

ANALISIS MICROPALEONTOLOGICO Y CARACTERIZACION
SEDIMENTOLOGICA DE LA FORMACION CAPACHO, EN MUESTRAS DE
AFLORAMIENTO, SECCION SARDINATA, CUENCA DEL CATATUMBO, NORTE
DE SANTANDER, COLOMBIA

CLAUDIA PATRICIA CARDENAS GOMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA

2012

ANALISIS MICROPALEONTOLOGICO Y CARACTERIZACION
SEDIMENTOLOGICA DE LA FORMACION CAPACHO, EN MUESTRAS DE
AFLORAMIENTO, SECCION SARDINATA, CUENCA DEL CATATUMBO, NORTE
DE SANTANDER, COLOMBIA

CLAUDIA PATRICIA CARDENAS GOMEZ

Trabajo de Grado para optar el título de
Geóloga

Director

DANIEL ANDRES RINCON MARTINEZ
Biólogo Marino PhD

Codirector

LUIS ENRIQUE CRUZ GUEVARA
Geólogo PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a toda mi familia
En especial a aquellos que siempre han estado a mi lado en cada paso que doy, y
siempre me han brindado su apoyo incondicional y amor.

A mi mamá, Olga Lucia

A mi papá, Fernando

Mis abuelos, Pastora y Hernando

Mi hermana, Paola Andrea

Y a Diego Fernando, mi pequeño hermano y mi gran fuerza motora

Claudia Patricia

"El futuro pertenece a aquellos que creen en la belleza de sus sueños"

Eleanor Roosevelt

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente a mis padres por brindarme la oportunidad de adelantar mis estudios de educación superior. Agradezco enormemente a mi mamá, la dedicación, perseverancia, paciencia y sobre todo el sacrificio por el que tuvo que pasar para que yo pudiera llevar a cabo este trabajo, y en general con cada uno de mis pequeños logros, además de ser mi mejor amiga, confidente y cómplice. A mi papá quiero agradecer sus consejos y regaños los cuales han formado mi carácter y la forma de ver y enfrentar la vida. A Paola Andrea, mas que una hermana, es mi amiga, y agradezco a la vida por tenerla mi lado, y a ella su compañía, respeto y apoyo cuando mas lo necesito. A mi querido Dieguito, que llevo hace cuatro años a nuestras vidas para llenarlas de alegría, fuerza y vitalidad. A mis abuelitos les agradezco sus oraciones, sus consejos, sus mimos y apoyo incondicional en cada una de mis decisiones.

A mi director de proyecto, Daniel Rincón, por su dedicación, correcciones, consejos y sobre todo por el gran apoyo que me ha brindado desde el primer día que llegue al laboratorio.

A mi codirector y profesor de geología, Luis Cruz, por toda la colaboración prestada en la elaboración del proyecto.

A Claudia Caicedo, mi mentora, por transmitirme todo su conocimiento, su pasión por su trabajo, por compartir conmigo sus vivencias y por convertirse para mí en un modelo a seguir.

A todos y cada uno de los integrantes del grupo de micropaleontología del ICP, a Gustavo Angarita, Carolina Parra, Alex Duarte, Angie Ariza, Angélica Ballesteros, por sus aportes y amistad.

A Diego Torres, por ayudarme a dar un gran paso en la realización de mis sueños.

A todos mis amigos, por las vivencias, por las risas, por su compañía y apoyo, a todos gracias por pertenecer a mi loco mundo. Tante grazie!!! Jael P., Gina R., Fernando V., Henry M., Ricardo V., Diego M., Diego C., Leonardo P., Natalia H., María S., Lady R., Julián L., Fernando C., Eduardo A., Diego Fernando G., Tatiana M., Aleja N., Natalia R., Jesús R., Oscar M., Alejo C.

En general a todos los que me brindaron en algún momento su apoyo para poder culminar este proyecto.

Y por supuesto a mi alma máter, la UIS!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
JUSTIFICACION	20
OBJETIVOS	21
3.1. OBJETIVO GENERAL	21
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	21
MARCO TEORICO	22
4.1. AREA DE ESTUDIO	22
4.1.1. Localización	22
4.2. MARCO TECTONOESTRATIGRÁFICO	25
4.3. ESTADIOS DE LA EVOLUCIÓN CRONOESTRATIGRÁFICA DE LA CUENCA DEL CATATUMBO	25
4.3.1. Triasico Tardío - Jurásico	26
4.3.2. Cretácico	26
4.3.3. Cenozoico	27
4.4. FORMACIÓN CAPACHO	29
4.4.1. Ambiente de depositación	31
4.4.2. Edad	31
4.4.3. Espesor	31
4.5. FORAMINIFEROS	32
4.5.1. Foraminíferos bentónicos	34
4.5.1.1. Conchilla aglutinada	34
4.5.1.2. Conchilla membranosa o pseudoquitinosa	34
4.5.1.3. Conchilla microgranular	34
4.5.1.4. Conchilla calcárea	34
4.5.2. Modos de vida	35
4.5.3. Alimentación (estrategias)	35

4.5.4. Sustrato	36
4.5.5. Morfogrupos	37
4.6. RECONSTRUCCIÓN PALEOECOLÓGICA	37
4.6.1. Flujo de materia orgánica y oxigenación	38
4.6.2. Profundidad	39
5. METODOLOGÍA	39
5.1. FASE 1	39
5.1.1. Recopilación bibliográfica	40
5.2. FASE 2	40
5.2.1. Trabajo en campo (Muestreo - Sección Sardinata)	40
5.2.2. Preparación y Análisis de muestras	40
5.2.2.1. Sedimentología	41
5.2.2.2. Micropaleontología	42
5.2.2.3. Geoquímica	43
5.3. FASE 3	45
5.3.1. Interpretación de resultados	45
6. RESULTADOS	46
6.1. CAMPO	46
6.2. SEDIMENTOLOGÍA	48
6.2.1. Areniscas.	51
6.2.2. Lodolitas.	58
6.2.2.1. Limolitas arenosas	58
6.2.2.2. Lodolitas	52
6.2.3. Calizas.	60
6.2.4. Determinación granulométrica experimental.	64
6.2.5. Microfacies	65
6.3. MICROPALAEONTOLOGÍA	66
6.3.1. Identificación taxonómica.	68
6.3.2. Abundancia.	68
6.3.3. Morfogrupos.	70

6.3.4. Diversidad y dominancia.	74
6.3.5. Clúster	76
6.4. GEOQUÍMICA	77
7. INTERPRETACION DE RESULTADOS	82
7.1. ANÁLISIS AMBIENTAL	82
7.2. RECONSTRUCCIÓN PALEOECOLOGICA	87
7.3 ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS	92
7.4. POZO ORIPAYA-1	93
8. CONCLUSIONES	94
9. RECOMENDACIONES	95
10. BIBLIOGRAFIA	96

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de IH relacionados con el tipo de kerógeno y su ambiente de depositación. Fuente McCarthy et al, 2011.	44
Tabla 2. Listado de muestras recolectadas a lo largo de la sección Sardinata.	47
Tabla 3. Listado de las muestras para análisis petrográfico a lo largo de la Sección Sardinata.	50
Tabla 4. Porcentajes de los componentes texturales de seis muestras analizadas.	53
Tabla 5. Porcentajes recalculados del armazón y la matriz para las seis muestras analizadas.	54
Tabla 6. Porcentajes de los componentes principales y su respectivo porcentaje recalculado para hallar la clasificación textural.	55
Tabla 7. Datos usados para la determinación de la madurez textural.	57
Tabla 8. Porcentajes de los componentes de las muestras M46 y M74_1.	60
Tabla 9. Resumen de la clasificación de las rocas calcáreas (M46 y M74_1) según Folk (1974) y Dunham (1962).	63
Tabla 10. Microfacies de las 16 muestras analizadas.	65
Tabla 11. Distribución de la cantidad foraminíferos encontrados por muestra.	67
Tabla 12. Conteos y tipos de morfogrupos encontrados en las muestras de la Sección Sardinata.	70
Tabla 13. Estadística descriptiva de los morfogrupos en la Sección Sardinata, determinados en N° de individuos por gramo de sedimento.	73
Tabla 14. Valores de dominancia para las muestras que presentaron recobro de foraminíferos bentónicos, dadas por el Índice de Simpson, y la diversidad es dada por el Índice de Fisher. Las casillas que están resaltadas indican el género más	

abundante en la muestra. Ammo= Ammobaculites, Haplop= Haplophragmoides, Troch=Trochammina, Reop=Reophax, Preab=Preabulimina, Lent=Lenticulina. 74

