte de sedimentos a la cuenca. Se depositan las formaciones Hato Viejo y Carrizal; estas se extienden sobre el basamento ígneo-metamórfico, cubriendo gran parte de las zonas sur-centrales de los estados Guárico y Anzoátegui. Hacia el este de la región del Tigre no se conoce la Formación Carrizal (Méndez, 2003).

Quedando el basamento de la cuenca constituido por rocas ígneas metamórfica y sedimentaria de edad Precámbrica a Triásica-Jurásica.

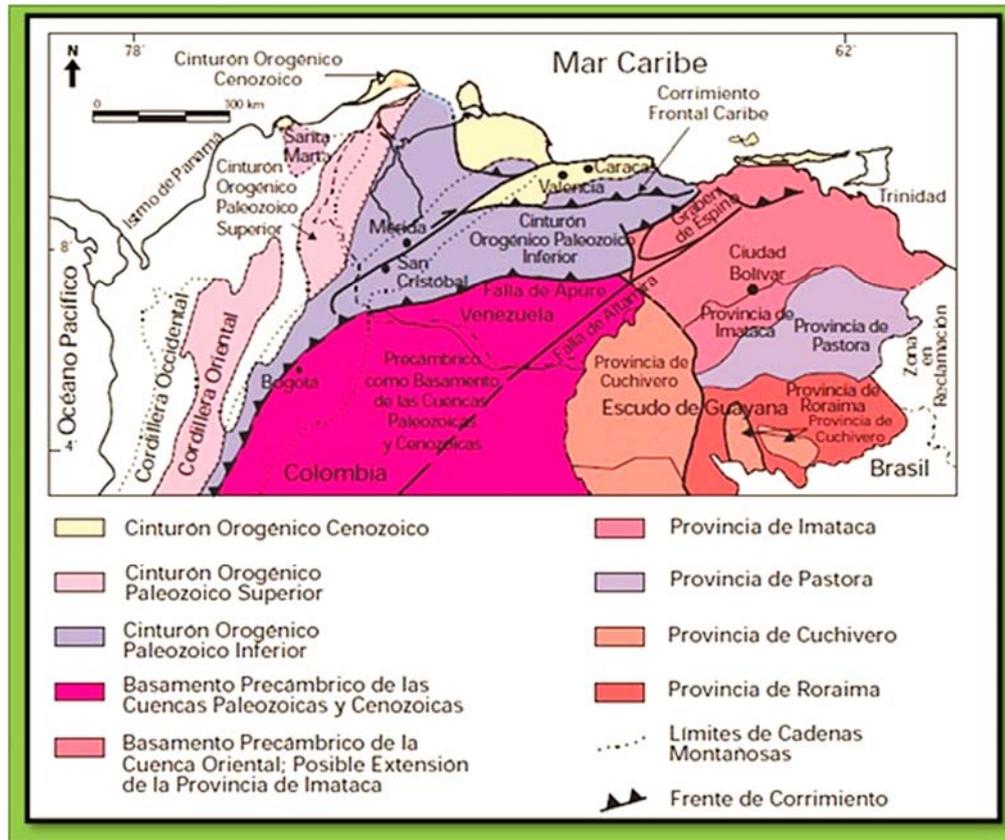


Figura 2.2 Marco geológico regional en Venezuela durante el Cámbrico. (Tomado y modificado de WEC, 1997).

En la era Mesozoica que comprende los periodos Triásico (210-250 M.a.), Jurásico (140-210 M.a.) y Cretácico (65-140 M.a.). La evolución de la Cuenca Oriental de Venezuela y la FPO; está marcada por una serie de rupturas o rifting, que a su vez producen una serie de estructuras “Horst” y “Graben” con tendencia noreste; la mayoría de estos fueron rellenados durante este periodo por sedimentos continentales tipo “capas rojas”, volcánicas de diversa índole y eventualmente clásticos y calizas de invasión marina.

Esta invasión marina coincide con el pulso mundial transgresivo del Cretácico Tardío, responsable de la sedimentación de calizas, lutitas y Ftanitas ricas en materias orgánicas; En Venezuela estas rocas se conocen como Formación Querecual y La Luna, rocas madres por excelencia en las cuencas petrolíferas venezolanas.

En la Faja Petrolífera del Orinoco, está unida lateralmente perdiendo su carácter de roca madre y pasando a roca de ambiente plataformal, hasta costero y continental, del Grupo Temblador definido en el subsuelo como las Formaciones Tigre y Canoa.

Desde el borde septentrional del Cratón de Guayana se levanta y produce en toda la cuenca una retirada general de los mares hacia el norte. Esta regresión de los mares dejó expuestos a la erosión a los sedimentos paleozoicos (Méndez, 2003).

Un punto interesante es que en Venezuela la sedimentación correspondiente al periodo Triásico se toma como inexistente. Los sedimentos de Carrizal y Hato Viejo que formaban parte de la superficie de la cuenca, fueron sometidos al ataque de los agentes erosivos por lo cual fueron arrasados, casi en su totalidad, quedando como remanentes en algunas áreas (Méndez, 2003).

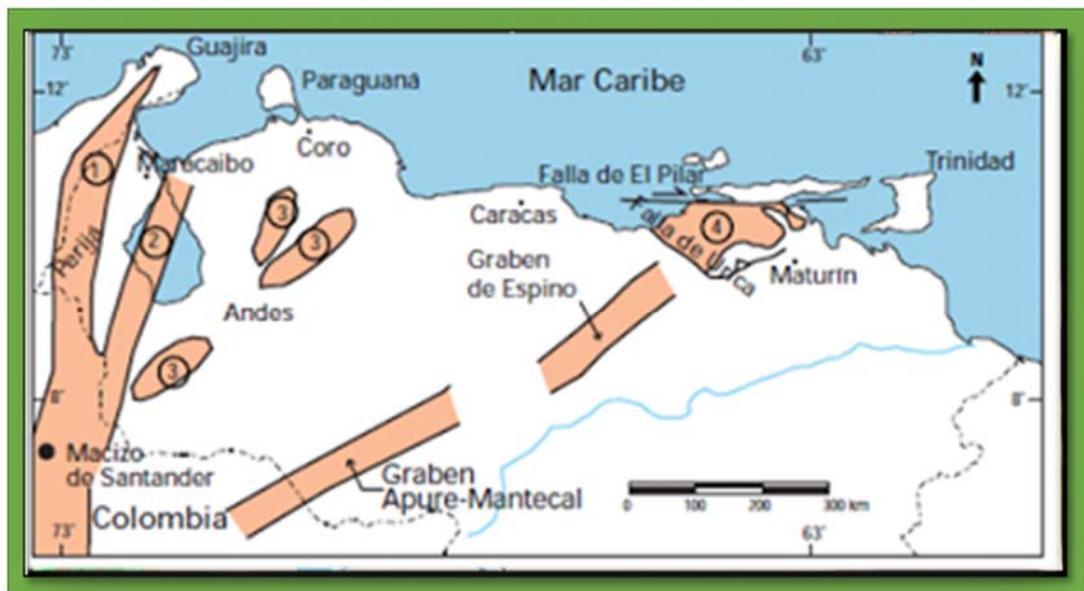


Figura 2.3 Evolución y distribución de estructuras graben Jurásicas en Venezuela. Apure-Mantecal, Graben de espino, (Tomado y modificado de WEC, 1997).

Finalmente, en la era Cenozoica, periodo comprendido por el Paleoceno, Eoceno y Cuaternario; inicia lo que se conoce como la evolución Terciaria dentro de la cuenca. Afectada por la desintegración de la Pangea que

se había iniciado al principio del Cretácico. Se identifica en Venezuela períodos de grandes orogénesis, cuyos efectos primordiales pueden observarse en las rocas metamórficas e intrusiones graníticas de la Cordillera del Caribe (Méndez, 2003). En el Eoceno Medio-Tardío, la FPO es invadida por el mar; donde se depositan los clásticos arenosos y lutitas de la parte basal de la Formación Merecure y Oficina (Méndez, 2003).

En el Oligoceno continua la colisión diacrónica desde el oeste hacia el este, entre placa Caribe y norte de Venezuela (Pindell y Kennan, 2001). Dicha colisión casi horizontal se mantiene para el Mioceno Tardío, lo que genera un régimen transtensivo, en el margen central de la cuenca; que resulto en la formación de la serranía del interior de Anzoátegui y de la cuenca del margen pasivo dentro de la Cuenca antepaís. Esta colisión fue diacrónica con el desplazamiento progresivo de oeste a este (Stephan, 1985).

Para el Mioceno en la FPO, y la cuenca Oriental de Venezuela. Se acentúan los efectos de las orogénesis terciarias, referidos por cambios en su forma y geometría. La cuenca comienza a adquirir visiblemente su configuración actual (figura 2.4); se levanta el flanco norte buzando hacia el Cratón que recibe los sedimentos del frente de montañas (Méndez, 2003). Las fuerzas compresivas caribeñas continúan actuando desde el norte y noreste, para acentuar el plegamiento, produciendo fallas inversas y bloques volcados en la misma dirección del empuje. De igual forma en el flanco sur se producen corrimientos tan notables.

Actualmente las fallas normales continúan siendo activas. Una serie de lutitas por compresión dan forma a colinas en el límite del sur del frente de deformación, probablemente con núcleos antiguos de características transpresionales. Hoy persiste la maduración y la producción de hidrocarburos en la parte más profunda de la Faja Petrolífera del Orinoco.

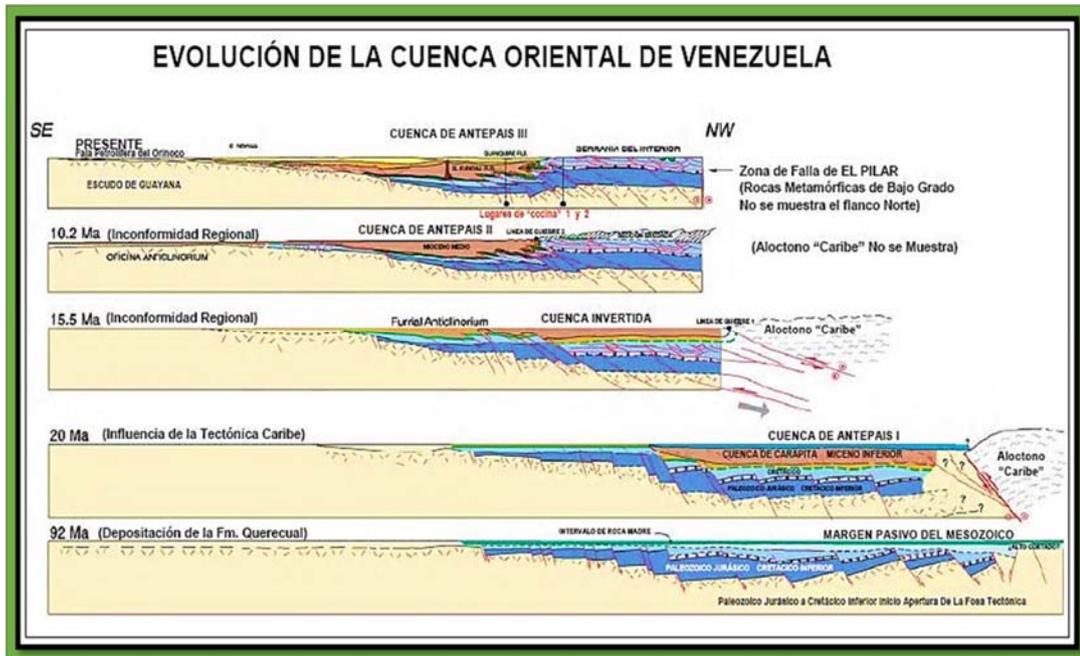


Figura 2.4 Sección esquemática de la evolución tectónica en la Cuenca Oriental de Venezuela. (Tomado y modificado de Yoris y Ostos, 1997).

2.3 FORMACIONES GEOLÓGICAS

Las formaciones geológicas dentro del bloque Carabobo, corresponden al acuñaamiento sur de sedimentos terciarios, por arriba del basamento ígneo-metamórfico del Escudo de Guayana. Donde destacan dos provincias separadas por el sistema de fallas de Hato Viejo (Fiorillo, 1983).

El área de Carabobo se considera tectónicamente estable, predominan en esta zona las fallas del tipo normal con dirección este-oeste y buzamiento hacia el sur: algunas de estas fallas se han reactivado a través del tiempo. Se tiene además un homoclinal definido a partir de sísmica 2d, el cual tiene un buzamiento suave hacia el norte con un ángulo entre 2° y 4°; este homoclinal se encuentra afectado por fallas normales de poca extensión que afectan principalmente al basamento ígneo del cratón de Guayana.

Eriksson (2001). Define los depósitos como la acumulación de sedimentos terciarios, los cuales han rellenado un gran espesor. En esta zona por ser una cuenca asimétrica con su eje mayor en dirección este-oeste, cuyo origen puede remontarse a

la era Paleozoica y que en los períodos subsiguientes fue adquiriendo su forma desde el Terciario hasta el presente. Originada sobre una corteza continental adelgazada, limitada por el Escudo de Guayana al Sur, por las rocas metamórficas acrecionadas al Norte. El Graben de Espino al Oeste, la corteza oceánica Atlántica al Este (figura 2.5).

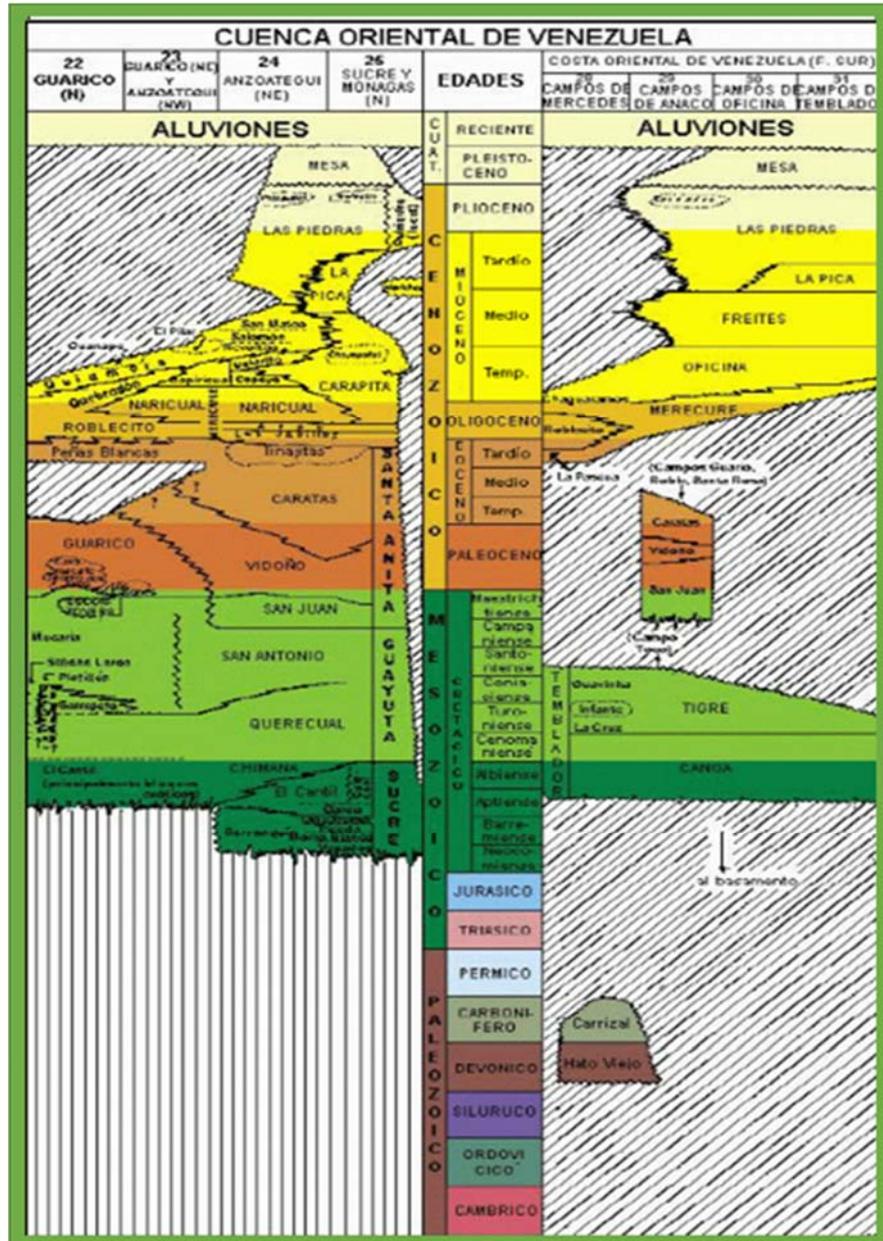


Figura 2.5 Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Oriental de Venezuela (Tomado del L.E.V, 1997).