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización de la Cuenca del Catatumbo Fuente. Mondragón, 2002.	22
Figura 2. Localización de la Sección Sardinata. Fuente. Tomada y modificada de Olaya y Linares, 1998.	23
Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Catatumbo. Fuente. Barrero et al., 2007	28
Figura 4. Afloramiento de la parte basal de la columna estratigráfica en la Sección Sardinata, en esta zona se encuentra una intercalación de areniscas con lodolitas. La muestra M41 pertenece a este afloramiento.	48
Figura 5. Parte media de la columna estratigráfica, se evidencia el predominio hacia este sector de lodolitas color negro, aquí se tomaron las muestras M49 hasta la muestra M63.	49
Figura 6. Cemento calcáreo presentándose en cristales (circulo rojo) en la muestra M112_1 (foto tomada en nicoles cruzados con el objetivo 5x)	51
Figura 7. (a) Porosidad secundaria representada en la fractura (izquierda), donde se evidencia el paso de fluidos (hidrocarburo) (foto en nicoles paralelos). (b) Roca impregnada de hidrocarburo (M43), ocupando gran parte de la muestra (foto en nicoles paralelos).	52
Figura 8. Diagrama triangular (Folk, 1974), modificada para mostrar la clasificación textural de las muestras analizadas.	54
Figura 9. Diagrama triangular composicional (Folk, 1974), modificado para mostrar la clasificación de las muestras analizadas.	56
Figura 10. (a) Vista general de la muestra M42, donde se aprecia la matriz y algunas partículas tamaño arena (nicoles cruzados). (b)Muestra M69,	

evidenciando las dos diferentes texturas y composiciones (Foto en nicoles cruzados tomada con el objetivo 5x).	58
Figura 11. Fractura sinuosa rellena de yeso presente en la muestra M69 (Fotografía tomada en nicoles paralelos con el objetivo 5x)	59
Figura 12. En la figura 12a, se evidencia hacia la parte inferior la presencia de un ostrácodo, junto con otros organismos que no son reconocibles claramente. La figura 12b, se puede apreciar en la parte superior derecha un foraminífero uniserial, acompañado por otros organismos al parecer gasterópodos (?). La figura 12c, es dominada por un bivalvo, el cual muestra una comisura bien definida y bastante plegada. La figura 12d, en la parte central superior se observa una estructura radial, perteneciente a una espina de equinodermo. Las graficas están en nicoles paralelos.	61
Figura 13. La figura 13a, muestra la estructura radial de una espina de equinodermo (fotografía tomada con el objetivo 10x). La figura 13b, presenta pequeños fragmentos de lo que pudiera ser foraminíferos (?), junto con estructuras alargadas posiblemente de bivalvos (Fotografía tomada con el objetivo 5x). En la figura 13c, se puede apreciar las formas circulares, atribuidas a los oolitos (Fotografía tomada con el objetivo 5x).	62
Figura 14. Distribución de los porcentajes de la fracción arena a lo largo de la Sección Sardinata, mostrando una alta coincidencia con la litología descrita en la columna estratigráfica.	64
Figura 15. Abundancia de foraminiferos bentonicos. El circulo que acompaña a la muestras M65, M66, M72, M74_1 y M76, esta indicando una cantidad de individuos menor a 50.	69
Figura 16. Proporción de los tres morfogrupos presentes en la sección Sardinata, además de la variación entre foraminíferos bentónicos infaunales y epifaunales.	71
Figura 17. Diferencias de medianas entre los distintos morfogrupos.	73
Figura 18. Los valores de diversidad para las muestras de la Sección Sardinata.	75
Figura 19. Dendograma de las asociaciones presentes en la Sección Sardinata.	77
Figura 20. Distribución de los porcentajes de COT sobre la sección Sardinata.	78

Figura 21. Porcentajes de CaCO ₃ a lo largo de la Sección Sardinata	79
Figura 22. Valores del Índice de Hidrogeno para las muestras de la Sección Sardinata.	80
Figura 23. Se muestran los diversos ciclos anóxicos/óxicos en la Sección Sardinata por medio del PHR.	81
Figura 24. Correlación entre el porcentaje de arena y el Índice de Hidrogeno (IH), para determinar los posibles ambientes de sedimentación de la Formación Capacho en la sección Sardinata.	83
Figura 25. Imagen donde se relaciona la proporción de morfogrupos con los diferentes ambientes marinos de sedimentación. Los recuadros rojo y verde, pertenecen a los ambientes encontrados hacia la parte media de la Formación Capacho.	85
Figura 26. Correlación entre los distintos parámetros para la reconstrucción paleoecologica.	90
Figura 27. Relación entre la cantidad de individuos contra el porcentaje de COT en la Sección Sardinata. El círculo azul muestra el porcentaje de COT donde se encuentran concentradas las muestras con un número de individuos similares.	91

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo 1. Columna estratigráfica de la Formación Capacho, en la sección Sardinata.

Anexo 2. Poligonal de la Sección Sardinata.

Anexo 3. Identificación taxonómica de los foraminíferos encontrados en la sección Sardinata.

Anexo 4. Geoquímica

RESUMEN

TITULO: ANALISIS MICROPALAEONTOLOGICO Y CARACTERIZACION SEDIMENTOLOGICA DE LA FORMACION CAPACHO, EN MUESTRAS DE AFLORAMIENTO, SECCION SARDINATA, CUENTA CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA. *

AUTOR: Claudia Patricia Cárdenas Gómez**

Palabras claves: Micropaleontología, Geoquímica, Sedimentología, Formación Capacho, Ambiente sedimentario.

Sobre la Formación Capacho en la Sección Sardinata, se recolectaron 33 muestras, para análisis micropaleontológico y geoquímico, de las cuales se tomaron 16 muestras para realizar una descripción petrográfica. Con el análisis micropaleontológico se tiene que tan solo 19 muestras presentan recobro de foraminíferos, en su mayoría bentónicos aglutinados, y de acuerdo con las características morfológicas que presentan fueron agrupados por morfogrupos, B3, C1 y D, de acuerdo con Jones y Charnock (1985); por otro lado los resultados de geoquímica muestran valores de COT para la Formación Capacho en la Sección Sardinata entre 0,5% – 1,7%, siendo catalogada como pobre a moderada la cantidad de materia orgánica presente, sin embargo la abundancia de los foraminíferos en un gramo de sedimento presenta valores entre los 7 – 3500 individuos evidenciándose que en el momento de la depositación existía una gran cantidad de materia orgánica. Fue posible determinar también por medio de la integración de los datos sedimentológicos y las variaciones entre los diferentes morfogrupos (B3, C1 y D), la profundidad a la cual estaba la formación; dado a la gran abundancia del morfogrupo C1, con menores proporciones en los morfogrupos B3 y D; en la mayoría de las muestras donde predominan las lodolitas negras, se obtuvo que estas secciones o intervalos pertenecen a una plataforma marina interna, mientras que en unas pocas muestras donde la proporción entre los morfogrupos C1 y B3 son similares la profundidad no excede los 200 metros, esto quiere decir que la Formación Capacho alcanzaba a estar sobre una plataforma marina externa.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Geología. Director. PhD. Daniel Andres Rincon Martinez. Codirector. PhD. Luis Enrique Cruz Guevara.

ABSTRACT

TITLE: MICROPALAEONTOLOGICAL ANALYSIS AND SEDIMENTOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE CAPACHO FORMATION, IN OUTCROP SAMPLES, SARDINATA SECTION, CATATUMBO BASIN, NORHT OF SANTANDER, COLOMBIA.*

AUTHOR: Claudia Patricia Cárdenas Gómez**

KEYWORDS: Micropaleontology, Geochemistry, Sedimentology, Capacho Formation, Sedimentary environment.

About the Capacho Formation in Sardinata Section, 33 samples were collected, for micropaleontology and geochemical analysis, which 16 were taken to do a petrographic description. With the micropaleontology analysis just 19 samples have a recovery of foraminiferous, the most of them agglutinated benthic, and according to the morphological characteristics which presented, they were grouped by morphogroups B3, C1 and D, depending on Jones and Charnock (1985); on the other hand the geochemical results show COT values for the Capacho Formation in Sardinata Section between 0,5% and 1,7%, being classified as poor to moderate the amount of organic matter, but the abundance of foraminiferous in a gram of sediment present values between 7 and 3500 individuals what show in the depositional moment, a large amount of organic matter existed. It was also possible to determine the depth which the formation was, through integration of the sedimentological data and variations between different morphogroups (B3, C1 and D); like there abundance in the morphogroup C1, and with less proportion in morphogroups B3 and D; in the most of samples where predominate the black mudstones, It was found that these sections or intervals belong to a inner shelf, while in a few samples where the proportion between the C1 and B3 morphogroups is similar, the depth does not exceed the 200 meters, this means that the Capacho Formation reached to be on an outer shelf.

*Graduation Project

**Faculty of Physicochemical Engineering. Geology School. Directors. PhD. Daniel Andres Rincon Martinez. and PhD. Luis Enrique Cruz Guevara.

INTRODUCCION

Si bien es cierto, los foraminíferos planctónicos durante mucho tiempo despertaron gran interés, debido a la información cronológica que aporta y a su poca resistencia a condiciones adversas marcando fuertemente los diferentes eventos anóxicos acaecidos en los océanos. Sin embargo con el tiempo la atención se ha centrado sobre los foraminíferos bentónicos, ya que sus diferentes modos de vida están condicionados a las características del medio, aportando información sobre el tipo de sedimentología, niveles de oxígeno, profundidad, cantidad de materia orgánica, etc.

Dentro de las herramientas utilizadas para el reconocimiento de los diferentes tipos de ambientes sedimentarios, los estudios paleoecológicos dan al interprete información suficiente para realizar un buen acople de toda la información que se puede obtener de una roca, para este caso datos sedimentológicos, geoquímicos, y micropaleontológicos, y así poder generar un buen análisis multidisciplinar. Este procedimiento es utilizado en la Formación Capacho, para poder determinar las variaciones ambientales ocurridas durante su depositación con el ánimo de esclarecer la génesis de la formación, la cual es objeto de diversas discusiones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Son diversos los autores que han identificado a la Formación Capacho (Richards, 1968) en la Cuenca del Catatumbo, en la Serranía del Perijá y en la Cuenca del Maracaibo (i.e. Sievers, 1888 en Julivert, 1968; Notestein et al, 1940; Sutton, 1946; Rod y Maync, 1954; Richards, 1968). A pesar de las diferentes opiniones en cuanto a su edad (en el rango Cenomaniano - Turoniano), límites, espesor y extensión, la formación siempre ha sido caracterizada dentro de un ambiente de sedimentación marino, debido a la presencia conspicua de shales y calizas, así como a la abundancia en ciertas zonas de fauna fósil (i.e bivalvos del género *Ostrea* sp). Proyectos de la industria petrolera, realizados en los últimos 15 años en la Cuenca del Catatumbo (i.e. Olaya y Linares, 1998; Zapata *et al*, 2009; Mondragón, 2002), han determinado por medio de la descripción sedimentológica de núcleos (*cores*) de diferentes pozos exploratorios como el Petrolea 224 (Gomez, 2009) y el Tasajero-1 (Olaya y Linares, 1998), y junto con muestras de afloramiento (Sección La Don Juana), una asociación de facies, tales como shales, mudstones y limolitas pertenecientes a depósitos de costa afuera (offshore). No obstante, los estudios bioestratigráficos de pozos exploratorios como Gonzalez-1 (Caicedo y Espitia, 2006), Zulia Profundo-1 (Caicedo, Mantilla y Espitia, 2007), Oripaya-1 (Duarte et al, 2010) por nombrar algunos, han resultado en un bajo recobro y diversidad de foraminíferos, pero con una fuerte presencia de los géneros *Heterolix*, *Ammobaculites* y *Haplophragmoides*, que sugieren la existencia de facies mas someras, y afectadas por bajos contenidos de oxígeno. La Formación Capacho aun no cuenta con una interpretación ambiental bien establecida en la Cuenca del Catatumbo, y esto ocasiona un alto grado de incertidumbre en los diferentes modelamientos geológicos realizados en la Cuenca, a pesar de ser considerada roca generadora, y de estar relacionada con los diferentes procesos geológicos que dieron origen a una de las rocas generadoras mas prolíficas de las Cuencas Catatumbo y Maracaibo, la Formación La Luna. Se hace necesario entonces realizar una reconstrucción paleoambiental,

con el ánimo de conocer las condiciones de oxigenación (i.e. eventos de anoxia), paleoprofundidad, flujo de materia orgánica, etc, a las que estuvo sujeta su depositación, y cómo estas influyeron, tanto en la cantidad y distribución de la fauna como en la litología. Esta información dará luces para entender cómo fue la evolución de la Cuenca durante el comienzo del Cretácico superior (Cenomaniano – Turoniano).

2. JUSTIFICACION

La difusión de estudios paleoecológicos en las cuencas sedimentarias del país, poco a poco ha ido aumentando, puesto que la resolución de la información es mucho más completa y deja al descubierto la interacción de los elementos biológicos, geoquímicos y sedimentológicos, que influyeron en la depositación de las diversas secuencias estratigráficas. Por lo tanto el desarrollo del presente proyecto, proveerá datos que ayudaran a definir el ambiente de depositación de la Formación Capacho y aportará al marco metodológico para este tipo de estudios en otras secciones geológicas. La información se obtendrá del análisis detallado de la asociación de los diferentes morfogrupos de foraminíferos bentónicos y cómo éstos se relacionan con la litología y la geoquímica del entorno, determinando así el modo de vida del foraminífero, su microhábitat y sus adaptaciones a medios hostiles (i.e. eventos de anoxia). Éstas son claves importantes para inferir la paleobatimetría, la cantidad de oxígeno disponible en el medio, el flujo de materia orgánica, la productividad biológica propias del intervalo Cenomaniano – Turoniano en la Cuenca. Por consiguiente, se ampliará el conocimiento bioestratigráfico de la Formación Capacho y se comprenderá de una mejor manera la evolución de la Cuenca. Además, dado el carácter de roca generadora que tiene dentro del sistema petrolífero de la Cuenca del Catatumbo, es de suma importancia tener claro el ambiente de depositación, para posteriores estudios de prospectividad en la Cuenca. La relevancia que se le ha dado a la realización de este trabajo, también consiste en la calidad de la información, puesto que los

datos provienen de las muestras de afloramiento, tomadas en la Sección de Sardinata, brindándose la oportunidad trabajar con información *in situ*. Por otro lado, este tipo de estudios se ha realizado pocas veces en secuencias del Cretácico (i.e. Martínez, 1995; Tchegliakova et al., 1997; Patarroyo-Camargo et al, 2009), debido a la poca preservación y conocimiento que se tiene de los foraminíferos bentónicos del Cretácico, y al alto grado de deformación que presentan estas secuencias.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un estudio detallado de la microfauna y realizar la caracterización sedimentológica en la Formación Capacho a lo largo de la Sección Sardinata (Norte de Santander) para determinar su ambiente de depositación.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

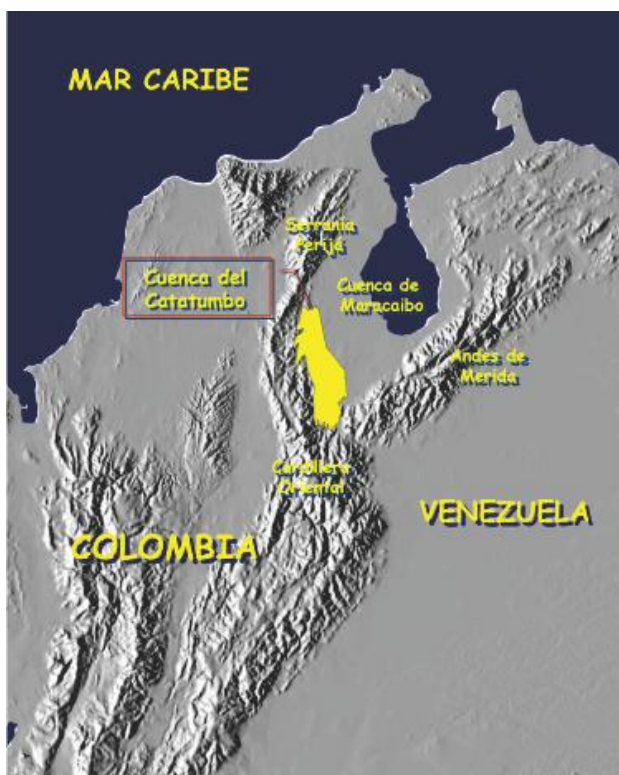
- Identificar taxonómicamente los foraminíferos bentónicos y sus diferentes morfogrupos.
- Determinar la abundancia, diversidad y distribución de los morfogrupos en toda la Formación Capacho de la Sección Sardinata.
- Definir biofacies para la Formación Capacho por medio de los parámetros anteriormente expuestos y su relación con la estratigrafía secuencial.
- Caracterizar sedimentológicamente la Formación Capacho a partir de análisis granulométricos, geoquímicos y petrográficos, para definir variaciones en el ambiente de depositación.
- Comparar los datos micropaleontológicos de la Sección Sardinata con el pozo Oripaya-1.