De manera local, en el bloque Carabobo las formaciones geológicas, inician con un basamento cristalino, formado por granitos, gneises, anfibolitas y esquistos, de origen ígneo-metamórfico; que forma parte del Complejo de Imataca de edad Precámbrica. (Fiorillo, 1983). Pertenece al flanco sur de la Cuenca Oriental de Venezuela; el cual está ubicado en la parte más al este dentro de la FPO. La litología característica del Complejo de Imataca es representada por gneises félsicos y máficos, intercalados con capas de cuarcitas ferruginosas, granulitas y cuerpos delgados interestratificados de rocas graníticas. En todo el complejo las rocas leucocráticas predominan y constituyen aproximadamente el 80% de la unidad, los gneises máficos constituyen el 10% de la secuencia y el resto lo componen los gneises graníticos y escasas anfibolitas. La edad del protolito de Imataca ha sido interpretada mediante estimaciones radiométricas por los métodos Rb/Sr y U/Pb roca total, como correspondiente a 3.500-3.600 M.a. (González de Juana, 1980).

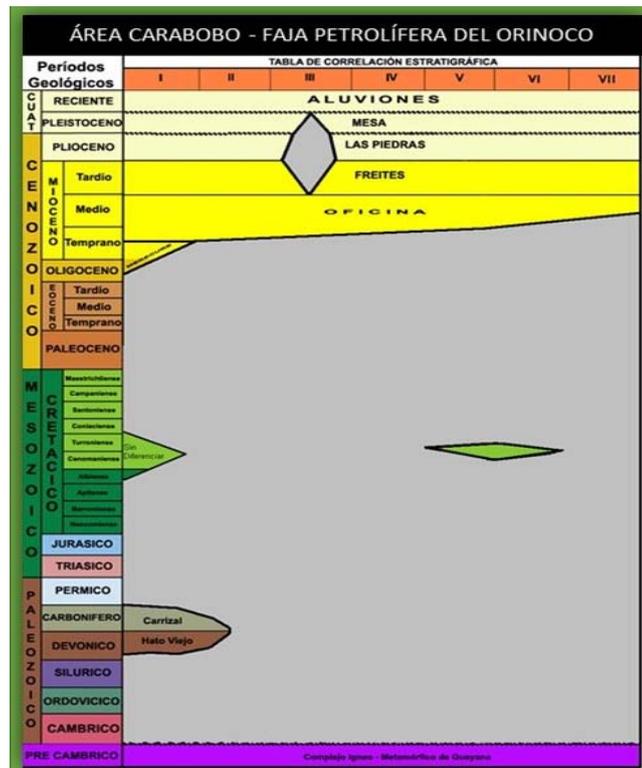


Figura 2.6 Columna estratigráfica con las Formaciones presentes en el bloque Carabobo. (Tomado y modificado de PDVSA-Proyecto Magna reserva (2006).

Tabla 2.1 Descripciones litológicas y ubicación de las Formaciones presentes en el área de estudio.

Formaciones/ Asociaciones /Grupos	Descripción litológica
Fm. Oficina	<p>Alternancia de lutitas grises, gris oscuro y gris marrón, intercaladas e interestratificadas con areniscas y limolitas de color claro y grano fino a grueso. Componentes menores, pero importantes de la unidad, son las capas delgadas de lignitos y lutitas ligníticas, arcilitas verdes y gris claro, con esférulas de siderita, areniscas siderítico-glaucónicas y calizas delgadas con estructuras como en cono, (Fiorillo, 1983).</p> <p>La formación oficina se dividió en 5 zonas mayores llamadas Tope de Oficina, Pílon, Morichal Superior, Morichal Medio y Morichal Inferior. El tope de la formación, se caracteriza por presentar una baja relación arena/lutita y despliega una indicación más extensa de trasgresión marina. Pílon, presenta arenas masivas que han sido depositadas en una línea de costa de ambiente somero con presencia de fósiles marinos. Morichal Superior y Medio están compuestas por lutita, limolita, lodolita, estratos de carbón y cuerpos de arena, que son el resultado de depositación de planicies costeras dominadas por mareas tales como planicies intermareales ricas en lodos, típicas de ambientes deltaicos, (Fiorillo, 1983).</p> <p>Las arenas de Morichal Inferior fueron depositadas en un sistema de barras fluviales en una planicie entrelazada de multicanales y canales rellenos de barras. Así mismo, Morichal Inferior está dividida en dos zonas Morichal Inferior A y Morichal Inferior B, debido a la correlación de topes provenientes del bloque 6, sin embargo Morichal Inferior B se acuña en este bloque estando presente sólo en algunos pozos.</p>
Fm. Freites	<p>Se presenta en el flanco sur de la cuenca. Suprayace concordantemente a la formación oficina. El espesor varía de 825 a 3000 pies. Cabrera y Di Gianni (1994), ubican a la Formación Freites en el Mioceno Medio. Los microfósiles reportados por Jam y Santos</p>

	<p>(1987) pertenecen al tope del Mioceno Medio-base del Mioceno Tardío. Presenta una gruesa sección de lutitas al norte, que en Carabobo va siendo reemplazada por cuerpos de arenas que aumentan al sur, en esta área, la formación reduce su espesor desde 550 m en el norte a 73 m en el sur. La formación se vuelve más arenosa en cuanto más se adelgaza en el área Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco. Las variaciones verticales en el contenido de arcilla, lutita, limo y siderita permiten una excelente correlación (Fiorillo, 1983). Las lutitas y arcillas de la unidad constituyen el sello principal de los reservorios petrolíferos de la Formación Oficina en el área Mayor de Oficina, y contienen, en la parte inferior, arenas productoras de hidrocarburos en algunos campos de la parte media y sur de esa área. Representa el máximo de la segunda transgresión mayor del Mioceno.</p>
<p>Fm. Las Piedras</p>	<p>Areniscas micáceas, friables, de grano fino y colores gris claro a gris verdoso, interlaminada con lutitas gris a verdoso, arcillitas sideríticas, grises, lutitas ligníticas y lignitos (Hedberg, 1950). Reflexiones de cierta amplitud y regular asistencia. González de Juana (1946) la colocó en el Plioceno. Los pocos fósiles y sus relaciones estratigráficas indican una edad de Mioceno Tardío a Plioceno. El ambiente de sedimentación se relaciona con los de aguas dulces a salobres según Hedberg (1950).</p>
<p>Fm. Mesa</p>	<p>Arenas de grano grueso y gravas, con cemento ferruginoso, cementadas y muy duras; conglomerados rojos a casi negro; arenas blanco amarillentas, rojo y púrpura, con estratificación cruzada, además contiene lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita (González de Juana, “et. al” 1980). Según González de Juana “et. al” (1980), la Formación Mesa presenta una edad Pleistoceno representada por una sedimentación fluvio-deltáica y paludal, resultado de un extenso delta que avanzaba hacia el este en la misma forma que avanza hoy el delta del Río Orinoco. Coplanarh (1974) considera que los sedimentos de la formación representan depósitos torrenciales y aluviales, contemporáneos con el levantamiento de la Serranía del</p>

	<p>Interior. En el área de Carabobo las formaciones Las Piedras y Mesa se consideran una sola unidad, debido a la difícil correlación que presentan, ocupan el tope de la columna sedimentaria en toda el área de la faja. La litología es homogénea y consiste principalmente de grandes “paquetes” de arena de grano grueso y gravas con aumento ferruginoso, en menos cantidades carbonosas y lutíticas; estas formaciones contienen grandes cantidades de agua dulce para el uso doméstico, para la perforación de pozos, producción de vapor, desalinización de crudo, etc. (Fiorillo, 1983).</p>
--	--

2.4. SISTEMA PETROLERO DE LA FPO

La cuenca petrolífera de la Faja del Orinoco, es considerada una de las reservas de crudo y gas más importantes del mundo. Según (Talukdar, 1985), los sistemas petroleros son el conjunto de condiciones físico-químicas necesarias para la generación, migración y acumulación de Hidrocarburos, en un determinado espacio y tiempo geológico; dentro la FPO, estos sistemas son considerados estructuralmente complejos, debido a la distribución de sus trampas (migración) y a los contactos entre el agua y las arenas petrolíferas (acumulación).

2.4.1 Roca Madre:

La roca madre por excelencia es la Formación Querecual. (Talukdar, 1985) proyecta que son lutitas pelágicas depositadas en condiciones anoxicas profundas, durante la máxima transgresión marina cretácica. Como lo evidencia su alto contenido de materia orgánica, color oscuro, pirita, y laminaciones milimétricas.

La localidad tipo está descrita en el Río Querecual, al noreste del estado Anzoátegui (Venezuela), con un espesor de 700 m. También, (González de Juana 1980) plantea que la sección consiste en afloramientos casi continuos de calizas negras laminadas y masivas con concreciones discoidales de calcita y su parte superior se caracteriza por presentar calizas silíceas, dolomíticas y algunos niveles de ftanita negra pura, también presenta abundante pirita, responsable de las fuentes sulfurosas. La edad de la Formación Querecual, basado en micro y microfósiles comprende el inter-

valo desde el Albiense a Santoniense (Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela, 1997).

2.4.2 Roca recipiente:

(Talukdar, 1985) describe que las rocas recipientes están compuestas principalmente por areniscas fluviales, que poseen un gran contenido caolínico. Estas a su vez suprayacen discordantemente al Basamento Ígneo–metamórfico. El intervalo correspondiente a la formación oficina y formación morichal presentan la particularidad de poseer arenas con fluidos de diferentes viscosidades por tanto se ha dividido en diferentes yacimientos, con crudos de variados grados API. (PDVSA-Proyecto Magna reserva, 2006).

2.4.3 Trampas:

Los factores de entrapamiento se pueden delinear, debido a las series de fallas normales con rumbo aproximado este-oeste en arenas fluvio-deltaicas; y a los canales fluvios deltaicos cortados por estas fallas. Los hidrocarburos dentro de la FPO, se alojan en este tipo de trampas, las cuales buzcan principalmente al norte. Para la formación oficina se presenta un tipo combinado de entrapamiento (estratigráfico–estructural), generado por la distensión entre la placa suramericana y norteamericana, durante el Paleozoico. Algunas fallas pertenecientes a este sistema se extienden a lo largo de toda la cuenca y se presentan como líneas de bisagra. (PDVSA-Proyecto Magna reserva, 2006).

2.4.4 Migración:

El proceso de migración según (Tissot y Welte, 1984), se presenta como el resultado del desplazamiento de los hidrocarburos la formación Querecual hasta las arenas de la formación oficina. Esto asociado esencialmente con el fallamiento regional y a los eventos tectónicos recientes. El movimiento del fluido ocurre desde el eje central de la cuenca, hacia el norte y sur (Escudo Guayanés). (PDVSA-Proyecto Magna reserva, 2006).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los principios teóricos que soportan la presente investigación, así como la metodología de las técnicas a usar para la adquisición de datos que conllevan al cumplimiento de los objetivos del presente trabajo.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Minerales Pesados

Los minerales pesados se definen como aquellos minerales accesorios de las rocas que tienen ordinariamente una gravedad específica mayor a 2,6 gr/cm³ que es el peso específico del bromoformo (el líquido pesado más utilizado en la separación de minerales), como los minerales pesados se presentan comúnmente diseminados en un sedimento en cantidades muy pequeñas, generalmente menos del 1%; su separación y concentración de los minerales livianos se logra a través de los diferentes análisis (Milosvski, 1982).

Según (Boggs, 2009) los minerales pesados pueden dividirse convencionalmente en tres grupos: ligeros hasta 3.0 gr/cm³, medios de 3.0 a 4.0 gr/cm³ y pesados más de 4.0 gr/cm³ (Milosvski et al., 1982).

Estos minerales pesados pueden ser opacos (ilmenita, magnetita, hematita, leucoxeno, limolita y piritita) o no opacos (apatito, zircón, olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno, granate, epidoto, anfíboles, zoisita, clinozoisita, cianita, sillimanita, andalucita, estaurolita, monacita, rutilo, esfena (titanita), rutilo, turmalina, entre los más comunes.

Tabla 3.1 Lista de minerales pesados más comunes. Datos tomados del manual de mineralogía Klein y Hurlbult (2002).

Nombre	Formula Química
Turmalina	$\text{Na(Fe, Mg, Al, Li)}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$
Apatito	$\text{Ca}(\text{PO}_4)_3(\text{F, Cl, OH})$
Espondunema	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
Andalucita	Al_2SiO_5
Horblenda	$\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{Al, Fe, Ti})_3\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg, Fe})_4(\text{O, OH})_2$
Silimanita	Al_2SiO_5
Diópsido	$\text{Ca}(\text{Mg, Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$
Olivino	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$
Estantita	MgSiO_3
Epidota	$\text{Ca}_2(\text{Al, Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})_2$
Esfena	CaTiSiO_5
Topacio	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F, OH})_2$
Diamante	C
Granate	$(\text{Mg, Fe, Mn, Ca})_3(\text{Al, Fe, Cr})_2(\text{SiO}_4)_3$
Espinela	MgAl_2O_4
Cianita	Al_2SiO_3
Estauroлита	$\text{FeAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Anastasa	TiO_2
Rutilo	TiO_2
Gahnita	ZnAl_2O_4
Cromita	FeCr_2O_4
Ilmenita	FeTiO_3
Circón	ZrSiO_4
Monacita	$(\text{Ce, La, Y, Th})\text{PO}_4$
Magnetita	Fe_3O_4
Hematita	Fe_2O_3
Casiterita	SnO_2
Oro	Au
Platino	Pt

Según (Perkins, 2010) otra clasificación de estos minerales viene dada por su diafanidad, separándolos en minerales opacos y no opacos referida a la propiedad de transmitir o no la luz polarizada cuando se examinan en láminas delgadas (tabla 3.2).

Tabla 3.2 Clasificación de los minerales pesados según su diafanidad. Datos tomados del Boog (2006).

	ESTABLES	METAESTABLES
OPACOS	Hematita, ilmenita	Leucoxeno, magnetita
NO OPACOS	Circón, turmalina, rutilo, anatasa, corindón	Anfíboles, piroxenos, granate, clorita, apatito, epidota, olivino, sillimanita, esfena, estaurolita, topacio, monacita, zoisita, clinzoisita y además de unos 100 a otros de menor importancia volumétricamente.

3.2.2 Separación de Minerales Pesados

Utilizando un líquido denso, una mezcla de granos de mineral, de diferentes densidades, puede separarse en dos fracciones: la que se hunde (minerales pesados) y la que flota; los (minerales ligeros). Manipulando la densidad del líquido se pueden hacer más separaciones. El término mineral pesado, se aplica normalmente a los minerales que se hunden en bromoformo (densidad 2,9). En el estudio de rocas arenosas el proceso de separación de minerales pesados es de gran importancia, puesto que facilita una pequeña proporción de minerales densos (Milosvski, 1982). Ejemplo de minerales pesados que se consiguen separar son: turmalina (ciclosilicatos), zircón, hornblenda y esfena.