4. MARCO TEORICO

4.1. ÁREA DE ESTUDIO.

4.1.1. Localización. La Cuenca del Catatumbo es una extensión de la Cuenca del Maracaibo en Colombia, y se ubica dentro del Departamento de Norte de Santander (figura 1). Limita al norte y oeste, con La Sierra del Perijá y el Macizo de Santander, respectivamente, al sur con los Andes de Mérida, y al este con el límite geográfico entre Colombia y Venezuela (Yurewicz, 1998). Se ha registrado para la Cuenca del Catatumbo una área aproximada de 7,350 km², y un registro sedimentario de mas de 15,000 pies de espesor hacia la parte mas profunda de la cuenca, que involucra rocas del mesozoico y cenozoico, suprayaciendo discordantemente un basamento del neo-Proterozoico y Paleozoico.

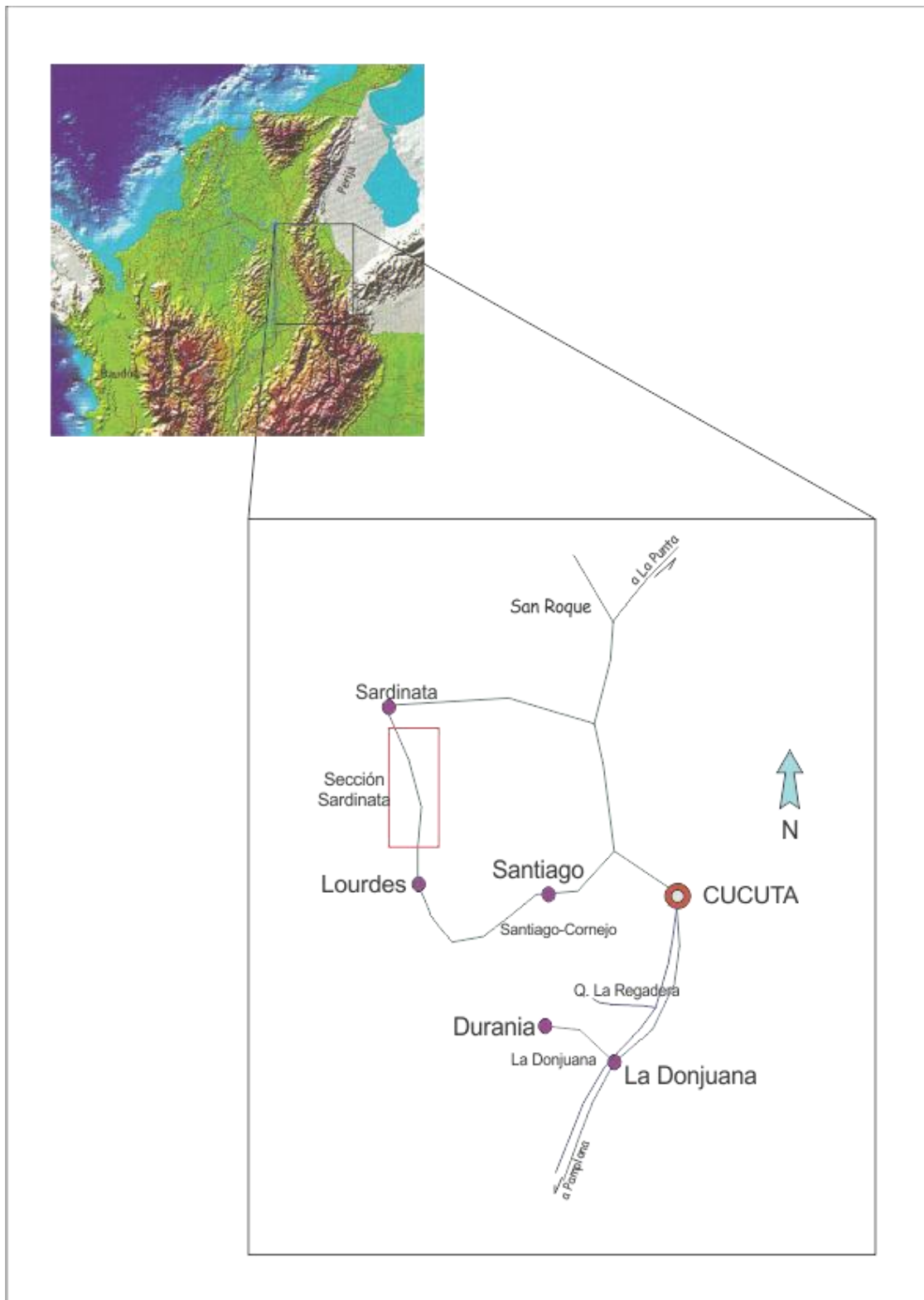
Figura 1. Localización de la Cuenca del Catatumbo



Fuente. Mondragón, 2002.

La Sección Sardinata (Figura 2), se encuentra localizada hacia el sur del Municipio de Sardinata, sobre la vía que conduce desde esta localidad hacia el municipio de Lourdes, y al costado izquierdo del Río Riecito (aguas arriba). Esta zona es compleja estructuralmente, pues está al costado oriental de la Cordillera Oriental, siendo afectada por una gran falla de cabalgamiento, denominada Las Mercedes, que tiene una orientación de N-S con buzamiento hacia el oeste, y la cual pone en contacto la secuencia del Mesozoico y Cenozoico con el basamento. La secuencia estratigráfica estudiada en esta zona, hace parte del flanco occidental del Anticlinal Espartillo, que a su vez se encuentra fallado por fallas satélites, ocasionando pérdida o repetición en el registro estratigráfico. La geomorfología de la zona, se caracteriza por pendientes moderadas a altamente inclinadas, con vegetación primaria y secundaria; la altitud en la sección varía entre los 400 a 500 msnm, prevaleciendo un clima cálido, pero con presencia de fuertes temporadas de lluvias hacia los meses de noviembre y diciembre, y luego entre abril y mayo, provocando caída de rocas e incluso avalanchas en la zona (Olaya y Linares, 1998; Suescun, 1998).

Figura 2. Localización de la Sección Sardinata.



Fuente. Tomada y modificada de Olaya y Linares, 1998.

4.2. MARCO TECTONOESTRATIGRÁFICO

La Cuenca del Catatumbo es considerada una cuenca tipo foreland, dado a las evidencias de la fuerte presencia de la tectónica compresiva originada por el triple choque de las placas tectónicas del Caribe, Nazca y Suramericana hacia el Mioceno superior-Plioceno, causando el levantamiento total de la Cordillera Oriental (i. e. Sierra del Perijá, Macizo de Santander y los Andes de Mérida). Dentro de la cuenca se observan dos estilos estructurales bien marcados, el primero predomina hacia el margen occidental de la cuenca y consta de fallas inversas y pliegues que involucran el basamento; por otro lado el segundo estilo predomina hacia el este y centro-oeste de la cuenca, caracterizado por fallas de cabalgamiento y pliegues asociados a wrench (Yurewickz, 1998; Hernández, 2000; Barrero et al, 2007). Entre las estructuras más destacadas dentro de la cuenca, están los sinclinales de Zulia y Socuavó; entre los anticlinales se destacan hacia el norte, el de Petrolea, Socuavó, Tibú, Sardinata, y hacia el sur Mucurera, Zulia, Cúcuta, Tasajero y Agua Caliente. Las fallas sobresalientes en la cuenca están, la falla de cabalgamiento Las Mercedes, la falla del Aguardiente y la falla de Chinacota.

4.3. ESTADIOS DE LA EVOLUCIÓN CRONOESTRATIGRÁFICA DE LA CUENCA DEL CATATUMBO

Dado a que la Cuenca del Catatumbo es la porción mas suroccidental de la Cuenca del Maracaibo, comparten la misma historia evolutiva, la cual comienza a partir del Triásico tardío-Jurásico, con un rifting continental con el que se da inicio a la separación del supercontinente Pangea, para luego estar bajo la influencia de un margen pasivo que perdura a lo largo del Cretácico y ya en el Cenozoico es afectada por los movimientos compresivos del choque entre las placas Nazca,

Suramericana y Caribe, ocasionando el levantamiento final de los Andes (Villamil y Pindell, 1998; Hernández, 2000; Mondragón, 2002).

4.3.1. Triásico Tardío – Jurásico. La ruptura de Pangea se dio paso a través de un gran rift continental, con el cual comenzaron a separarse Norte y Sur-América creando entre ellos el Proto-Caribe, acompañado por una intensa actividad volcánica. En Colombia lo que actualmente comprende la Península de la Guajira hacia el sur, la extensión de litosfera dentro del sistema de arcos magmáticos Andinos creó un complejo sistema de rift donde se vio involucrado el basamento Andino. La configuración estructural, se veía dominada por la formación de grabenes limitados por fallas normales creando grandes depresiones (Villamil y Pindell, 1998). Los sedimentos representativos del Jurásico son las llamadas “capas rojas” de origen continental, conocidas en la cuenca del Catatumbo como la Fm La Quinta y el Grupo Girón (figura 3).

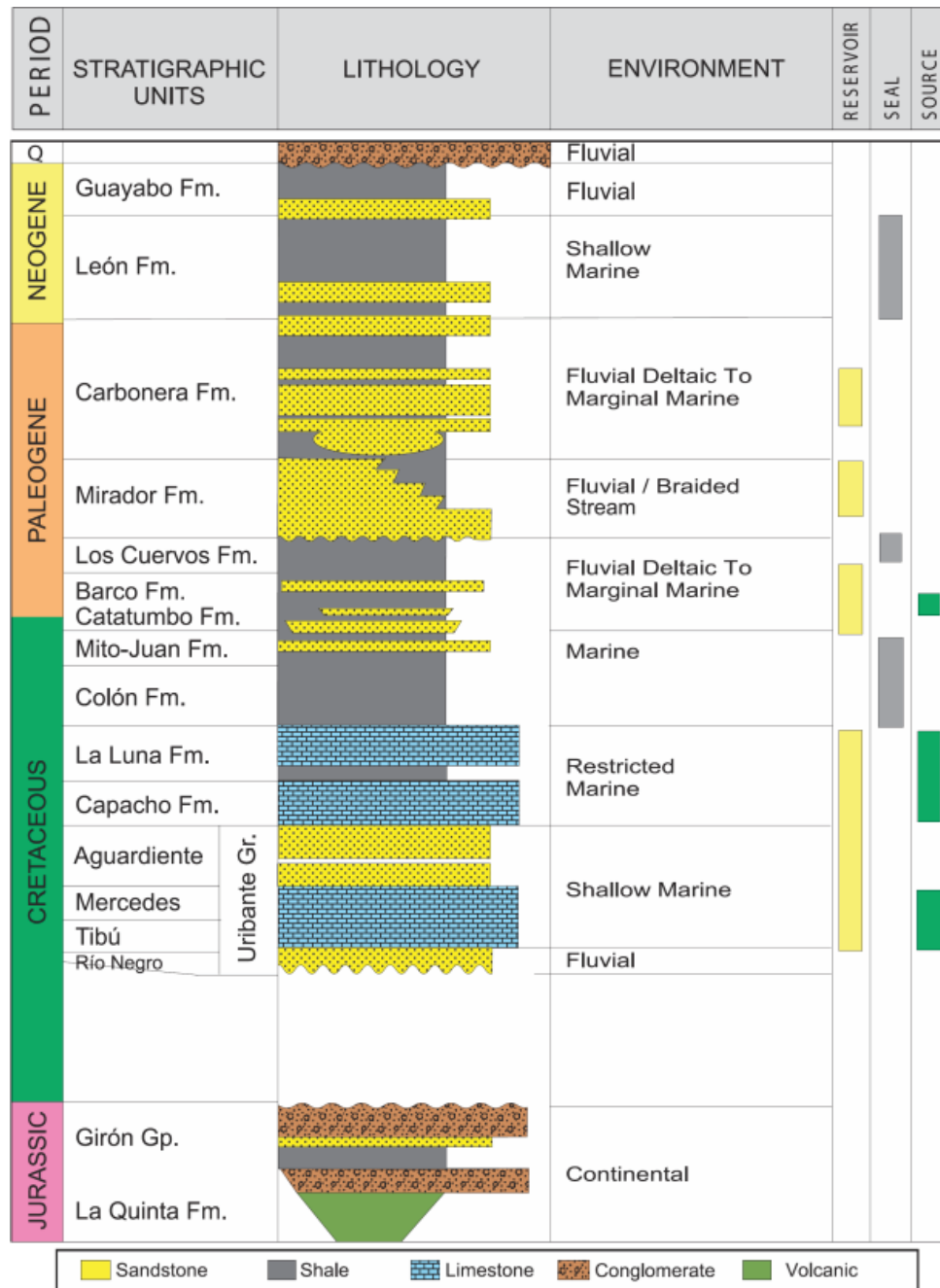
4.3.2. Cretácico. El siguiente estadio de evolución de la cuenca, fue el establecimiento de un margen pasivo que permaneció a lo largo del Cretácico, y hasta finales de este periodo (Maastrichtiano) se vio interrumpido por pulsos tectónicos que conllevaron al inicio del levantamiento de la cadena montañosa de los Andes. Durante la fase de margen pasivo, la tasa de subsidencia aumentó considerablemente que acompañada con cambios en el nivel del mar conllevaron a una transgresión regional que alcanzó su máxima inundación hacia el Turoniano Temprano, y luego pasa a una regresión regional que continua hacia finales del Cretácico y comienzos del Paleoceno (Villamil y Pindell, 1998). En la Cuenca del Catatumbo el registro estratigráfico del Cretácico ilustra muy bien la evolución de la cuenca (figura 3), comenzando por la Formación Río Negro (Barremiano), la cual se extiende discordantemente sobre las formaciones jurásicas. Se considera de origen continental, con predominio de cuarzoarenitas y arenas feldespáticas. Suprayaciendo la anterior, y como producto de una transgresión marina, se encuentra la Formación Tibú (Aptiano), compuesta por calizas fosilíferas

depositadas en un ambiente de plataforma interna. La Formación Mercedes (Albiano Temprano), presenta una intercalación de calizas masivas con shales fisiles, y algunos estratos de areniscas cuarzosas marcando un evento de máxima inundación. La Formación Aguardiente (Albiano) se caracteriza por reflejar estabilidad en el nivel del mar, y corresponde con depósitos de ambiente litoral o costero, donde predominan las areniscas glauconíticas de grano fino a medio. La Formación Capacho (Cenomaniano-Turoniano), está compuesta por calizas y shales fosilíferos y en ella se reconoce de nuevo una superficie de máxima inundación. La Formación La Luna (Turoniano - Santoniano), está constituida de calizas duras fosilíferas (principalmente foraminíferos) y shales negros altamente calcáreos, interpretándose para la cuenca un momento de alta paleoproduktividad (upwelling). A partir del Campaniano – Maastrichtiano las facies de la Formación Colón y Mito Juan, evidencian una regresión en la cuenca, junto con la disminución del espacio de acomodamiento debido a la tectónica compresiva sobre el margen occidental de Colombia que ocasionó el levantamiento de la Cordillera Central y la acreción de la Cordillera Occidental. (Notestein et al., 1944; Julivert, 1968; Richards, 1968; Macellari, 1988; Villamil y Pindell, 1998; Suescun, 1998; Villamil et al., 1999; Mondragón, 2002).

4.3.3. Cenozoico. Debido a la convergencia que empieza a ocurrir en el margen oeste del norte de Suramérica, las cuencas tipo rift o margen pasivo cambian y pasan a ser cuencas de foreland (i.e Cuenca de los Llanos y Catatumbo). A lo largo del Cenozoico se distinguen diferentes cambios en el nivel del mar, evidenciándose una fuerte influencia continental debido al desarrollo de las Cordilleras en Colombia (Cooper et al., 1995; Pindell et al., 1998, Mondragón, 2002). La Formación Catatumbo (Maastrichtiano tardío - Paleoceno), se compone de arcillas pizarrosas y arcillas ferruginosas, con pequeños mantos de carbón. La Formación Barco (Paleoceno), considerada roca reservorio, está compuesta por areniscas de grano fino a medio bien sorteadas, intercaladas con arcillas que marcan el cambio de un ambiente continental a uno transicional dando paso a la

depositación de la Formación Los Cuervos (Paleoceno tardío – Eoceno temprano) la cual consta principalmente de arcillas, arcillolitas carbonaceas, areniscas de grano fino intercaladas con mantos de carbón. La Formación Mirador (Eoceno temprano – Eoceno medio) se ha definido como la roca reservorio por excelencia de la Cuenca del Catatumbo, presenta areniscas de grano fino a medio, limpias masivas y a veces conglomerática de ambientes fluviales. La Formación Carbonera (Eoceno tardío – Oligoceno temprano) representa un incremento en la subsidencia en la cuenca y una transgresión regional, caracterizada por shales fluvio-deltaicos, areniscas intercaladas con mantos de carbón. La Formación León (Oligoceno tardío – Mioceno temprano), compuesta principalmente por shales y unos pequeños niveles de areniscas, sugiere la continuación del dominio marino. La Formación Guayabo (Mioceno medio – Plioceno) representa el levantamiento de la Cordillera Oriental, por lo tanto se distinguen principalmente facies de origen continental, predominando las areniscas y arcillas arenosas, por ultimo se encuentran los depósitos cuaternarios compuestos por gravas, arenas y arcillas de depósitos fluviales y de abanicos aluviales (figura 3) (Pindell et al., 1998; Mondragón, 2002; Notestein et al., 1944; Suescun, 1998; De Porta, 1974).