3.2.3 Correlaciones Estratigráficas

Vera (1994), define la palabra correlación desde varios puntos de vista, en el lenguaje no científico la define como principal acepción: “correspondencia o relación recíproca entre dos o más cosas”. En el conjunto de las ciencias geológicas el término

“correlación” se usa de manera preponderante en el campo de la estratigrafía, y casi siempre con una connotación temporal. En el glosario de geología (Bates y Jackson, 1987) se define “correlación” como la demostración de la equivalencia de dos o más fenómenos geológicos en diferentes áreas”. Correlacionar, en el sentido estratigráfico, es “establecer la correspondencia en carácter y en posición estratigráfica” (GEI, 1980). La correlación estratigráfica es una de las técnicas de mayor interés en la estratigrafía y consiste en comparar dos o más secciones estratigráficas, de un intervalo de tiempo semejante, estableciendo la equivalencia entre los niveles o superficies de estratificación reconocibles en cada una de ellas. (Modificado de Vera, 1994).

3.2.4 Escalas de Correlación

Correlación local: Es la correlación estratigráfica entre dos o más secciones estratigráficas relativamente cercanas entre sí. (Modificado de Vera, 1994)

Correlación regional: Es la correlación entre secciones estratigráficas más distantes entre sí, pero dentro de la misma cuenca sedimentaria, esta constituye el elemento esencial para realizar el análisis estratigráfico de la cuenca, incluido el estudio paleogeográfico de la misma.

Correlación global: Es la correlación entre secciones de áreas geográficas muy distantes entre sí, y tiene una doble finalidad, una contribuyen como datos necesarios para elaborar la sección estratigráfica ideal del conjunto de la Tierra, a la que se ha llamado “Registro Estratigráfico”, y por otra parte, permite valorar si los rasgos estratigráficos reconocidos en una sección estratigráfica concreta, son debido a fenómenos alocíclicos o autocíclicos (incluidos los globales). (Modificado de Vera, 1994).

3.2.5 Métodos de Correlación

Vera (1994) define los métodos de correlación, como una medida de similitudes que facilite la demostración de la equivalencia de dos unidades estratigráficas o superficies de estratificación en diferentes secciones estratigráficas y los clasifica de la siguiente manera:

Métodos físicos: Estos incluyen todos los métodos basados en la observación y/o en la medida de sus propiedades físicas (incluida la propia litología) de las dife-

rentes rocas representadas en las secciones estratigráficas que se quieren comparar. Dentro de los métodos físicos se diferencian cinco tipos:

- a) Método de autocorrelación: el cual se basa en la continuidad de las superficies de estratificación (o determinados reflectores) y aplicables tanto en campo como en perfiles sísmicos.
- b) Método litológico: propiamente corresponde a la litocorrelación o correlación litológica y se basan en los cambios litológicos bruscos y en la presencia de algunos niveles de litologías especiales detectados a simple vista en el campo (niveles guías), o reconocidos instrumentalmente, entre ellos los destacados mediante estudios de laboratorio (como los componentes mayoritarios y minoritarios).
- c) Métodos basados en propiedades físicas: estos agrupan las técnicas en las que los datos que se comparan son leídos por medidas instrumentales de diferentes propiedades físicas de los materiales.
- d) Métodos magnetoestratigráficos: el cual implica el reconocimiento en cada una de las secciones estratigráficas de la zonación magnetoestratigráfica, es decir, los diferentes intervalos con polaridad normal o inversa presentes.
- e) Método de los registros de pozo: este método constituye un excelente criterio de correlación entre secciones estratigráficas, levantadas a partir de perforación de pozos relativamente cercanos, y en todo caso dentro de una misma cuenca sedimentaria. Normalmente se utilizan como criterio de correlación, combinándolos con la información litológica obtenida durante la perforación de los pozos (ripios y núcleos). Este método corresponde a una correlación litológica ya que los datos obtenidos mediante los registros (electrofacies) reflejan esencialmente la litología de los materiales atravesados en la perforación. Los cambios litológicos quedan reflejados en cambios de electrofacies y pueden ser el reflejo de cambios bruscos simultáneos en una cuenca o sector de la misma, por lo que también pueden ser criterios de cronocorrelación.

3.3. PROCEDIMIENTOS DE SEPARACIÓN DE MINERALES PESADOS

Las técnicas de separación de minerales actualmente son muy utilizadas en la geología, para tratar de obtener información de interés acerca de las propiedades físico-químicas de algunos minerales y así proyectar datos sobre la procedencia y edad de los mismos (Anaya, 2004).

La separación de minerales se efectúa, como se señaló anteriormente aprovechando algunas de sus propiedades físicas como la forma cristalina, susceptibilidad magnética y su densidad. Para ello, es necesario contar con los equipos necesarios para lograr realizar dicha separación.

3.3.1. Separación Magnética Manual

Es el proceso utilizado para concentrar minerales que poseen diferencias en sus susceptibilidades magnéticas, es decir, separa minerales que responden en forma diferente ante la aplicación de un campo magnético “imán común” (Vera, 1994).

3.3.2. Separación Magnética vía Magnet-Lift

El equipo Magnet-Lift utiliza la susceptibilidad magnética para separar los minerales magnéticos de los no magnéticos. Este equipo está compuesto por un riel con dos canales, donde se dispone una bobina que genera un campo magnético y por donde se produce la separación dependiendo de la susceptibilidad magnética; la fracción del campo magnético se puede ajustar mediante un amperímetro que dispone este dispositivo (Anaya, 2004).

Las muestras procesadas al momento de realizar la separación, deberá estar en el carril vibratorio, dispuesta a pasar por el entre hierro, en ese momento es cuando se analizan los principios de la separación magnética, así, las fuerzas que actúan sobre una partícula dependen en mayor o menor medida del campo magnético generado por el equipo, las fuerzas que operan son: fuerza magnética (F_m), fuerza gravitacional (F_g), fuerza centrífuga (F_c) y la fuerza de empuje (F_e).

3.3.3. Separación por Líquidos Densos (bromoforno $>2,96\text{g/cm}^3$)

Los líquidos pesados se emplean para la separación de granos de minerales, ya que poseen una alta gravedad específica y baja viscosidad que permiten que minerales se hundan en bromoforno (densidad 2,9). Se aplica normalmente a los minera-

les pesados (Anaya, 2004).

A veces se manipulan diversos líquidos de densidad relativa, para lograr la separación de los granos de minerales. Los dos líquidos que se utilizan comúnmente, son el bromoformo y el yoduro de metileno (CH_2I_2). Por ejemplo, la separación de minerales en una arena compuesta se podrá realizar lavando la muestra y después de lavar se hundan en bromoformo, donde los minerales más livianos flotarán y los pesados se irán al fondo (Mange, 2007).

3.3.4. Separación Magnética Isodinámica Frantz

El separador isodinámico es un equipo que consta de un riel de aluminio (chute) con dos canales terminan en dos recolectores de aluminio; donde se separan los sedimentos magnéticos de los no magnéticos. Esta separación se realiza mediante electroimanes dispuestos en la parte interna del Frantz, que realiza la vibración para que por gravedad decanten los sedimentos. La intensidad de vibración así como el amperaje pueden ser controlados por manillas dispuestas en la parte externa del equipo (Anaya, 2004).

3.4. RECONOCIMIENTO DE MINERALES PESADOS

El reconocimiento de minerales pesados, es una de las técnicas más ampliamente usadas en la exploración de hidrocarburos; ya que, muchos de estos minerales poseen propiedades físicas y químicas específicas que ayuda a mejorar la aplicación de nuevas técnicas analíticas avanzadas y de análisis de datos numéricos. Una de las principales razones para realizar el análisis de minerales pesados es la amplia variedad de dichos minerales detríticos encontrados en las areniscas, además de proporcionar una idea del control hidráulico; desde que inician procesos mecánicos y el desplazamiento desde su roca madre hasta que los minerales pesados, son extraídos los componentes en un sedimento para el estudio y los fragmentos líticos, para datar en tiempo geológico y ubicar en tiempo y espacio la cuenca en estudio.

Para el reconocimiento de los minerales pesados se requiere poseer equipos mecánicos que facilitan las técnicas de separación de los mismos. A continuación, se mencionan los diferentes dispositivos:

- a) Trituradora de mandil o dientes: esencialmente consta de dos placas de hierro instaladas de tal manera que una de ellas se mantiene fija y la otra tiene movimiento, durante la cual se logra fragmentar la muestra que entra al espacio comprendido entre las dos placas (cámara de trituración). El nombre de estas trituradoras viene del hecho de que las placas se asemejan a las mandíbulas de un animal, por eso, la placa fija suele llamarse mandíbula fija y la otra placa, mandíbula móvil.



Figura. 3.1 Trituradora de dientes, Laboratorio de Metalurgia UCV.

- b) Trituradora de rodillos: este equipo se realiza la trituración de los trozos de muestras de las rocas recogidos en el procedimiento anterior. La trituración se lleva a cabo entre los rodillos giratorios, colocados uno

frente al otro; la muestra que se va a triturar se coloca por el cono ubicado en la parte superior y luego, la roca triturada cae por la abertura de la parte inferior.



Figura. 3.2 Trituradora de Rodillos, Laboratorio de Metalurgia UCV.

- c) Pulverizadora de disco: este equipo básicamente consisten en un eje vertical largo articulado por la parte superior a un punto y por la parte inferior a un excéntrico. Este eje lleva consigo un cono triturador. Todo este conjunto se halla ubicado dentro el cóncavo o cono fijo exterior, por donde se colocan las muestras; y se recogen en la parte inferior pulverizas.



Figura. 3.3 Pulverizadora de Disco, Laboratorio de Metalurgia UCV.

- d) Mesa de Wilfley: posteriormente se utilizara la mesa vibratoria, la cual realiza la separación de minerales livianos y pesados. Esta mesa consiste de un tablero rectangular inclinado transversalmente; en el borde del tablero tiene un canal distribuidor por donde se colocan las muestras, y se acciona el flujo de agua. Los sedimentos se repartirán con la corriente de agua, luego se irán recolectando por fracciones de acuerdo a las siete salidas: los tres primeros a la izquierda serán los minerales pesados y los restantes son los livianos.



Figura. 3.4 Pulverizadora de Disco, Laboratorio de Metalurgia UCV.

3.5. PROPIEDADES Y SUCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LOS MINERALES

Los minerales pueden ser separados en base a su orden de susceptibilidad magnética. La susceptibilidad magnética es una medida que relaciona la facilidad con la que algunos minerales en particular, se magnetizan al someterse a un campo magnético. Este parámetro puede expresarse como la razón entre la magnetización inducida del material y la intensidad del campo magnético, de allí que los minerales pueden clasificarse según el valor de su susceptibilidad magnética en tres grupos principales: Diamagnéticos (χ_0) y Ferromagnéticos ($X^{(\infty)}$).

3.5.1 Minerales Ferromagnéticos

Son aquellos que presentan en su composición química, hierro, níquel y cobalto. Entre ellos podemos señalar la ilmenita, magnetita, pirrotita, estos minerales tienen como característica que pueden ser separados con un imán de mano; ya que presentan magnetización completa y permanente. Los materiales ferromagnéticos tienen susceptibilidades positivas y relativamente altas. Sin aplicar un campo magnético externo la interacción de los momentos magnéticos de sus átomos resulta en un comportamiento colectivo de grupos de átomos, llamados dominios. En los elementos hierro, cobalto y níquel esta interacción es característica para los espines no compensados de los subpisos 3-d de sus átomos. Estos elementos pueden lograr un estado de imantación espontáneo consistente en la configuración ordenada de los momentos magnéticos de todos los átomos. Aplicando un campo magnético los dominios se alinean en configuraciones paralelas y con sus ejes longitudinales paralelas a la dirección del campo externo de tal modo generando una susceptibilidad magnética alta. A los cuerpos ferromagnéticos corresponden ciclos de histéresis típicos (Vázquez, 2001).

3.5.2 Minerales Paramagnéticos

Se denominan minerales paramagnéticos aquellos cuya susceptibilidad magnética es muy poca; incluye silicatos ferromagnesianos como el granate, piroxenos, anfíboles así como los fosfatos y algunos minerales accesorios, estos pueden ser atraídos con la influencia de un campo magnético intenso. Los materiales paramagnéticos son ligeramente magnéticos, caracterizados por susceptibilidades magnéticas pequeñas positivas.

En los materiales paramagnéticos la susceptibilidad magnética es inversamente proporcional a la temperatura absoluta según la Ley de Curie. La mayoría de los componentes formadores de las rocas como por ejemplo los silicatos comunes son para o diamagnéticos. Los granos de materiales para y diamagnéticos tienden alinearse con sus ejes longitudinales transversal u oblicuamente con respecto al campo externo aplicado.

Los átomos o las moléculas de los materiales paramagnéticos están caracte-

rizados por un momento magnético en ausencia de un campo externo y por una interacción magnética débil pasando entre sus átomos. Normalmente sus átomos están distribuidos al azar, pero aplicando un campo externo tienden alinearse paralelamente a la dirección del campo. Esta alineación es una tendencia, que se opone a su agitación térmica.

El paramagnetismo se basa en los espines (momentos magnéticos) no compensados de los electrones, que ocupan capas atómicas incompletas como los subpisos de los elementos escandio y manganeso por ejemplo. Minerales paramagnéticos son olivino, piroxeno, anfíbol, granate y biotita. En un separador magnético dependiendo de sus susceptibilidades magnéticas respectivas estos minerales son imantados a distintas intensidades del campo magnético engendrado por el separador magnético (Vázquez, 2001).

3.5.3 Minerales Diamagnéticos

Son minerales los cuales ante un campo magnético, reaccionan creando otro campo magnético opuesto, repeliéndolo. Los materiales diamagnéticos están caracterizados por susceptibilidades magnéticas negativas, lo que significa, que la imantación inducida en ellos está orientada en sentido opuesta con respecto al campo externo aplicado. Las susceptibilidades magnéticas de la mayoría de los materiales diamagnéticos no dependen de la temperatura. Solo las susceptibilidades magnéticas de antimonio y bismuto varían a $T = -180^{\circ}\text{C}$. Materiales diamagnéticos son entre otros las sales, la anhidrita, cuarzo, feldespato y grafito.

El diamagnetismo se basa en el movimiento de un electrón alrededor de su núcleo generando una corriente de poca intensidad. El momento magnético (o espín) es un vector, que en presencia de un campo magnético externo toma un movimiento de precesión alrededor de este campo externo. Este movimiento periódico adicional del electrón produce un momento magnético orientado en sentido opuesto con respecto al campo aplicado. El diamagnetismo puro sólo aparece si los momentos magnéticos de los átomos son nulos en ausencia de un campo exterior como en los átomos o iones que poseen capas electrónicas completas (Vázquez, 2001).

3.6 MÉTODOS ISOTÓPICOS DE ANÁLISIS DE PROCEDENCIA DE SEDIMENTOS

La aplicación de estudios de minerales pesados en la caracterización de los procesos geológicos ha tenido un gran desarrollo en los últimos años. Para el caso de los estudios de procedencia de sedimentos terrígenos, estas técnicas han complementado enormemente la información obtenida por medio de la petrografía.

En las últimas dos décadas se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la composición química de las rocas detríticas (elementos mayores, trazas, tierras raras y últimamente de isótopos) y de los cambios que ocurren a lo largo del ciclo sedimentario, con el objetivo de entender la relación que existe entre la composición de la roca que dio origen al sedimento y la de la roca que resulta de la litificación de dicho sedimento (Bathia y Crook, 1986; Taylor y MacLennan, 1985; McLennan, 1989).

Las rocas sedimentarias que favorecen este tipo de análisis son las terrígenas de grano fino (lutitas, limolitas y areniscas finas), ya que el reducido tamaño de grano permite contar con una muestra homogénea de tamaño pequeño, aunque también se han realizado estudios geoquímicos de clastos individuales en conglomerados.

Tabla 3.3 Asociaciones de minerales pesados para el estudio de procedencia. Tomado de Carver (1971).