Figura 3. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Catatumbo.



Fuente. Barrero et al., 2007

4.4. FORMACIÓN CAPACHO

La Formación Capacho fue identificada inicialmente por Sievers en el año 1888, en la localidad de Táchira, Venezuela. Denominó así a un paquete de calizas

ubicadas entre el tope de la Formación Aguardiente y la base de la Formación La Luna. En Colombia se reconoció esta formación con el nombre de Formación Cogollo, dentro de la Concesión Barco por Notestein et al. (1944). Éste nombre se utilizó por mucho tiempo en la cuenca, a pesar de las redefiniciones hechas por Sutton (1946) y Rod y Maync (1954). Sutton (1946), no solo retoma el nombre de Formación Capacho, sino que el nombre de Cogollo se extiende en un sentido mayor, pasándolo al estatus de grupo, conformado por las formaciones Tibú, Mercedes, Aguardiente y Capacho. Richards (1968) realiza un trabajo detallado sobre las formaciones del Cretácico en la Cuenca del Catatumbo, tomando como base el trabajo de Notestein et al. (1944) en la Concesión Barco, y define para la Formación Capacho su sección tipo, al sur del municipio de Sardinata, Norte de Santander.

La Formación Capacho estuvo dividida en 5 miembros descritos por Notestein et al. (1944), pero Renz (en Richards, 1968) separó la formación en tres miembros en el área de Barco-Táchira, las cuales fueron reconocidas en su sección tipo (Sección Sardinata). El miembro inferior lo denominó La Grita, compuesto por lutitas negras, calcáreas, finamente laminadas intercaladas con calizas arcillosas de color gris oscuro, este miembro suprayace directamente a la Formación Aguardiente. El siguiente miembro consiste de una serie de shales calcáreos y micáceos de color gris oscuro a negro intercalados con calizas hacia la parte media del miembro, estas calizas son arcillosas, de color gris oscuro, ondulosa con capas fisiles, llamado Miembro Seboruco. Así mismo dentro de este miembro se reconoce un nivel importante de calizas duras, arcillosas de color gris oscuro, coquinoidal, ondulosa con capas fisiles a masivas, intercaladas con finas capas de shale, llamado Calizas de San Jerónimo con un espesor cercanos a los 65 m. El miembro superior o Guayacán, también denominado así por Notestein et al. (1944), no esta expuesto en su totalidad sobre la Sección Sardinata, por lo tanto se identificó sobre la vía Sardinata-Astilleros, y consiste de capas de coquinas

masivas de color marrón intercaladas con shales levemente calcáreos de color gris oscuro a negro.

4.4.1. Ambiente de depositación. En los trabajos realizados en la sección Sardinata y en el pozo Tasajero-1 por Olaya y Linares (1998) y en el pozo Petrolea 224 por Zapata et al. (2009), se definieron facies pertenecientes a ambientes de plataforma interna a externa (shales y calizas) con buena oxigenación debido a la gran bioturbación que presentan las lodolitas en la parte basal de la formación, mientras que hacia el tope la bioturbación disminuye asociándose con ambientes pobres en oxígeno.

4.4.2. Edad. Richards (1967) propuso el Cenomaniano – Turoniano como la edad de la formación, basándose en un reporte hecho por Renz (1956) de amonites provenientes de la Formación Maraca, la cual infrayace a la Formación Capacho y es del Albiano tardío, Renz reporto también amonites del Turoniano temprano (i. e. *Mammites*, *Vascoceras*, *Haplitoides*, *Fagesia*, *Thomasites* y *Neoptychites*) mientras que para el Turoniano tardío reporto el *Coilopoceras* el cual fue colectado en el miembro Guayacán. Sin embargo Hoffstetter (en Julivert, 1968) hace hincapié sobre la procedencia geográfica de los fosiles, puesto que solo se ha publicado el resumen del trabajo hecho por Renz, y señala la posibilidad que los limites de las formaciones en Colombia y Venezuela no sean sincrónicas, no obstante reconoce que varios de los amonites reportados pertenecen al Cenomaniano a pesar que hay amonites propios del Albiano tardío, por lo tanto el limite inferior de la Formación Capacho se sitúa dentro del Cenomaniano, por otro lado el genero *Coilopoceras* pertenece sin duda al Turoniano pero no es limitado al Turoniano tardío, situándose entonces el limite superior de la Formación Capacho en el Turoniano.

4.4.3. Espesor. La Formación Capacho registra variedad de espesores a lo largo de la cuenca, en la sección de Sardinata se midieron 600 m (E.g. Richards, 1968).

De acuerdo con Notestein et al. (1944) en el anticlinal de Petrolea la formación cuenta con 250 a 273 m, en el Rio de Oro con 175 m, en la Quebrada Santa Helena 350 m y en el Caño Agua Sal con 435 m. La revisión de diferentes registros eléctricos de pozos estratigráficos en toda la cuenca, muestran un espesor promedio hacia el noreste (i.e. Pozo Carbonera-5k, Petrolea 224, Petrolea sur) de la cuenca de 239 m, hacia el noroeste (i.e. Pozo Alamos-1, Puerto Barco – 4k) un espesor promedio de 200 m y hacia el suroeste (i.e. Pozo González – 1, Zulia Profundo) un espesor promedio de 262 m.

4.5. FORAMINÍFEROS

Los foraminíferos son organismos microscópicos unicelulares (protozoos), que pertenecen al reino Protista; se caracterizan por poseer una concha o caparazón, la cual puede ser de distinta composición (cálcica, aragonítica o aglutinada); que sirve para resguardar su cuerpo blando (citoplasma), de las interacciones con el medio que lo rodea. Presentan unas extensiones del cuerpo citoplasmático, llamadas reticulopodios, que permiten la locomoción, captura del alimento, excreción, así entre otras funciones (E.g. Loeblich y Tappan, 1964; Loeblich y Tappan, 1988; Haq y Boersma, 1998; Armstrong y Brasier, 2005; Benton y Harper; 2009).

De acuerdo con Armstrong y Brasier (2005), la clasificación sistemática se da de la siguiente manera, Filum Sarcodina, Clase Rhizopoda y Orden Foraminiferida. Según Loeblich y Tappan (1988), para reconocer los diferentes subórdenes se tienen en cuenta la estructura y composición de la pared de la concha, como criterios más importantes, luego se tienen en cuenta la forma y organización de las cámaras, la sutura y ornamentación; estableciéndose así 12 subórdenes, esta clasificación aplica tanto a organismos fósiles como a los que existen actualmente.

Además de las características morfológicas, los foraminíferos también se distinguen por su forma de vida; están los foraminíferos planctónicos, los cuales viven flotando en la superficie del mar a lo largo de su ciclo de vida y generalmente viven en la zona fótica (0 a 200m, dependiendo de la latitud). Por otro lado, los foraminíferos bentónicos, viven en el lecho marino, ya sea adheridos a él o libres dentro del mismo, y se adaptan a todos los ambientes marinos, ya sean someros o muy profundos (Armstrong y Brasier, 2005). Los primeros foraminíferos en ser reportados datan de estratos del Cámbrico inferior alrededor de 580 Ma (Culver 1991, en Culver 1994) al oeste de África, mientras que Bozak (2012) reporta la existencia de foraminíferos con forma tubular aglutinados en capas carbonatas, datadas en 750 Ma de la Formación Rasthof, Namibia. Los primeros registros fósiles de los foraminíferos planctónicos son del Jurásico medio, mostrando una baja diversidad hasta el Cretácico inferior y ya en el Maastrichtiano manifiesta una gran alza de variados especímenes (Loeblich y Tappan, 1988).

La ecología de los foraminíferos es muy compleja, presentan una amplia distribución geográfica, son abundantes y son susceptibles a diversos factores ambientales, i. e. la salinidad, temperatura, pH, profundidad, tamaño de grano, cantidad de materia orgánica, entre otros. Debido a lo anterior, y a su abundancia y alto potencial de fosilización, los foraminíferos planctónicos son utilizados como fósiles guía en la correlación de perfiles estratigráficos, también en cronoestratigrafía, dado que tienen un rango de vida corto y tasas evolutivas relativamente rápidas en el tiempo geológico, además son útiles para estudios (paleo)oceanoográficos y (paleo)climáticos, mientras que los foraminíferos bentónicos, dada la estrecha relación que guardan con el sustrato, aportan información valiosa a estudios paleoecológicos y paleoambientales de un área específica. Lo anterior ha ayudado a resolver muchos problemas geológicos y de la industria petrolera (Armstrong y Brasier, 2005; Acosta, 2004; Arenillas et al., 2000).