Asociación	Fuente
Apatito, biotita, brookita, circón, hornablenda, monacita, moscovita, rutilo, titanita, turmalina (variedad rosada).	Rocas ígneas félsicas
Casiterita, fluorita, granate, monacita, moscovita, topacio, turmalina (variedad azul), wolframita, dumortierita, xenotima.	Pegmatitas graníticas
Augita, cromita, diópsido, hiperstena, ilmenita, magnetita, olivino, cromita.	Rocas ígneas máficas
Andalucita, condrodita, corindón, grana-	Rocas producto de metamorfismo de

te, estaurolita, flogopita, topacio, vesuvianita, wollastonita, zoisita.	contacto
Andalucita, cianita, cloritoide, epidota, estaurolita, glaucofana, granate, sillimanita, titanita, zoisitaclinozoisita.	Rocas producto de metamorfismo dinamotermal
Barita, circón (fragmentos redondeados), leucoxeno, minerales de hierro, rutilo, turmalina (fragmentos redondeados).	Rocas sedimentarias
Diamante, picroilmenita, magnetita, piropero, Cr-diópsido, Cr-espinela, circón.	Kimberlitas

Los elementos texturales en una roca sedimentaria dendrítica son aquellos que en conjunto definen la textura de la roca y que comprende tres propiedades fundamentales:

- a) Tamaño de grano.
- b) La forma de los granos (forma, redondez, esfericidad).
- c) Entramado (empaquetamiento y orientación).

El tamaño de una partícula no se puede definir con precisión a menos que sea una partícula perfectamente esférica o cubica. Para partículas irregulares como los granos de arena, el tamaño dependerá de método de medición usado, así como el objeto de estudio. Entre más desigual sea la partícula, la discrepancia entre las diferentes medidas será mayor. El tamaño de una partícula se puede medir por diferentes métodos para obtener el diámetro: superficial, volumétrico, de área proyectada, de tamaño de malla, de Stoke, etc.

La forma de los granos es efecto de intemperismo y erosión que estos sufren por procesos de transporte y durante la sedimentación. Estas propiedades revelan la modificación de granos, angulares de variadas formas por los efectos de abrasión, solución y clasificación. La forma de los granos en arenisca varia ampliamente, desde esferas hasta discos o tubos. Se define por tres radios o ejes de una partícula largo (L), intermedio (I) y corto (S).

La esfericidad (E) es un parámetro cuantitativo que mide la “lejanía” de un

cuerpo a la equidimensionalidad o sea la medida de que tan iguales son las dimensiones axiales de un grano. Para obtener esta medida de manera cualitativa en una lámina delgada se cuanta con un marco de comparación ya establecido, de donde podemos determinar una esfericidad alta y baja.

La redondez (R) representa la forma de las aristas del grano esto es, la curvatura de las esquinas; se produce por impacto entre granos durante el movimiento, los granos más grandes se impactan con más fuerza por lo que pueden presentar una mayor redondez. Indica la cantidad de abrasión que han sufrido los granos y representa la historia de transporte, pero no necesariamente la distancia. Los granos bien redondeados son resultado de muchos ciclos de transportes o de abrasión intensa; se mide por lo general por comparación visual de granos del mismo tamaño y frecuentemente se usa el cuarzo.

La redondez de los clastos representa la magnitud y el tipo del transporte. Un transporte gravitacional coluvial corto (sin agua) produce clastos angulares. Con la entrada de los clastos al sistema fluvial empieza el desgaste y las partículas pierden su angulosidad. Pero la rapidez para redondear los cantos depende de algunos factores:

- a) Tamaño y petrología del clasto.
- b) Clastos pequeños generalmente demoran más tiempo para redondearse.
- c) Clastos de cuarzo son más resistentes.

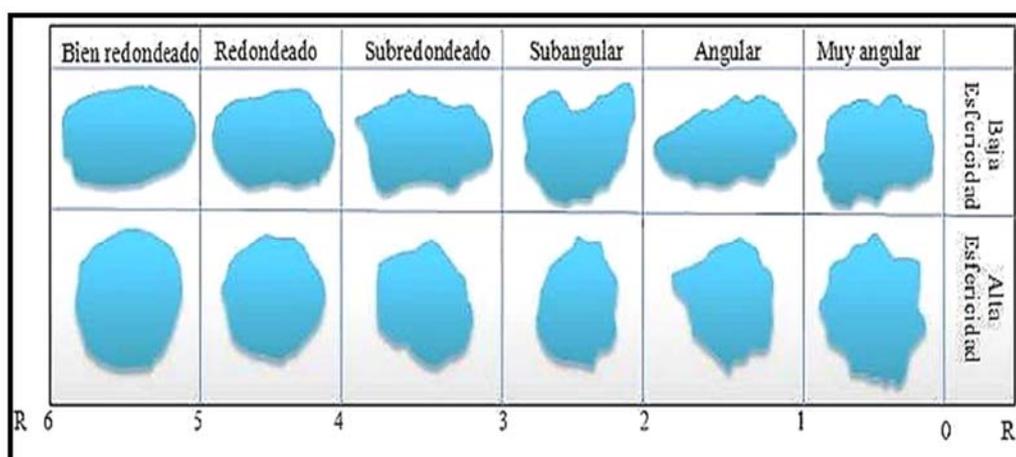


Figura. 3.5 Carta índice de esfericidad y redondez. (Tomado y modificado de Adams y Cols, 1997).

3.7 REGISTROS DE POZOS

Los registros de pozo (en inglés well logs o wireline well-logs), son métodos geofísicos aplicados a las paredes de una perforación, generalmente antes de su entubación, que complementan de manera muy importante las muestras de núcleo extraídas del mismo (cuando se extraen). En la prospección petrolera, en pozos cercanos a veces se prescinde de la toma de muestras, ya que se confía totalmente en poder comprar con el máximo detalle, los materiales cortados con el pozo nuevo con los del antiguo, mediante los registros de pozo.

Entre dos pozos cercanos los registros de pozo constituyen, normalmente la técnica de correlación con mayor precisión. Según de Vera (1994), los patrones de registros pueden ser usados a tres niveles de interpretación: (a) Determinación de una secuencia vertical y arquitectura de las capas. (b) Reconocimiento y cartografía de facies. (c) Interpretación de ambientes depositacionales. Serra (s.f.e) menciona que la interpretación de los datos geofísicos de superficie con la interpretación geológica se verá considerablemente simplificada y será más confiable, si se apoya en los datos de perfiles de pozos.

Por lo tanto, los datos de perfilajes proveen el vínculo entre la geofísica de superficie y la geología. Los perfiles de pozo constituyen el único medio para lograr una conversión precisa de los datos de tiempo a los datos de profundidad. Además, permiten transferir los datos de frecuencia y amplitud de la señal a datos sedimentológicos o económicos (facies, porosidad, contenido de fluidos, etc.). Los perfiles de pozo son de especial interés ya que proveen la única fuente de datos que brinda, con precisión, información sobre la profundidad y sobre el espesor aparente, e incluso real, de las capas si se han registrado un perfil de buzamiento. Dan un análisis casi continuo de las formaciones. Generalmente, analizan un volumen de roca que es mucho más importante que el representado por los testigos de corona y consecuentemente que el de los recortes de perforación. Por lo tanto, los perfiles son más representativos de las principales propiedades de las rocas, especialmente en rocas heterogéneas. Miden las propiedades de las rocas en las condiciones de la profundidad a la que se encuentran.

Es fácil de comprender que dicha información será más clara cuando el número y variedad de perfiles sea mayor. Se puede decir que las herramientas de registros de pozos son a la descripción de las rocas del subsuelo lo que los ojos y los instrumentos geológicos son a los afloramientos de superficie. De esta manera, pueden considerarse como una “expresión característica” de las rocas ya que ellos dependen de sus propiedades físicas. Las herramientas de perfilaje miden las características físicas de las formaciones perforadas. Estas características resultan, por un lado, de las condiciones físicas, químicas y biológicas que existían en el momento de la sedimentación y que caracterizan el ambiente y determinan las facies originales; y por el otro de la evolución a las que estuvieron sujetas estas formaciones durante la historia geológica.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe como se desarrolló la metodología y los procedimientos que se utilizaron para la separación e identificación de minerales pesados. Pertenecientes a muestras de núcleos, correspondientes a los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1; tomados del bloque Carabobo Faja Petrolífera del Orinoco a diferentes profundidades. Así como también, los ensayos utilizados y el funcionamiento de los equipos para el estudio de estos minerales.

4.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En esta fase se fundamentó en reunir material bibliográfico relacionado con el área de estudio, a nivel regional y local, y más específicamente antecedentes de minerales pesados en la F.P.O. El muestreo fue seleccionado por personal de la gerencia del departamento de exploración de PDVSA, para el análisis y separación de minerales pesados. Se sometieron las muestras a múltiples procedimientos, los cuales son explicados en este tomo.

4.3 ETAPA DE LABORATORIO

En esta segunda fase, se realizaron los todos los procedimientos a las muestras seleccionadas, para la separación de los minerales pesados; también se elaboraron las secciones montadas para el estudio petrográfico. Se comenzó esta etapa de separación con el tamizado, luego se realizó la separación por densidad de los minerales con la Mesa de Wilfley, se continuo con la separación magnética manual, posteriormente se hizo la separación magnética a través del equipo Magnet-lift y finalmente con el dispositivo de Separación isodinámico Frantz.

4.3.1 Tamizado

Esta primera etapa de separación de minerales pesados, se llevó a cabo en el laboratorio de termocronología en la escuela de Geología, Minas y Geofísica de la

Universidad Central de Venezuela. Fueron registrados los pesos iniciales (tabla 4.1), de las cuatro muestras en estudio previo al tamizado.

Tabla 4.1. Peso inicial de las muestras para el tamizado.

Muestra	Pozos	profundidad	Peso (g)
M2	CH-2	3430' - 3431'	385
M1	CH-38	3296' – 3296'5''	308
M2	CRM-1	1901' – 1901'5''	264
M1	CNX-1	2627'3''- 2627'7''	396

Luego las muestras se lavaron con agua y desengrasante (suave), para eliminar los restos de fluidos de perforación. Después se dejaron secar y a continuación se colocaron sobre los tamices; se escogieron las mallas n° 60 y n° 200 (figura 4.1), para que los sedimentos “gruesos” fueran retenidos en la malla 60 y los finos pasaran a través de tamiz 200. Así comenzar la concentración de minerales pesados, según la clasificación Udden–Wenworth (1922). Finalmente, las muestras fueron etiquetadas con el nombre del pozo y la profundidad.



(a)



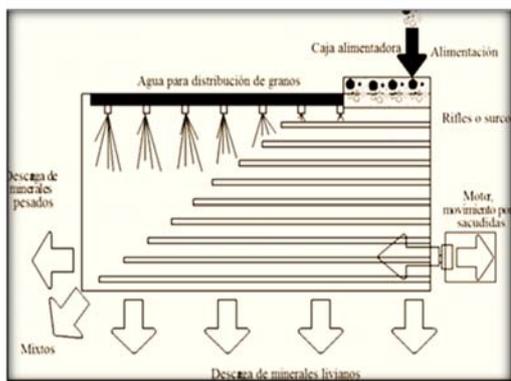
(b)

Figura 4.1 (a) Ilustración del Tamiz, (b) Fotografía donde se observa los tamices utilizados.

4.3.2 Mesa de Wilfley

Para obtener las fracciones de minerales pesados. Las muestras fueron llevadas a la mesa vibratoria, se utilizaron las muestras lavadas y secadas del retenido #200. En esta fase (después del tamizado), también se logró una fracción de minerales livianos; los cuales no se tomaron en cuenta para este estudio. La mesa de Wilfley realiza la separación de minerales livianos y pesados, utilizando la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga. Los sedimentos se separan con los movimientos que realiza la máquina de forma longitudinal y con la corriente de agua (Sánchez ,2011). Este dispositivo contiene un tablero rectangular inclinado transversalmente y en el borde del tablero posee un canal distribuidor, donde se colocaron las muestras, y se acciono el flujo de agua (figura 4.2 (c)).

Como se puede distinguir en la foto 4.2 (d), se denotan tres colores por separación de densidad, hacia la parte izquierda el color negro que concierne a los minerales pesados, luego una borde marrón que se corresponde con los minerales mixtos y finalmente hacia la parte derecha los livianos. Se fueron recolectado los tres primeros a la izquierda acuerdo a las siete salidas, que se corresponden con los minerales pesados. Se guardaron en bolsas plásticas y se rotularon con su identificación, para continuar la separación utilizando el imán común.



(c)

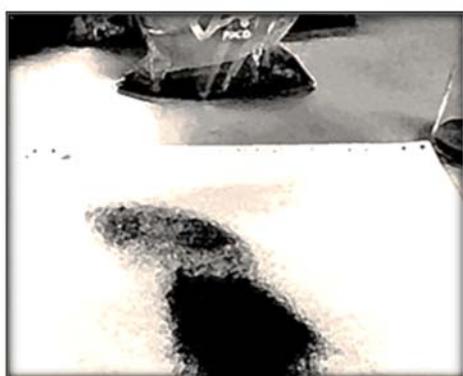


(d)

Figura 4.2 (c) Esquema del funcionamiento de la mesa de Wilfley. (d) Foto de la separación de minerales pesados con la mesa de Wilfley.

4.3.3 Separación Magnética Manual (imán común)

Las muestras de minerales pesados obtenidas en la mesa de Wilfley se dejaron secar, luego se procedió a pasar un imán común repetidas veces, sobre las muestras esparcidas sobre una hoja blanca de papel. El imán fue protegido con papel parafinado, para evitar que los granos se adhirieran directamente a él (figura 4.3). Con esta técnica se logró separar los minerales pesados con mayor susceptibilidad magnética, los cuales fueron guardados en bolsas plásticas rotuladas. La fracción no magnética obtenida, continuó para la separación con el magnet lift.



(e)



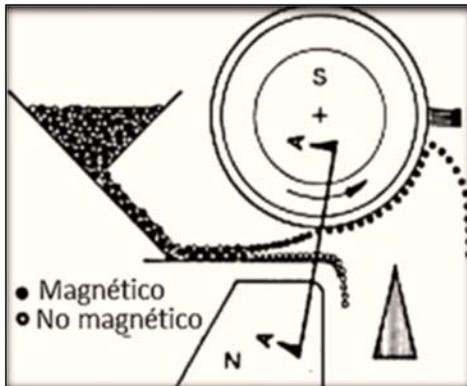
(f)

Figura 4.3 (e) Ilustración de la muestra esparcida sobre la hoja de papel, (f) Fotografía de la separación de minerales pesados con imán común.

4.3.4 Magnet–Lift

Obtenidas las muestras no magnéticas, luego del proceso de separación con el imán común; se pasaron por el magnet lift. Este equipo el cual es mostrado en la figura 4.4 (h), opera con electroimanes que pueden elevar los minerales magnéticos, logrando separar una fracción de minerales magnéticos y otra de minerales no magnéticos, según el comportamiento de los granos en el separador magnético (Anaya, 2004). El magnet lift cuenta además con un sistema de alimentación vibratoria, donde se esparcieron las muestras y se fue aumentando progresivamente el amperaje, desde 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 hasta 1.2 Amperios. Las fracciones de minerales no magnéticos

conseguidas se almacenaron en bolsas rotuladas con sus respectivas identificaciones, para continuar con una nueva fase de separación con el separador isodinámico Frantz figura 4.5 (j).



(g)

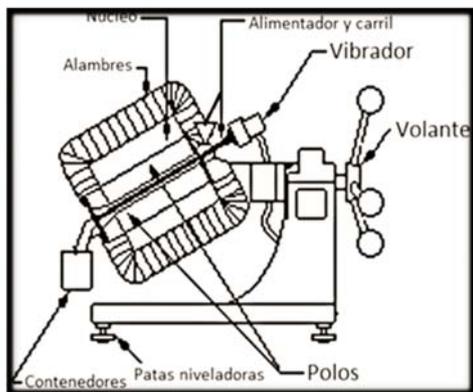


(h)

Figura 4.4 (g) Esquema de la separación de minerales, en fracciones magnéticas con el Magnet-Lift, (h) fotografía con el Magnet-Lift del laboratorio de termocronología de la UCV.

4.3.5 Separador isodinámico Frantz

Con el fin de continuar con la separación de minerales pesados de manera más precisa, las muestras identificadas como no magnéticas del magnet-lift, se colocaron en la alimentadora cónica del Frantz y se dejaron caer lentamente, para que comenzaran a bajar por el riel de aluminio debido al efecto de la gravedad y la vibración (figura 4.5 (j)). Este equipo dispone de una bobina que logra una separación de forma isodinámica, ya que, se genera un campo magnético (Díaz, 2004).



(I)



(j)

Figura 4.5. (i) Ilustración del separador isodinámico Frantz y sus partes, (j) Foto del separador Magnético Frantz, existente en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.

Con este procedimiento se logró finalmente obtener las cinco fracciones magnéticas de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, y 1.2 deseadas para realizar el estudio a los minerales pesados conforme al índice de susceptibilidad magnética (tabla 4.2).

Tabla 4.2 Minerales pesados separados por Frantz, obtenidos conforme al índice de susceptibilidad magnética. Tomado de Bermúdez y Anaya (2007).

Pendiente del equipo 20 ⁰			Pendiente del equipo 5 ⁰	
A	B	C	D	F
Imán de mano	magnéticos de 0.4 A	magnéticos de 0.8 A	magnéticos de 1 A	No magnéticos
Hematita	Ilmenita	Horblenda	Esfena	Circón
Pirotita	Granate	Hipersteno	Leucoceno	Rutilo
	Olivino	Augita	Apatitos	Anatasa
	Cromita	Actinolita	Andalucita	Brookita
	Cloritoide	Estaurolita	Monacita	Pirita
		Epidoto	Xenotima	Corindón

		Biotita		Topacio
		Clorita		Fluorita
		Turmalina		Cianita
				Silimanita
				Anhidrita
				Berilo

4.4. ETAPA DE OFICINA

En esta tercera etapa, se realizaron los análisis necesarios para la identificación y caracterización química de los minerales pesados, obtenidos en la fase de laboratorio. También durante esta etapa se realizaron los ensayos de Difracción de Rayos X a las muestras seleccionadas. Con el fin de conseguir los resultados y generar las conclusiones, a través de programas computacionales y estudios estadísticos.

4.4.1 Análisis Óptico de Minerales Pesados mediante el Microscopio Petrográfico

Para el estudio y la identificación de minerales pesados se utilizó el microscopio laica DMLP del laboratorio. Se tomaron la fracciones obtenidas con el Frantz (0.6A, 0.8A y 1A) correspondiente a los sedimentos de cada uno cada uno de los pozos en estudio.

Para el montaje de los granos, se aplicó una capa fina de resina epóxica a los portaobjetos y se esparció parte de la muestra para que se pegaran los minerales (teniendo cuidado de que no se contaminara la muestra) y se elaboraron láminas delgadas (figura 4.6 (k)).

Para el reconocimiento de los minerales con el microscopio petrográfico se utilizó la técnica de caracterización grano a grano. Además de luz polarizada para que los minerales pesados no se vieran opacos.



(k)



(L)

Figura 4.6 (k) Foto de las secciones montadas para el análisis, con el microscopio laica DMLP, (L) identificación de minerales pesados.

Finalmente, se elaboraron unos formatos (tabla 4.3), para registrar las principales características de los minerales identificados.

Tabla 4.3 Formato para registrar los minerales pesados identificados, a través del análisis óptico.

Pozo ()		
Profundidad ()		
Amperaje	Minerales Pesados (Identificados)	Observaciones

4.4.2 Difracción de Rayos X

Se trabajó con las muestras correspondientes a las fracciones de 1A no magnético obtenidas con el Frantz (figura 4.7). Para realizar la técnica de DRX, las muestras fueron llevadas al Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Este estudio proporcionó una identificación más precisa de los minerales pesados; se trabajó con una técnica experimental para el estudio y análisis de materiales, basada en el fenómeno de difracción de los rayos X por sólidos en estado cristalino. La unidad de medidas del rayo X es el angstrom (Å) equivalente a 10.8 cm, y los rayos X

usados en difracción y tiene como longitud de onda entre 0.5 y 2.5Å (Arcia y Viana, 2014). Se logró además obtener una representación de los espectrogramas, para su análisis posterior por medios matemáticos.



Figura 4.7 Fotografías de las muestras para el estudio de DRX, realizado en el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).

4.4.3 Análisis de Imágenes de Minerales Pesados mediante Image J

Se tomaron las láminas con los minerales pesados, montadas para ser analizadas con el microscopio petrográfico y se tomaron las fotos de los minerales pesados identificados, luego se editaron los granos con el programa computacional Paint (figura 4.8), de manera tal, que solo se estuviera el contorno de los minerales. Posteriormente se analizaron los valores de redondez y esfericidad; para este procedimiento se utilizó el software ImageJ (figura 4.9). De esta forma se generaron datos cuantitativos, con un margen de error inapreciable para la caracterización morfométrica, (Collins, 2007).

La figura 4.8 ilustra la forma como fueron editadas las fotografías tomadas a los minerales pesados, con el programa computacional Paint.

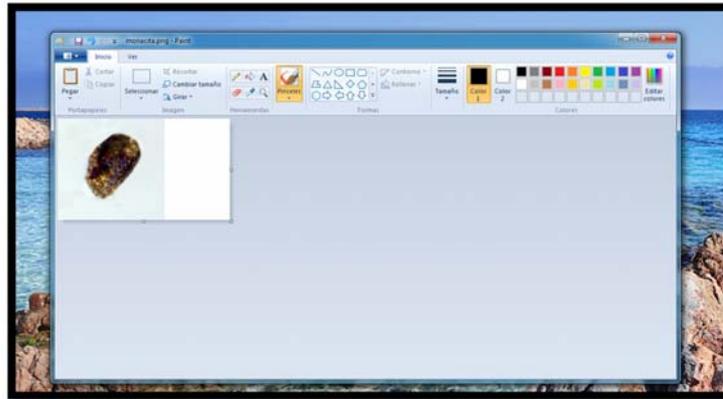


Figura 4.8 Imagen utilizando el programa Paint, para la edición de las fotografías tomadas a las secciones montadas.

Finalmente, se realizó un análisis de forma estadística para interpretar los resultados de esfericidad y redondez de manera teórica; y así estimar la distancia relativa de la roca fuente para los sedimentos de los pozos estudiados.

La figura 4.9 muestra de manera esquemática, los pasos a seguir para obtener los valores teóricos de esfericidad y redondez con el programa Image J.

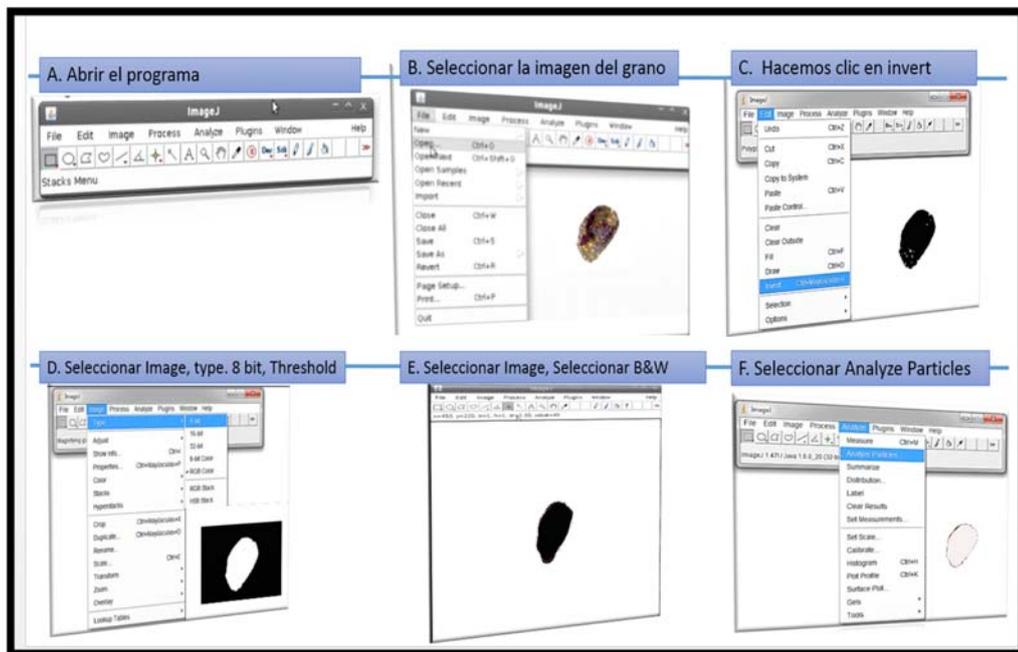


Figura 4.9 Procedimiento para calcular los valores de esfericidad y redondez con el programa Image J. (Elaboración propia, 2018).

La investigación se desarrolló alcanzando una serie de etapas, las cuales se describen a continuación (figura 4.10):

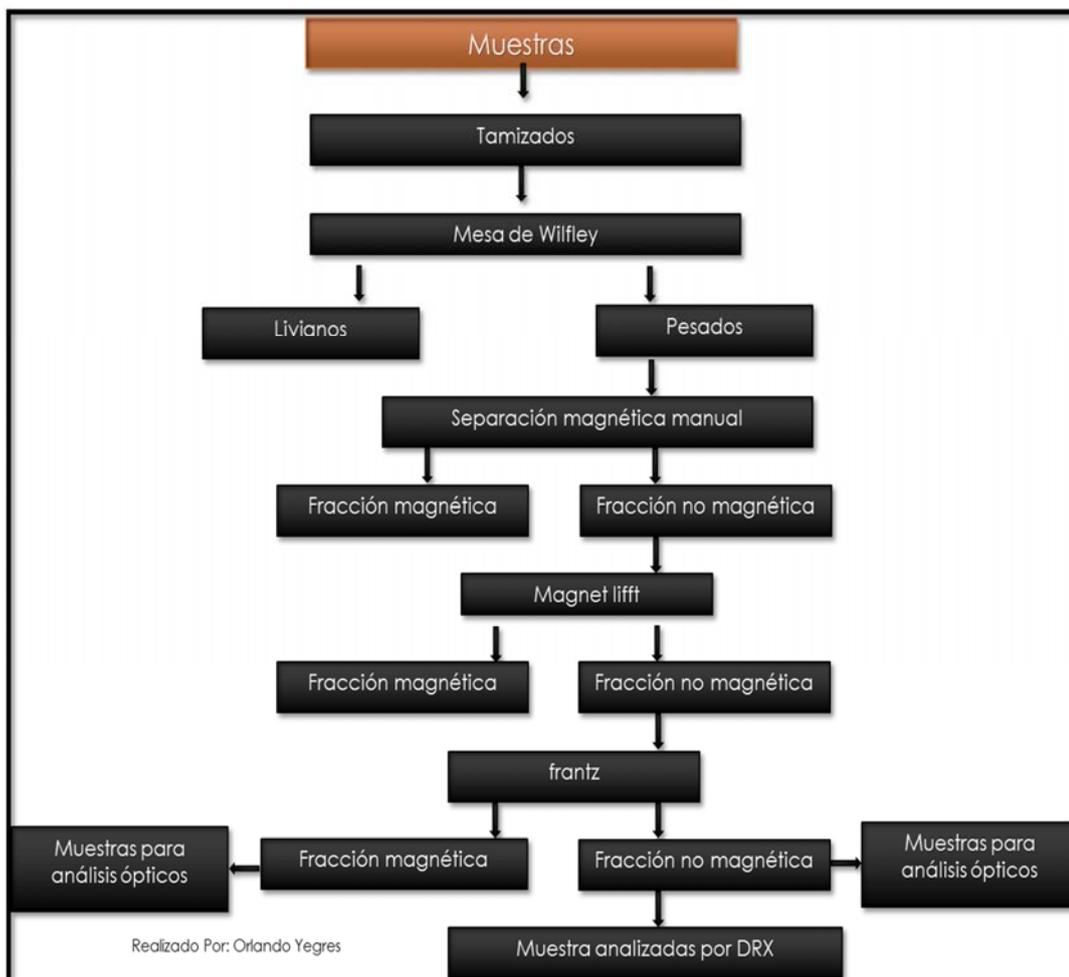


Figura 4.10 Resumen de la metodología utilizada en el estudio de minerales pesados. (Elaboración propia, 2018).

CAPÍTULO V
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Los resultados que se detallan a continuación, son las interpretaciones de los análisis realizados para las muestras de los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 del Bloque Carabobo de la FPO. Los estudios fueron consumados siguiendo los procedimientos esgrimidos en el diseño de la metodología; para lograr los objetivos inicialmente plateados, (separación mineralógica, identificación de minerales pesados con el uso del Microscopio Petrográfico, DRX y estudio de la morfología con Image J).

5.2. Análisis de las Fracciones Separadas con el Imán Común

A continuación se presenta la tabla 5.1, con los porcentajes obtenidos de minerales pesados, identificados mediante la separación con el imán común (altamente magnéticos); realizado para cada muestra correspondiente a los pozos en estudio.

Tabla 5.1 Tabla de minerales pesados, obtenidos con el uso del imán común.

Imán Común			
Pozos	Minerales pesados	Cantidad de Granos	Porcentaje
CH-2	Ilmenita y Hematita	32	25,39%
CH-38	Ilmenita y Hematita	40	31,74%
CRM-1	Ilmenita y Hematita	28	22,22%
CNX-1	Ilmenita y Hematita	26	20,63%

Resultado del contenido porcentual de minerales pesados identificados con el imán común, en los sedimentos de los pozos (figura 5.1).

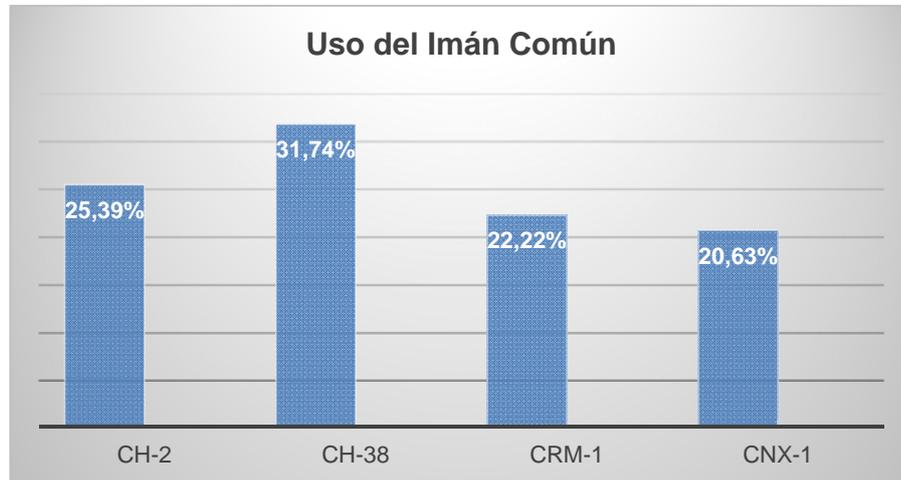


Figura 5.1 Gráfico de barras con la variación en los porcentajes de minerales pesados, obtenidos con el imán común; para las muestras de los pozos en estudio, pertenecientes al bloque Carabobo F.P.O.

En la figura 5.1, podemos observar los dos minerales pesados con mayores porcentajes, separados con el imán común: ilmenita y hematita. El mayor porcentaje de estos dos minerales lo encontramos en el pozo CH-38 con 31,74%; sin embargo, se evidencian en todos los pozos con menores porcentajes. El resultado más bajo de minerales pesados identificados aunque manteniendo una tendencia relativa lo obtiene el pozo CNX-1; se encontró que ambos minerales además poseen un alto contenido de hierro. Este método de separación magnética manual, presentó el de menor recuperación de minerales pesados y fue realizado según su diafanidad donde estos dos minerales se observaban opacos en las láminas delgadas.

5.3. Estudio con el Microscopio Petrográfico

La tabla 5.2 muestra los resultados de los minerales pesados, identificados para cada uno de los pozos en estudio, luego de todo el proceso de separación finalmente alcanzado con el Frantz. Estos minerales identificados nos pueden brindar da-

tos, acerca de las posibles procedencias de los sedimentos en la zona de estudio; así como las características del terreno fuente.

Tabla 5.2 Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CH-2, profundidad 3430’–3431’.