4.5.1. Foraminíferos bentónicos. Los foraminíferos de hábitat bentónico conforman la gran mayoría de estos microorganismos, son de variados tamaños, con formas distintivas y presentan diferentes componentes en su conchilla, lo anterior se asocia a su modo de vida y a la afinidad que tienen con el medio que los rodea. Por lo tanto dentro de los foraminíferos bentónicos se reconocen los diferentes tipos de conchillas:

4.5.1.1. Conchilla aglutinada. Los foraminíferos que presentan este tipo de conchilla, adhiere partículas del medio (i.e. cocolitos, espículas de esponjas y minerales pesados), seleccionados por tamaño, textura o composición, mediante un cemento orgánico, silíceo o calcáreo secretado por el mismo organismo, los foraminíferos que presentan esta característica se les ha reunido en un solo suborden llamado Textulariina (Armstrong y Brasier, 2005; Loeblich y Tappan, 1989).

4.5.1.2. Conchilla membranosa o pseudoquitinosa. Estas conchillas son delgadas, frágiles, compuestas de un material proteínico o pseudoquitinoso generalmente llamado tectin, a este tipo de conchilla se encuentran asociadas las formas más primitivas de foraminíferos (suborden Allogromiina) (Armstrong y Brasier, 2005).

4.5.1.3. Conchilla microgranular. Esta conchilla se caracteriza por tener cristales de calcita muy pequeños, ubicados al azar o alineados perpendicular a la superficie de la conchilla e intercalados con poros, dando una apariencia fibrosa, el suborden Fusulinina son reconocidos por presentar este tipo de conchilla (Armstrong y Brasier, 2005).

4.5.1.4. Conchilla calcárea. Es la más abundante y abarca varios subórdenes, sin embargo es posible encontrar 2 diferentes tipos de conchilla calcárea. Conchilla calcárea aporcelanada, se caracteriza por no poseer poros, y tener un

distintivo color blanco lechoso en luz reflejada y ámbar en luz transmitida. Por otro lado, están las conchillas calcáreas hialinas perforadas y microgranulares, la primera se distingue por su apariencia vidriosa en luz reflejada, además de abarcar la mayoría de subórdenes del Mesozoico a Cenozoico, dependiendo de la cantidad de magnesio (i.e. subórdenes Spirillinina y Rotallina), o si están compuestas de aragonito (i.e. subórdenes Involutinina y Robertinina) (Armstrong y Brasier, 2005).

4.5.2. Modos de vida. Kitazato (1984) realizó una investigación con el ánimo de conocer como vivían los foraminíferos bentónicos en el fondo del mar y en su investigación logro observar 3 diferentes modos de vida, existen por lo tanto, foraminíferos bentónicos que viven adheridos a los tallos de algunas algas o sobre el sustrato duro mediante un pegamento que segregan; otros viven moviéndose libremente sobre un sustrato blando y finalmente se encuentran foraminíferos que viven sobre las raíces de las algas gracias a la extensión de un pseudópodo. Concluye entonces que existe una estrecha relación entre el modo de vida de los foraminíferos bentónicos con la forma de la conchilla y así mismo con los diferentes ambientes marinos.

Los modos de vida de los foraminíferos bentónicos se soportan sobre la posición de preferencia, ya sea epifaunal (sobre el sustrato) o infaunal (dentro del sustrato), sin embargo diversos autores (E.g. Van der Zwan, 1999; Murray, 2006; Kuhnt, 1996) han demostrado que estos términos suelen no ser decisivos al determinar la ecología de estos foraminíferos, ya que ellos pueden pasar de una posición a otra como respuesta a diferentes factores como la cantidad de oxígeno (límite redox dentro el sedimento), suplemento de comida o el tipo de sedimento.

4.5.3. Alimentación (estrategias). Otra característica importante por conocer sobre los foraminíferos bentónicos, es la forma de alimentación, puesto que desarrollan diferentes estrategias de acuerdo al ambiente donde viven. Se dice

que su alimentación se constituye de plantas microscópicas y animales, tales como diatomeas, diferentes tipos de algas, radiolarios, larvas, pequeños equinodermos y artrópodos (Christiansen, 1971). Los reticulopodios que poseen juegan un importante rol en la alimentación pues con ellos reúnen la comida y ayuda en la digestión (Murray, 2006).

Los foraminíferos bentónicos suelen ser *herbívoros* o *bacteriófagos*, y están restringidos a la zona eufótica; los herbívoros activos reúnen algas y bacterias con sus reticulopodios y los pasivos son foraminíferos bentónicos epifaunales sésiles que reúnen su comida desde donde se encuentre adherido. Los foraminíferos que se alimentan por *suspensión* extienden sus reticulopodios dentro de la columna de agua, sin embargo dependen de las corrientes de agua para obtener su comida y se hace necesario estar sobre el sustrato a medida que se incrementa la altura sobre el fondo marino, pues la velocidad de las corrientes aumenta; cuando viven en estratos blandos permanecen enterrados pero con la posición de la abertura sobre la superficie (Lipps, 1983 y Schnfeld, 2002 en Murray, 2006). Existen también los *detritívoros*, se alimentan de detritos orgánicos, abundan sobre la superficie del sustrato y se pueden presentar en cualquier ambiente, aunque este puede ser el principal método en zonas bajo la zona fótica. Por otro lado los *carnívoros* atrapan su presa con sus reticulopodios y luego es adherido a unseudópodo, donde la presa muere y la digestión se realiza por medio de los reticulopodios. Otras formas de alimentación son el parasitismo, el consumo de material orgánico disuelto y algunos son omnívoros (Murray, 2006).

4.5.4. Sustrato. Armynot du Châtelet (2009), sostiene que el tamaño de grano del sustrato es el parámetro ambiental que más influye sobre la abundancia y diversidad de especies, por ejemplo cuando se tiene un tamaño de grano grueso, la diversidad y la abundancia de especies es baja y viceversa. Además de controlar la abundancia de los organismos, controla también los comportamientos como ya se ha mencionado anteriormente.

4.5.5. Morfogrupos. La integración de los factores anteriores, arrojo como resultado la existencia de los morfogrupos, útil hoy en día para realizar interpretaciones paleoecológicas, lo cual significa agrupar especímenes de acuerdo a la forma de su concha sin importar la conexión taxonómica (Murray, 2006). Aunque si bien es cierto, que los foraminíferos bentónicos depende de las condiciones locales, algunos autores han mostrado cierto patrón de la forma conchilla con respecto a la profundidad y factores ambientales (E.g. Jones and Charnock, 1985; Corliss and Fois, 1985; Corliss and Chen, 1988). Cuando se habla del morfogrupo denominado con la letra “A”, se entiende por foraminíferos bentónicos con forma de rama (ramificaciones) o tubulares, se asocian a ambientes abisales o batiales inferiores; el morfogrupo “B” abarca diferentes formas, entre ellas, forma globular, con enrollamiento (aplanadas), planoespiral y trocoespiral, irregulares, cónica y cóncavo-convexa, estas formas representan diferentes subgrupos, su presencia en los distintos ambientes depende del subgrupo, sin embargo se les puede encontrar desde zonas someras hasta profundas; el morfogrupo “C”, tiene dos subgrupos, el C1 tienen formas multiloculares elongadas con un crecimiento mixto, con mayor presencia en la plataforma continental interna, mientras que el C2 es multilocular elongada con forma quinqueloculina, y aparece en ambientes marginales o pantanosas; por ultimo esta el morfogrupo “D”, son multiloculares, trocoespirales de troco bajo, son abundantes en ambientes marginales y pantanosos (E.g. Jones and Charnock, 1985; Murray, 2011). Generalmente en estas asociaciones se usan foraminíferos bentónicos aglutinados, debido a su abundancia y preservación, pues los bentónicos calcáreos sufren gran daño en la preparación de las muestras, y suelen tener ambientes predilectos (Jones and Charnock, 1985; Corliss, 1985).

4.6. RECONSTRUCCIÓN PALEOECOLÓGICA

Los datos paleontológicos pueden ser usados para interpretar las condiciones bajo las cuales estuvo sujeta las secuencias estratigráficas durante su depositación. Esto se hace comparando la composición de la asociación fósil con datos provenientes de análogos modernos (Murray, 2006). Por eso las observaciones actuales han concluido que por lo menos existen tres parámetros fundamentales a tener en cuenta, a la hora de iniciar cualquier reconstrucción paleoecológica por medio de foraminíferos bentónicos, ellos son, la oxigenación, la profundidad y flujo de materia orgánica (Van der Zwaan, 1999).