Pozo CH-2 3430’ – 3431’		
Fracciones Magnéticas	Minerales Pesados Identificados	Observaciones
Magnético a 0.4A	(1) Ilmenita (4) Hematita	Pocos minerales opacos
Magnético a 0.8A	(4) Epidotos	Granos con alta birrefringencia Se ven como algas verdes
No magnéticos a 1A	(4) Zircón (2) Monacita	Presencia de cuarzo Muchos minerales opacos Zircón de alto relieve (mucho color)

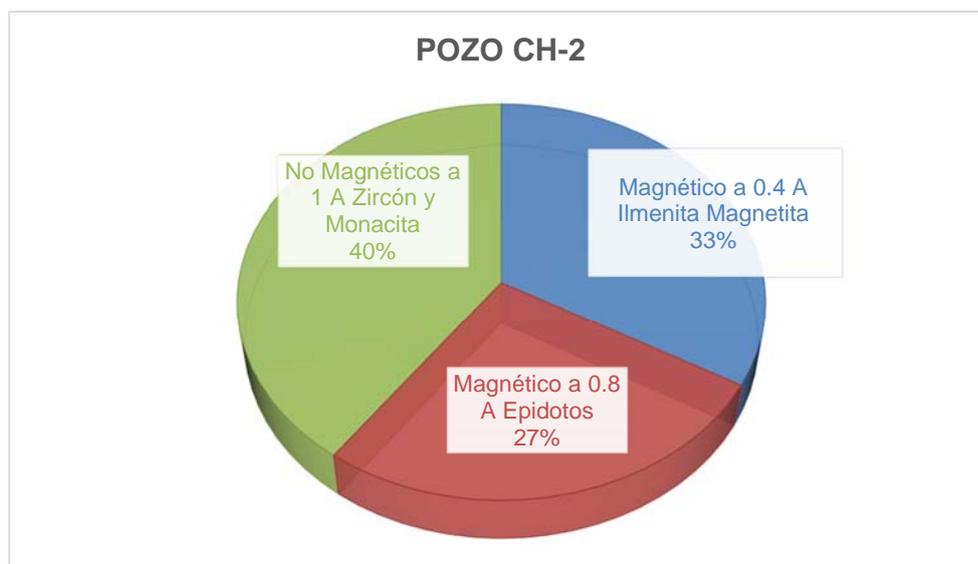


Figura 5.2 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CH-2.

Tabla 5.3 Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CH-38, profundidad 3296'–3296'5'.

Pozo CH-38 3296' – 3296'5'		
Fracciones Magnéticas	Minerales Identificados	Observaciones
Magnético a 0.4A	(4) Hematita (1) Ilmenita	Muchos minerales opacos
Magnético a 0.8A	(7) Epidotos (3) Leucoxeno	Leucoxeno (tipo Ilmenita Oxidada). Probablemente Cuchivero o Imataca
No magnéticos a 1A	(3) Zircón (1) Monacita	Sin minerales opacos Zircón de alto relieve (mucho color) Monoclínica con extinción oblicua

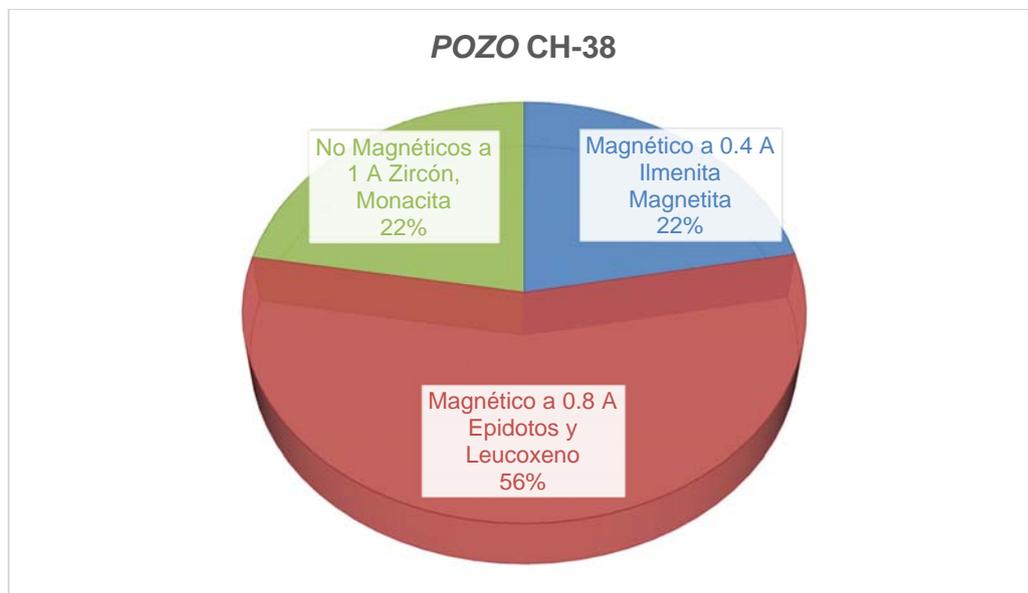


Figura 5.3 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CH-38.

Tabla 5.4 Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CNX-1 profundidad 1901' – 1901'5".

Pozo CNX-1 2627'3" - 2627'7"		
Fracciones Magnéticas	Minerales Pesados	Observaciones
Magnético a 0.4A	(6) Hematita (1) Ilmenita	Muchos minerales opacos
Magnético a 0.8A	(5) Epidotos	Granos con alta birrefringencia
No magnéticos a 1A	(4) Zircón (2) Monacita	Presencia de cuarzo Muchos minerales opacos Zircón de alto relieve (mucho color)

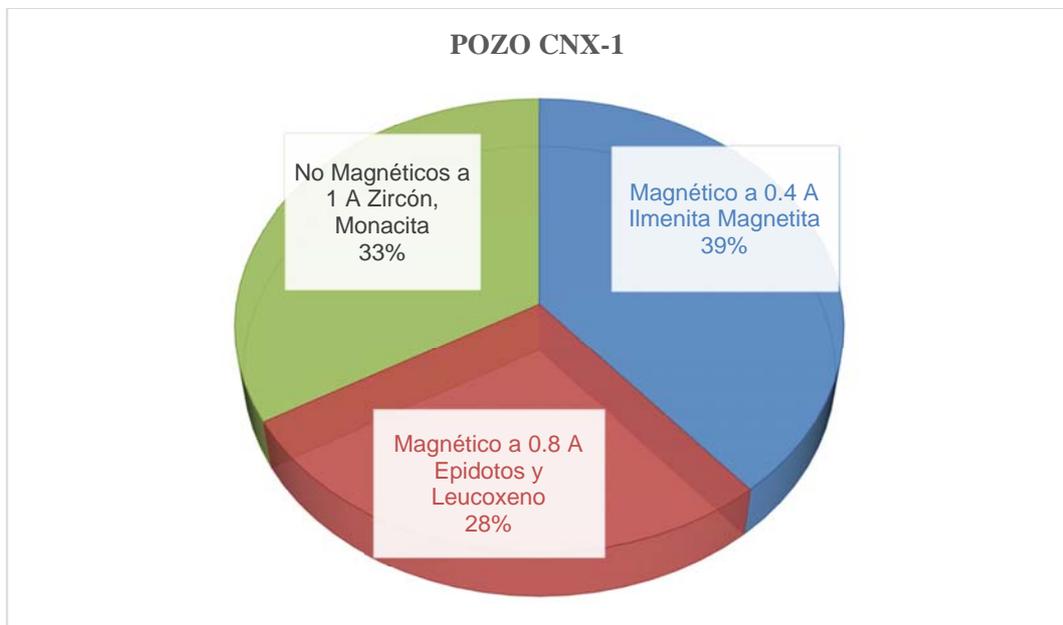


Figura 5.4 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CNX-1.

Tabla 5.5 Minerales pesados identificados para los sedimentos del pozo CRM-1 profundidad 1901' – 1901'5''.

Pozo CRM-1 1901' – 1901'5''		
Fracciones Magnéticas	Minerales Pesados	Observaciones
Magnético a 0.4A	(6) Hematita (1) Ilmenita	Sin opacos
Magnético a 0.8A	(2) Epidotos	Presencia de cuarzo No hay minerales opacos
No magnéticos a 1A	(6) Zircón	No se observaron minerales opacos. Zircón (extinción paralela)

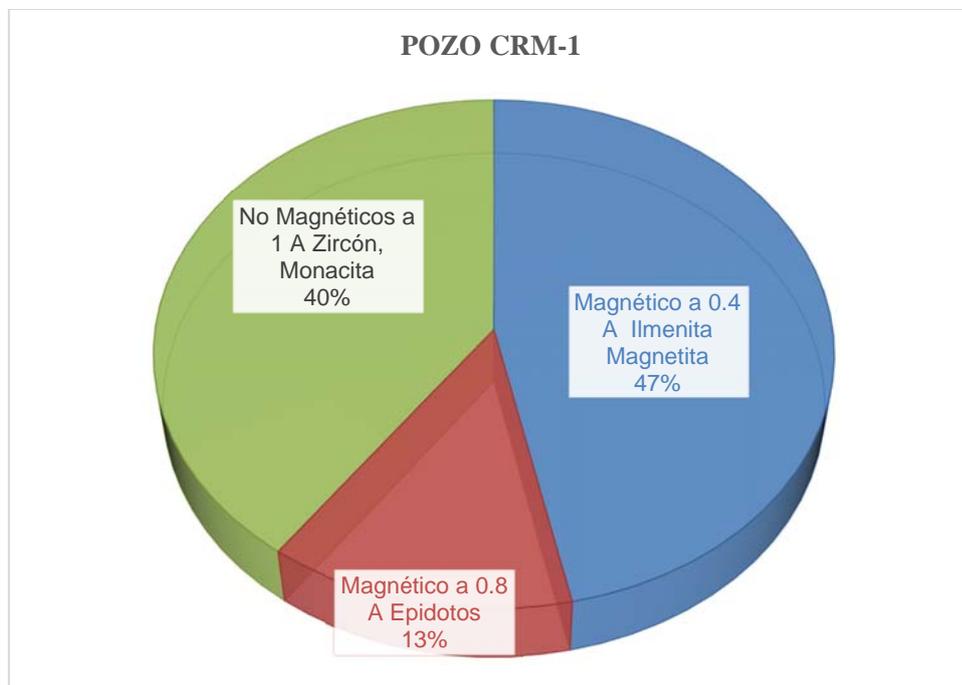


Figura 5.5 Gráfico con los resultados en porcentajes, de los minerales pesados identificados con el microscopio petrográfico en las muestras del pozo CRM-1.

En la figura 5.6, podemos observar la agrupación de resultados con las concentraciones de minerales pesados identificados en las muestras de cada pozo.

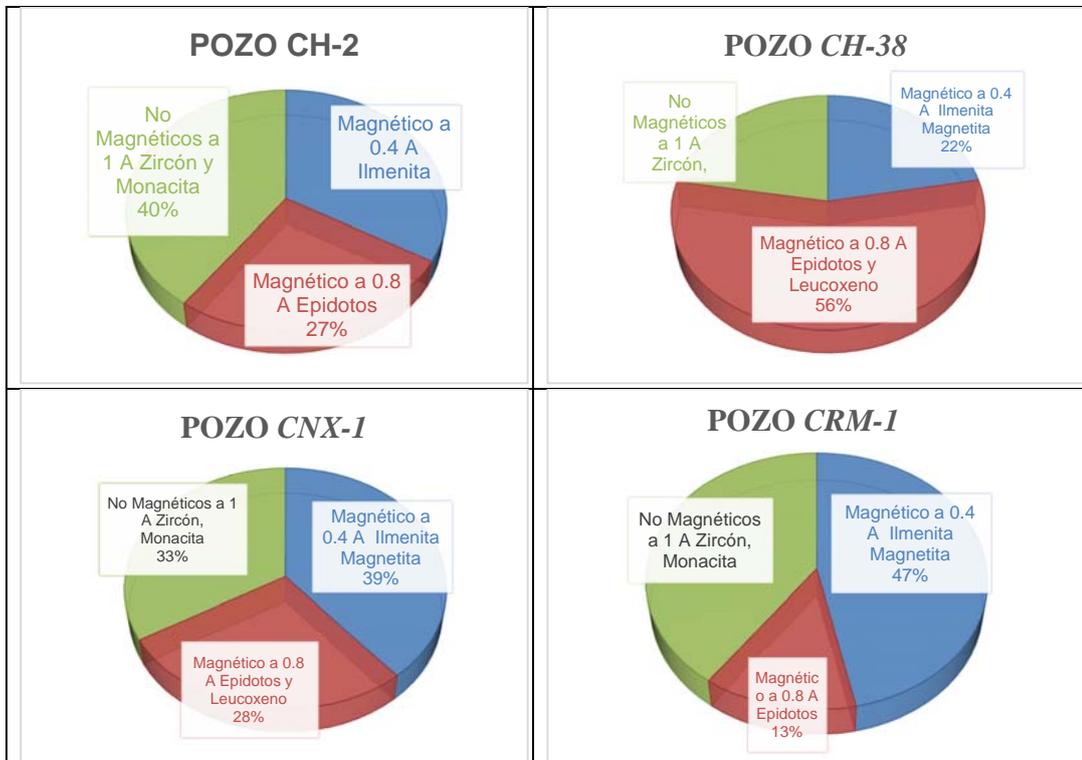


Figura 5.6 Agrupación de todos los porcentajes resultantes de minerales pesados identificados, en cada uno de los pozos en estudio.

En la figura 5.6 notamos que para las fracciones altamente magnéticas 0.4; el mineral más abundante fue la hematita, la cual se encontró en los cuatro pozos. Mientras que para la fracción medianamente magnética 0.8 los minerales más abundantes fueron epidotos y leucocenos; excepto para el pozo CRM-1, donde a esta misma fracción también se identificaron granos de monacitas, lo cual puede atribuirse a errores del método, ya que este mineral no debería aparecer en esta fracción magnética según la tabla de minerales obtenidos por el Frantz. En cuanto a la fracción no-magnética de cada pozo se caracteriza principalmente por la mayor concentración de minerales de zircones y monacitas. Las semejanzas en la composición mineralógica de cada uno de los pozos para las fracciones magnéticas pueden dar indicios de correlación para los cuatro pozos estudiados separados por varios kilómetros en el trasecto norte sur de la

FPO. Asimismo, se puede inducir a errores del método una cantidad de cuarzo hallado en las muestras, posiblemente se debe a la resistencia de estos minerales a la erosión y desgaste; así como, a incrustaciones que aumenta su densidad de 2,6 a 2,9 g/cm³.

En la figura 5.7, se observan algunos de los minerales pesados más comunes y representativos por sus características, identificados con el microscopio petrográfico; para las fracciones magnéticas 0.4A, 0.8A magnéticas y 1A y no magnética, de los pozos (CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1), en la Faja Petrolífera del Orinoco; luego de ser editados con el programa Paint.

Mineral	Fotografías	Características
Circón		Extinción paralela, alta Birrefringencia, relieve alto.
Epidoto		Color marrón verdoso alta birrefringencia.
Rutilo		Color pardo a rojizo, extinción paralela relieve alto.
Circón		Extinción paralela, alta Birrefringencia, relieve alto.
Monacita		Color pardo a rojizo, extinción paralela, relieve alto.

Figura 5.7 Fotografías y características de los granos de minerales pesados más abundantes reconocidos con el microscopio petrográfico.

Luego de todo el análisis realizado por petrografía a los minerales pesados identificados, estos nos ofrecen un resultado importante, en la interpretación de la procedencia de los sedimentos. Se evidencia además poca diversidad y poca abundancia de especies minerales; probablemente esto no hace consumir que los minerales pesados identificados provienen de una fuente única o un solo bloque, donde pudieron ocurrir igualmente los procesos físicos y químicos que fueron necesarios para la acumulación de estos sedimentos.

Todos los minerales de cuarzos existentes en las muestras, tienen la característica de presentar sus texturas muy corroídas, de formas irregulares y muy retrabajados. Esta descripción permite reconocer que estos minerales fueron sometidos a muchos ciclos de erosión intensa y considerable transporte. Además, se fueron redondeando con la distancia desde la roca fuente hasta su depositación en la cuenca.

5.3. Análisis por Difracción de Rayos X

Se realizó el análisis con Difracción de Rayos X (DRX), donde se definió la composición de los minerales pesados; además de obtener los espectros de DRX para cada una de las muestras de cada pozo; posteriormente se fue investigando las fórmulas químicas de los minerales identificados, para complementar el estudio con una mayor precisión. Se elaboró la difracción de rayos X, por el método del polvo a un total de cuatro muestras obtenidas de la fracción 0.1A no magnética del equipo Frantz, para los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 FPO.

Tabla 5.6 Pesos iniciales de las muestras para el estudio DRX.

Difracción de Rayos X		
Fracción 0.1 A		
Pozos	Profundidad	Peso Total
CH-2	3430' – 3431'	0.8 g
CH-38	3296' – 3296'5'	0.4 g
CRM-1	1901' – 1901'5''	0.8 g
CNX-1	2627'3''- 2627'7''	0.6 g

A continuación, se presentan los resultados de los minerales identificados para cada pozo a partir del estudio de DRX.

Pozo CH-2

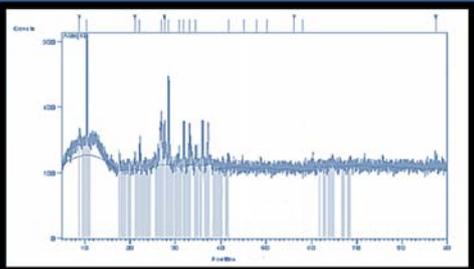
Pozo CH-2 - Amperaje 0.1 A 3430' – 3431'		
Minerales	Formula Química	Espectro de DRX
Zircón Cuarzo Monacita- (Ce)	ZrSiO ₄ SiO ₂ (Ce ,La ,Nd) PO ₄	

Figura 5.8 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CH-2 Amperaje 0.1 A fracción no magnéticos/espectro de difracción de rayos x.

Pozo CH-38

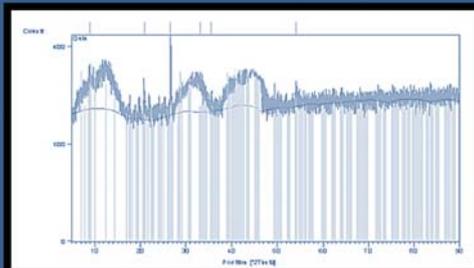
Pozo CH-38 - Amperaje 0.1 A 3296' – 3296'5'		
Minerales	Formula Química	Espectro de DRX
Zircón Cuarzo	ZrSiO ₄ SiO ₂	

Figura 5.9 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CH-38 Amperaje 0.1 A fracción no magnéticos/espectro de difracción de rayos x.

Pozo CRM-1

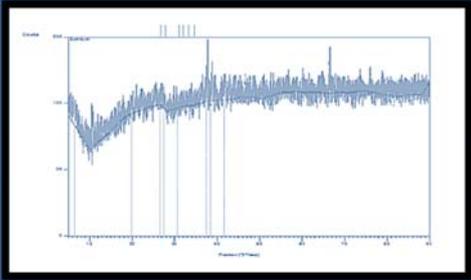
CRM-1 - Amperaje 0.1 A 1901' - 1901'5''		
Minerales	Formula Química	Espectro de DRX
Zircón Monacita-(Ce)	ZrSiO ₄ (Ce ,La ,Nd) PO ₄	

Figura 5.10 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CRM-1 Amperaje 0.1A fracción no magnéticos/espectro de difracción de rayos x.

Pozo CNX-1

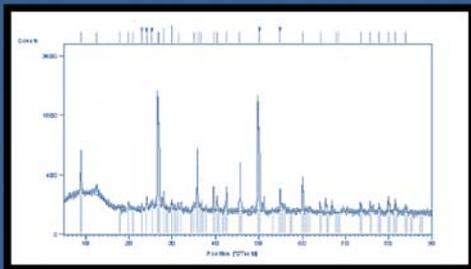
Pozo CNX-1 - Amperaje 0.1 A 2627'3'' - 2627'7''		
Minerales	Composición Química	Espectro de DRX
Ilmenita Zircón	FeTiO ₃ ZrSiO ₄	

Figura 5.11 Resultados de minerales pesados reconocidos por DRX en el pozo CNX-1 Amperaje 0.1A fracción no magnéticos/Espectro de difracción de rayos x.

Haciendo mención a los gráficos resultantes anteriormente mostrados, se denota que, para el estudio de DRX la fracción 0.1A está esencialmente representada por una alta concentración de zircones; los cuales son reconocidos en los cuatro es-

pectros de difracción. Con la alta abundancia de zircones obtenida en este estudio, se puede proyectar que la procedencia de estos minerales pesados, reconocidos en los sedimentos de los pozos (CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1), en la Faja Petrolífera del Orinoco proviene de un solo bloque o un solo evento de geodinámica. Asimismo, se puede inducir a errores del método la cantidad de cuarzo hallado en las muestras.

5.4 Cálculo de Redondez y Esfericidad

En la tabla 5.7, se presentan los resultados obtenidos de los cálculos teóricos de redondez y esfericidad conseguidos con el Programa IMAGE J.

Tabla 5.7 Valores de esfericidad y redondez calculados con el Image J.

Fracciones	Pozos	Esfericidad (Circ)	Redondez (Round)
Magnético 0.4A	CH-2	0,776	0,733
	CH-38	0,745	0,739
	CRM-1	0,734	0,759
	CNX-1	0,726	0,762
Magnético 0.8A	CH-2	0,551	0,568
	CH-38	0,743	0,758
	CRM-1	0,765	0,743
	CNX-1	0,736	0,762
No magnéticos 1A	CH-2	0,668	0,468
	CH-38	0,677	0,744
	CRM-1	0,672	0,758
	CNX-1	0,658	0,765

Como resultado de la esfericidad para la fracción magnética 0.4, tenemos que los valores se corresponden con un promedio de 0,745; el mayor valor se observa para el pozo CH-2, el cual se ubica más al norte dentro del Bloque Carabobo. Los

minerales pesados ensayados para la fracción magnética 0.8A, tienen un promedio de 0,698 muy similar a la fracción anterior. Para la fracción de 1A no magnéticos, donde se encuentran minerales pesados como el circón y la monacita, el promedio de esfericidad fue 0.668, cabe destacar, que para esta fracción no magnética se encuentran los valores más bajo o los menos esféricos.

A continuación se muestra gráficamente la esfericidad y redondez para cada fracción magnética correspondiente a los distintos pozos estudiados:

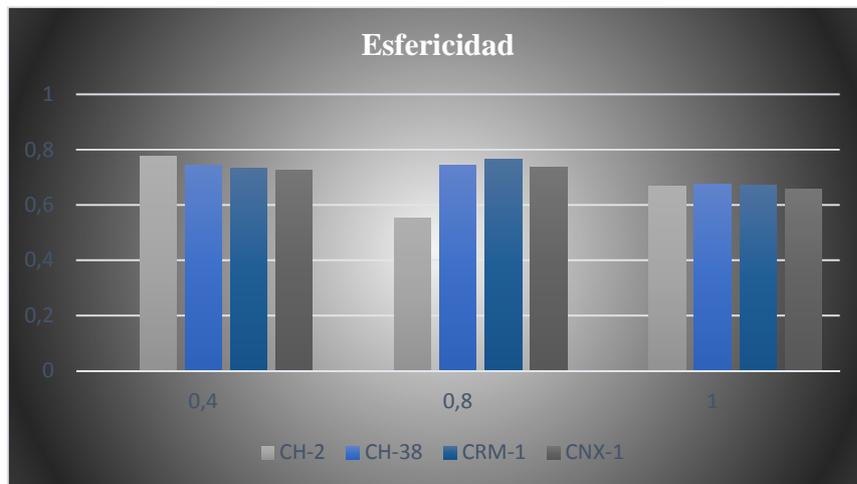


Figura 5.12 Resultados de los valores de esfericidad para los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 del Bloque Carabobo de la FPO.

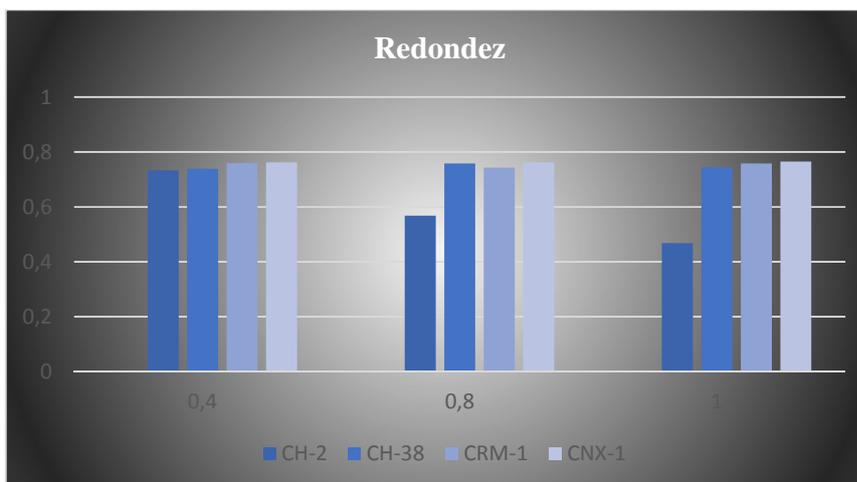


Figura 5.13 Resultados de los valores de redondez para los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 del Bloque Carabobo de la FPO.

Los resultados para la redondez se comportan de forma diversa, para la fracción magnética 0.4 se detalla un valor promedio de redondez de 0,748 y el pozo CNX-1, posee el valor más alto con 0,762. El valor promedio de redondez para la fracción magnética 0.8 es 0,707 no hay una considerable discrepancia con la otra fracción no magnética. Para la fracción de 1A no magnéticos se consiguen los valores más bajos de redondez en el pozo CH-2 con 0,468; mismo pozo donde se reflejó el valor más bajo de esfericidad en la fracción no magnética. Su promedio de redondez es 0,68375.

En la figura 5.14 se muestra el gráfico de comparación entre los valores teóricos de esfericidad y redondez para los minerales pesados conseguido con el programa ImageJ.

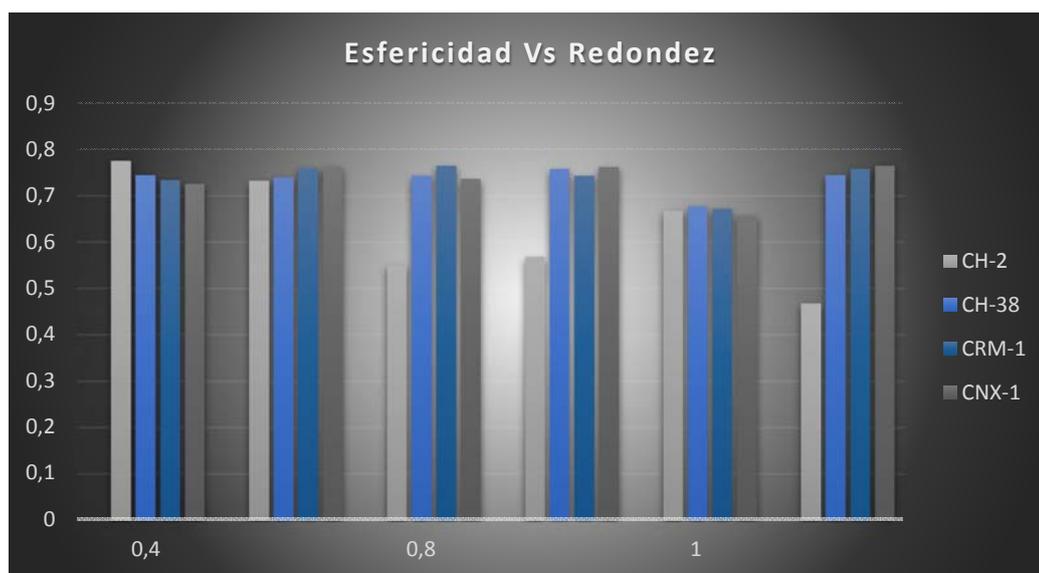


Figura 5.14 Comparación de las variaciones de los valores redondez y esfericidad de los pozos.

Realizando el análisis a la comparación gráfica de los resultados para la redondez y la esfericidad (figura 5.14); se observa la similitud marcada entre estos valores obtenidos, para cada uno de los pozos estudiados. Los resultados de esfericidad son de bajos a medios y demuestran que la forma de los granos varía entre subangular a subredondeados además los valores de redondez reflejan que estos minerales pesados presentan poco desgaste.

5.5 Gráfico de Correlación

La figura 5.15 ilustra la correlación resultante entre los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 a lo largo de un transecto norte-sur del bloque Carabobo. Se realizó extrapolando las concentraciones de los minerales pesados identificados, a los registros de pozos (en el intervalo de interés) tomados de las hojas sedimentarias de cada uno. Previamente para obtener un mejor resultado de las correlaciones, se tomó como guía de referencia, las profundidades (verificadas) inmediatamente después al basamento ígneo. Se construyeron secciones laterales con los respectivos porcentajes de minerales pesados. Las pocas variaciones de los porcentajes encontrados en los contenidos de zircones, epidotos, rutilo y monacita, permitieron una excelente correlación en esta parte de la cuenca. En la figura 5.15, se observan también las líneas de correlación obtenidos de las analogías en las concentraciones de minerales pesados, las cuales se fueron agregando a los respectivos registros de pozos para los intervalos definidos. Con el fin de definir la extensión geométrica de la correlación.

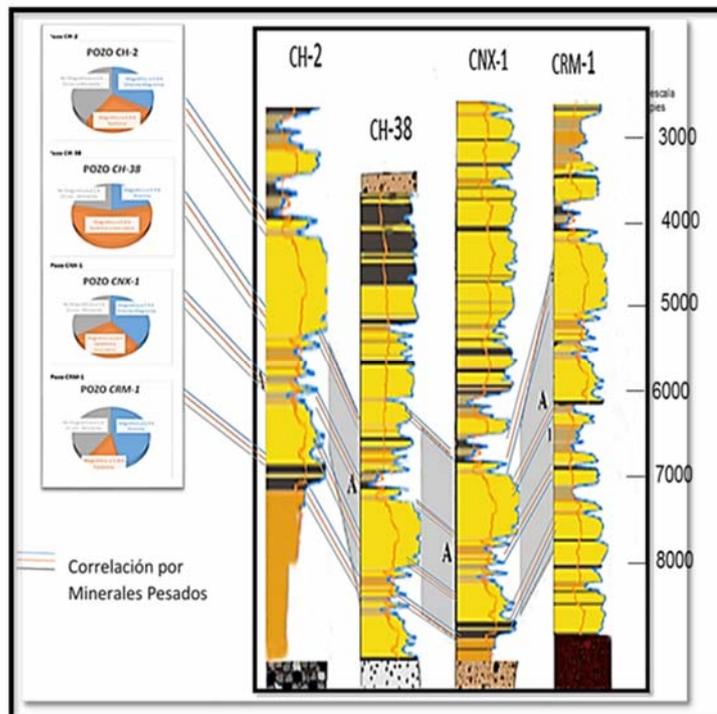


Figura 5.15 Correlación por minerales pesados entre los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1. Tomando como referencia las capas que está por encima del basamento ígneo (Elaboración propia, 2018).

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de este trabajo, se pudo realizar la correlación estratigráfica entre los pozos CH-2, CH-38, CRM-1, CNX-1 del Bloque Carabobo de la FPO-Venezuela. La misma se elaboró de forma diacrónica con la integración entre las similitudes mineralógicas del análisis de minerales pesados y extrapolando los resultados a los respectivos registros petrográficos en el intervalo de interés. Lo que permitió mejorar los valores en las correlaciones mediante el uso de técnicas distintas a las bioestratigráficas convencionales.

Así mismo, a través del análisis de minerales pesados, se identificaron monacitas. Este mineral es considerado de mucho interés, debido a que en altas concentraciones se podría usar como una nueva fuente de energía; cabe destacar, que la composición química de la monacita contiene elementos radiactivos, que pueden ser de gran importancia tanto energética como económica para el país.

Por otro lado, se concluye que la mineralogía del área de estudio fue la siguiente: para la fracción magnética (0,4A) está dominada por ilmenita y hematita, la fracción medianamente magnética (0,8A) por epidotos y leucoxenos, por último, la fracción no-magnética está constituida principalmente por circones.

Con respecto, al estudio morfométrico realizado con el programa Image J, se evidenció una distancia relativamente lejana a la fuente, desde el origen hasta que se depositaron los sedimentos en la cuenca. La forma resultante de los granos varía de su subangular a subredondeados. Tales características conseguidas con los cálculos teóricos de esfericidad y redondez de los granos, indican además poco desgaste de los minerales pesados.

Mediante el estudio mineralógico, se determinó que la procedencia de los minerales pesados contenidos en los sedimentos en estudio proviene del Cratón de Guayana (Provincia de Imataca). Cabe resaltar, que los cuatro pozos presentan similitudes en las concentraciones mineralógicas de los minerales pesados a pesar de estar separados a varios kilómetros dentro del bloque Carabobo.

Con los resultados del análisis a la textura de los minerales de cuarzos identificados en las muestras, todos tienen sus texturas muy corroídas, se podría deducir que fueron sometidos a muchos ciclos de erosión intensa y considerable transporte; además que provienen de una fuente más lejana o se fueron redondeando con la distancia desde la roca fuente hasta su depositación en la cuenca.

Finalmente, se logró consumir que las descripciones e interpretaciones de los minerales pesados representan una herramienta de investigación invaluable y muy útil en las investigaciones geológicas. Que además pueden reforzar otras técnicas de correlaciones bioestratigráficas convencionales, donde exista bajo contenido fosilífero pero alta frecuencia y abundancia de minerales pesados, como lo es el bloque Carabobo Faja Petrolífera del Orinoco; de esta manera se pueden optimizar las destrezas en la exploración de hidrocarburos en el país.

RECOMENDACIONES

En próximos estudios, con interés científico es importante recobrar un porcentaje mayor de muestras, para optimizar la información sedimentaria y mejorar los resultados. De esta manera, poder construir modelos sedimentológicos y estratigráficos a escala regional.

A partir de las fracciones 1.2 a las muestras aportadas en esta investigación, se plantea hacer una correlación cronoestratigrafía con dataciones por termocronología a los apatitos.

Asimismo, se debe continuar aplicando esta metodología en los otros bloques que pertenecientes a la Faja Petrolífera del Orinoco para optimizar la exploración y producción de hidrocarburos.

Para futuros estudios y análisis se sugiere ser estrictos y sumamente cuidadosos con la limpieza y el tratamiento de separación de minerales pesados, para evitar la contaminación de las muestras y obtener resultados erróneos o alterados.

Igualmente, a modo de sugerencia, se empleen los resultados de este trabajo de investigación para realizar la compilación, con toda la información estructural, sismográfica y petrofísica existente de la zona; como aporte para lograr una caracteri-

zación más precisa de los yacimientos en los planes de explotaciones futuras del Bloque Carabobo del FPO.

Por último, se propone realizar los distintos mantenimientos, tanto preventivos como correctivos a los equipos y materiales destinados a la separación de minerales pesados, que se encuentran en los Laboratorios de nuestra casa de estudios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albornoz, M., & Lezama, A. (2014). Comparación de la relación Topografía – Clima – Tectónica en el sector suroeste de la Cuenca del Río Orinoco mediante análisis de índices de erosión y minerales pesados. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Anaya, R. (2004). Calibración del separador magnético de alta intensidad MAGNET-LIFT (13)111-5 y comparación con el separador isodinámico Frantz, para la concentración de grandes volúmenes de minerales accesorios pertenecientes a rocas sedimentarias de las formaciones. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Arcia, S., & Viana, C. (2014). Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Arévalo, J. (2012). Modelo sedimentológico-estratigráfico integrado de un sector al sur este del campo Bare, área de Ayacucho norte, de la Faja del Orinoco, Venezuela. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Audemard, F., Azpirixaga, I., Baumann, P., Isea, A., Latreille, A. (1985). Marco Geológico del terciario de la faja petrolífera del Orinoco, Venezuela. Ponencia presentada en: VI Cong. Geol. Venez., Caracas, 1985, S.V.G., 1: 70-108.
- Bates, R., Jackson, J. (1987). Glossary of Geology (tercera edición). American Geological Institute, Alexandria, Virginia, 788p.
- Benedetto, G., Sánchez, T. (1979). Modelo de desarrollo del Océano Proto-Atlántico en la región Norte de Suramérica. Fourth Latinoamerican Geological conference, Port-of-Spain, Trinidad And Tobago.
- Bermudez, M.A. (2015). Aplicaciones de la termocronología de baja temperatura, modelado termocinémático y geomorfología cuantitativa en el establecimiento de la evolución geodinámica de un sector del norte de Suramérica. Trabajo de Ascenso a Profesor Titular, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 115 páginas.

- Bermúdez, M., & Anaya, R. (2007). Calibración del separador magnético de alta intensidad magnet-lift mlh (13) 111-5. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, 22 (3), 73-84.
- Bermudez, M., Mora, J.L., González, A., Navarro, W., Lecue, P., Agostini, A. (2006). Diseño, construcción y calibración de un sistema automatizado para la separación de minerales pesados (SASMP). *Rev. Fac. Ing. UCV*. [Resumen en línea]. Disponible en <http://www.scielo.org.ve/>. (Consulta el 8 de mayo 2016).
- Bustos, X., Bermúdez, M., Bernet, M., Toro, G., Marín, M., Rojas, O. (2014). Comparación de superficies de erosión en el altiplano Antioqueño mediante geomorfología cuantitativa. *Revista Terra*. (46), 43-67.
- Boggs, S. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy* (4^a Ed.). New York:Prentice Hall.
- Cabrera, E., Russomanno., F., Sánchez, H. (1998). Revisión estratigráfica de la Cuenca de Venezuela oriental. VI Cong. Geol. Venez., Caracas 1985, S.V.G. 41-69p.
- Carver, R. E. (1971). Heavy-mineral separation. In Carver, R. E. (Ed.), *Procedures in sedimentary petrology*: New York (Wiley-Interscience), p. 427-452
- Champagnac, J.D., Molnar, P., Sue, C., Herman, F. (2012). Tectonics, climate, and mountain topography: *Journal of Geophysical Research*, v. 117, B02403, doi:10.1029/2011JB008348.
- Chirinos, M. y Macias A. (1988). Estudio de los parámetros petrofísicos en la base de la Formación Oficina y tope de la Formación Merecure sección nor-central de la Faja Petrolífera del Orinoco. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad de Oriente, Bolívar.
- Contreras, A. (1999). Estudio de minerales pesados en muestras de areniscas de la Formación Carbonera. Trabajo especial de grado. Inedito. Universidad de los Andes, Mérida.
- Collins, T. (2007). Image J for microscopy. *Biotechniques*, 43 (Suppl.1), p. 25-30.
- Crowley, K.D., Naeser, C.W., Naeser, N.D. (1989). *Fission track analysis: Theory and applications. Short course manual*. Geological Society of America Annual Meeting St. Louis, Missouri, pp. 296.
- Cullity B.D. (1956). *X de difracción de rayos*. Addison-Wesley Publishing

Company, Inc. Notre Dame, Indiana. p 672.

- Cullity, B.D. (1967). Elements of X- Ray diffraction. Adisson – Wesley Publishing Company, Inc. 509 p.
- Cullity & Stock (2001).“Elements of X-Ray Diffraction” 3rd Ed. Prentice Hall.
- Díaz, A. (2004). Puesta en marcha y calibración del sistema automatizado de Separación de minerales pesados (SASMP), usando arenas de las formaciones Isnotú y Betijoque del estado Trujillo y granitos del flanco sur de los Andes Venezolanos. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Di croce, J.; Bally, A., VAIL, P. (1999). Sequence Stratigraphy for the Eastern Venezuela Basin. En Mann, D. (ed) Caribbean Basins. Sedimentary Basins of the World, 4. Elsevier science. B.V, Amsterdam. 419- 476 p.
- Fiorillo, G. (1983). Evaluación exploratoria de la faja petrolífera del Orinoco, PDVSA Caracas.
- Fleet,W. (1926). Petrological notes on the Old Red Sandstones of the West Midlands, Geol Mag., 63, 505.
- Flores, M. (2013). Estudio de la relación entre clima, erosión y tectónica a lo largo del Río Guárico mediante análisis geomorfológicos, geológicos y datos termocronológicos existentes. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- García, E. (2000). Curso de petrofísica de ingeniería de petróleo U.S.B. Inédito, 255p.
- García, E. (2005). Curso básico de perfiles de pozo en hoyo desnudo. U.S.B. Inédito, 46p.
- Garver, J.I., Brandon, M.T., Roden-Tice, M., Kamp, P.J.J. (1999). Exhumation Processes: Noraml Faulting, Ductile Flow and Erosion. Chapitre Exhumation history of orogenic highlands determined by detritical fission-track thermochronology. Geological Society, p. 283-304.
- González de Juana, C y Otros., (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas. Foninves. 342 p.
- Grosz, A., San juan, F., Reid, J. (1992). Heavy- mineral concentrations associated with some Gamma-Ray aeroradiometric anomalies over cretaceous sed-

iments in North Carolina: implications for locating placer mineral deposits near the fall zone. U.S. Geological Survey, open-file report of 92-396, 15 p.

- Hedberg, L., Petzal, C., Salvador, A., Reguant, S., Longoria, J. F. (1980). *Guía Estratigráfica Internacional*. Reverté, Barcelona. 205p.
- Hodgkinson, J.H., McLoughlin, S., Cox, M.E. (2006). The influence of structural grain on drainage in a metamorphic sub-catchment: Lacey's Creek, southeast Queensland, Australia. *Geomorphology*. 407p.
- McGRAW – hill book company, inc: Tercera edición. Universidad de Columbia. 419 p
- Khanbabaei, Z., Karam, A., Rostamizad, G. (2013). Studying Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of Their Geomorphological Characteristics. *International Journal of Geosciences*, 2013, 4, 636-642 <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2013.43058>.
- Kohn, B.P., Shagam, R., and Subieta, T. (1984). Results and preliminary implications of sixteen fission-track ages from rocks of the western Caribbean Mountains, Venezuela, in Bonini, W.E., Hargraves, R.B., and Shagam, R., eds., *The Caribbean–South American plate boundary and regional tectonics: Geological Society of America Memoir 162*, 415–421 P.
- Krumbein & Pettijohn. (1938). *Manual of sedimentary petrography*. Appleton Century-Crofts, Inc., New York, p. 230-233.
- Krumbein & Sloss. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation*. W H Freeman & Co Publisher; 2nd edition. p .660.
- Li Z., Zhu Q., Gold C. (2005). *Digital terrain modeling. Principles and methodology*, CRC Press, Florida.
- López, N. y Uzcátegui, M. (2014). Comparación de dos sectores de la Formación Mesa mediante caracterización mineralógica, textural, geomorfológica y análisis de minerales pesados en el sector central de la cuenca del Río Orinoco. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Lugo, J. & Mann P. (1995). *Petroleum basins of South America*.
- Mange, A. M., Maurer, W. H. (1992). *Heavy minerals in colour*. Chapman and Hall. p. 11-28.
- Mange & Wright (2007). *Heavy Minerals in Use Volume 58 de Develop-*

ments in sedimentology. Elsevier Editor. 1283 p.

- Machado, V. (2010). Modelo sedimentológico-estratigráfico de la secuencia paleozoico en la faja petrolífera del Orinoco. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Mayer, L. (1990). An Introduction to Quatitative Geomorphology: an exercise manual, Prentice-Hill, Englewood Cliffs NJ, Prentice Hall, 380 p.
- Méndez, O. (1985). Historia Geológica Graficada de la Cuenca Oriental de Venezuela. Congreso Geológico Venezolano, Memoria VI, pp. 1-26.
- Méndez, O. (2003). "Geología del Petróleo". Material mimeografiado para la cátedra de Geología del Petróleo. Facultad de Ingeniería. UCV.
- Miller, C.L.; Laflamme, R.A. (1958). The digital terrain model-theory and application, *Photogrammetric Engineering*, 24(3): 433-442.
- Milevski I., Dragičević S., Kostadinov S. (2007). Digital elevation model and satellite images an assessment of soil erosion potential in the Pcinja catchment. Volume 87, Issue 2, 10 p.
- Miller, C.L.; Laflamme, R.A. (1958). "The digital terrain modeltheory and application". *Photogrammetric Engineering*, 24(3): 433-442.
- Milosvski, V., & Kónonov, V. (1982). *Mineralogía*. Editorial Mir, Moscú.
- Montenegro, O. (2007). Análisis de petrografía y minerales pesados de la sucesión paleógena en el Sinclinal de Usme y contribuciones a la evolución tectónica del área. Universidad Nacional de Colombia. 20 p.
- Moore, I. & Grayson, R. (1991). Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*, 27 (6), 1177-1191.
- Morton, A. (1991). Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. Geological Society, London, Special publications, V .57; p 31-45.
- Morton & Hallsworth. (1998). Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*. N° 124, p 3 – 29.
- Nichols, G. (2009), *Sedimentology and Stratigraphy*. 2da edición. Oxford, UK, Willey – Blackwell.

- Parnaud, F., Et al. (1995). Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuelan Basin. En: TANKARD, A., SUAREZ, R. y WELSINK, H. Petroleum Basins of South America. (Eds.). American Association of Petroleum Geologist, Memoir 62. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. 741-756 p.
- PDVSA-Intevep. (1997). Código Geológico de Venezuela. Disponible en URL:
- <http://www.pdv.com/lexico/b.htm> [consulta el 12 de diciembre de 2017].
- Perkins, D. (2010). Dept. of Geology and Geological Engineering of The University of North Dakota. Disponible en URL:
- <http://www.und.nodak.edu/instruct/mineral/320petrology/opticalmin/birefringence.htm> [consulta el 2 de noviembre de 2017].
- Pindell, J., y ERIKSON, J. (1994). Sub-surface Jurassic shelf, NE Venezuela and Trinidad: Petroleum Exploration. En: V Simposio Bolivariano de las Exploración de las Cuencas Subandinas. Sociedad Venezolana de Geología. 244-262 pp.
- Proyecto orinoco magna reservas, pdvsa-cvp (2006).
- Sánchez, L. (2011). Concentración en mesa gravimétrica. UNMSM E.A.P. Ingeniería Metalúrgica. Tomado de: <https://es.scribd.com/doc/55932259/Concentración-en-Mesa-Gravimétrica>.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology, Geological Society of America Bulletin 63 (11): 1117–1142.
- Tucker, G., Whipple, K. (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodal comparison, J. Geophys. Res., 10.1029/2001JB000162
- Turcotte, D.L. (2007). Fractal and Chaos in Geology and Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge, 398.
- Udden – Wenworth. (1922). Tomada de: <http://post.geoxnet.com/blog/escala-granulometrica-de-uddenwentworth/>.
- Vera, J.A. (1994). Estratigrafía, principios y métodos, Editorial Rueda, Madrid.
- Viana, C., Arcia, S. (2013). Estudio de la interacción clima, tectónica y procesos superficiales como agentes controladores del relieve actual en terrenos adyacentes a los ríos Nirgua, Boconó y Apure mediante caracterización mineralógica, análisis digital del terreno y estudio de minerales pesados. Universidad

Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- Wadell, H. (1932). Volume, shape, and roundness of rock particles, *Journal of Geology* 40: 443–451.
- Willet, S., Beaumont, C., Fullsack, P. (1993). Mechanical models for the tectonics of doubly vergent compressional orogens. *Geology*, v.21, p. 371-374.
- WEC 1997. Conferencia Evaluación de Pozos. Schlumberger - Surencó C.A. 1ra. Ed. Español ; Jolley Printing (Texas) : Cap. 1 : 1 - 17 ; 24 – 44p.
- Wilson, J. & Gallant, J. (2000). *Digital Terrain Analysis*. (eds), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, New York John Wiley and Sons. 26p.
- Yoris, F. y Ostos, M. (1997) *Geología de Venezuela: Geología General y Cuencas Petrolíferas*. En: Singer, J. (Edr.) WEC 1997. Conferencia Evaluación de Pozos. Schlumberger - Surencó C.A. 1ra. Ed. Español ; Jolley Printing (Texas).244p.