4.6.1. Flujo de materia orgánica y oxigenación. Es difícil hablar por separado de estos dos factores, puesto que están directamente relacionados entre sí e influyen sobre el comportamiento de los foraminíferos bentónicos. El flujo de materia orgánica que llega desde las aguas someras hacia las profundidades del mar, se presenta como la mayor fuente de alimento, para los organismos bentónicos. De acuerdo a la disponibilidad de alimento, se incrementa la abundancia de organismos, provocando así, una gran demanda de oxígeno llegando a una disminución del mismo, y por ende a la disminución del número de foraminíferos bentónicos (Van der Zwaan, 1999). Existe un modelo propuesto por Jorissen (1995), llamado TROX (Thropic Oxygen), en el cual se teorizan las consecuencias de las variaciones entre, la cantidad de alimento y la concentración de oxígeno; evidenciando diversas condiciones ambientales favorables y desfavorables para los foraminíferos. En las áreas eutróficas, donde existe gran cantidad de alimento pero una baja en la cantidad de oxígeno, aumentarán las especies bentónicas infaunales (viven dentro del sedimento), pues son capaces de metabolizar las partículas de alimento existente entre el sedimento, y presentan mayor tolerancia a condiciones anóxicas. Por otro lado, en áreas oligotróficas se aumenta el nivel de oxígeno pero hay una baja significativa en la cantidad de alimento; en estas zonas se concentran los foraminíferos bentónicos epifaunales (viven sobre el sustrato), quienes podrán tomar con facilidad el alimento en la

superficie del sustrato, y así dejando con poca posibilidad de alimento a especies infaunales, las cuales serán escasas en estos tipos de ambientes.

4.6.2. Profundidad. Los foraminíferos bentónicos poseen una gran adaptabilidad ecológica, pues se les puede encontrar en diversos ambientes, i.e. desde aguas someras hasta las profundidades marinas (zona abisal), son capaces de vivir en ambientes con baja y alta oxigenación, en aguas cálidas y frías, con condiciones altas o bajas de energía. Estas características ecológicas son utilizadas en análisis paleobatimétricos, que contribuyen al conocimiento paleogeográfico y a la reconstrucción de la historia de las cuencas sedimentarias (etapas de levantamiento y subsidencia) (Van der Zwaan, 1990). Sin embargo, existen factores limitantes, en cuanto al uso de los foraminíferos bentónicos, uno de ellos es el poco entendimiento que aun existe sobre el tema. Los rangos batimétricos de las especies pueden variar de un lugar a otro; y no se puede asegurar si una especie ha sido siempre isobatial o haya cambiado el rango batimétrico a lo largo del tiempo. Adicional al estudio especie a especie, existe una técnica que consiste en evaluar la abundancia de foraminíferos planctónicos contra foraminíferos bentónicos (%P/B), esta técnica muestra el incremento del porcentaje de foraminíferos planctónicos desde la costa a zonas profundas, debida al incremento de la distancia desde la zona costera, donde la turbidez dificulta la producción primaria; por otro lado, los foraminíferos bentónicos muestran un comportamiento diferente, ya que se evidencia un aumento de especímenes en zonas someras y disminuye hacia la zona batial, donde la cantidad de oxígeno y flujo de materia orgánica disminuye, mostrándose así, que la distribución batimétrica depende en gran parte por la comida y el oxígeno (Van der Zwaan, 1990; De Rijk, 2000).

5. METODOLOGÍA

5.1. FASE 1

5.1.1. Recopilación bibliográfica. Para establecer bases sólidas en la elaboración de cualquier proyecto, el primer paso es la recopilación bibliográfica, la cual en este caso consistió en la adquisición de artículos sobre foraminíferos, paleoecología, geoquímica y sedimentología. La mayoría de la información fue suministrada por el Laboratorio de Micropaleontología del ICP, además de la consulta en diferentes bases de datos como ELSIEVER, JSTOR, GeoRef, y diferentes journals. Por otro lado se hizo toda la recopilación de información necesaria sobre la zona de campo, con el fin de seleccionar la mejor sección estratigráfica, conocer con anterioridad las rutas de acceso y la situación de orden público.

5.2. FASE 2

5.2.1. Trabajo en campo (Muestreo – Sección Sardinata). Según la metodología usada en campo, cada muestra se tomó con 1m o 3m de distancia según la columna estratigráfica, con un peso aproximado de 3kg, al tomar la muestra también se tuvo en cuenta que debía ser lo más fresca posible, es decir, que el muestreo no fuera superficial sino que se pudiese penetrar en la roca para alcanzar una muestra donde no mostrara signos de oxidación o al menos poca interacción con el medio, con el fin de obtener un resultado efectivo en los análisis posteriores. Como el objetivo del proyecto es el análisis de microfósiles, fue necesario tener un mayor control sobre las litologías lodosas, de ahí que se descartaran tomar muestras sobre litologías arenosas, pues es conocido el dominio marino de la formación, al final se tomaron 33 muestras (tabla 2) las cuales fueron debidamente empacadas y referenciadas.

5.2.2. Preparación y Análisis de muestras. Las 33 muestras fueron sometidas a análisis micropaleontológicos y geoquímicos, y los análisis petrográficos solo se hicieron sobre 16 muestras que fueron escogidas estratégicamente. En los

laboratorios de ICP-Ecopetrol se llevaron a cabo la preparación de las muestras para los análisis propuestos.

5.2.2.1. Sedimentología. Para la caracterización sedimentológica en la Sección Sardinata, se tomaron 16 muestras, la mayoría están ubicadas entre la parte basal y parte media de la columna estratigráfica. Para la parte basal de columna estratigráfica se tienen 7 muestras para el análisis petrográfico, debido a que las descripciones sedimentológicas consignadas en este sector, no dan certeza sobre el tamaño de grano ya que es muy fino y no es posible distinguir si la roca es una arenisca de grano fino o una arenisca lodosa. Hacia la parte media de la columna se tienen también para análisis petrográfico 7 muestras, estas muestras se seleccionaron con el ánimo de identificar petrográficamente la existencia de fauna fósil y estructuras internas como la laminación. De todas las muestras tomadas en campo, dos son calizas, por lo tanto realizar el análisis petrográfico es muy importante para determinar la presencia de fauna fósil y por ende la composición de la roca en si. Para la descripción petrográfica se utilizó la metodología propuesta por Folk (1974) y se utilizaron también las guías de sedimentología de Cruz y Caballero (2007), y para la descripción de las calizas se utilizó también la metodología propuesta por Dunham (1962 en Tucker y Wright). Para conocer el nombre textural de la roca solo se tomo en cuenta el armazón (material de tamaño grava o arena mas abundante en la roca) y la matriz para hacer un recalcu de los porcentajes, que luego serán ubicados en los diagramas triangulares propuestos por Folk (1974).

Además todas las muestras fueron teñidas con resina epoxica, para poder evaluar la porosidad de las rocas.

Como método experimental para conocer el porcentaje de arena presente en cada muestra, se tomo de la preparación de las muestras para el análisis micropaleontológico, el peso inicial y el peso final de la muestra, se realiza

entonces un tamizado teniendo en cuenta los valores utilizados por Wenworth (Folk, 1974) en cada tamiz, para así determinar el porcentaje de arena.

5.2.2.2. Micropaleontología. Todas las muestras (33) fueron sometidas a la preparación para el análisis micropaleontológico, ya que es importante establecer la presencia o ausencia de la fauna fósil a lo largo de la sección. La mayoría de las muestras provienen de litologías de grano muy fino (lodolitas), sobre todo de la parte media de la formación, donde la densidad del muestreo es alta y la distancia entre las muestras es muy corta.

Para la preparación de las muestras, se tomaron alrededor de 60g, los cuales fueron entregados al laboratorio; para disgregar la roca fue necesario dejarla en una solución de agua oxigenada por lo menos dos días, después el material es lavado sobre un juego de mallas numero 230 y 120, con el fin de separar totalmente el sedimento mas fino, la muestra que queda en los tamices es calentada en un horno a 60°C alrededor de un 1 día, cuando esta totalmente seca se toma el peso final. Por último las muestras se guardan en pequeños frascos, y quedan listas para proceder con el análisis micropaleontológico.

Cuando las muestras ya están listas para su análisis, son pasadas por un juego de tamices con abertura de 45, 63, 125 y 500 μ , con el fin de hallar alguna relación entre el tamaño, la diversidad y la abundancia de foraminíferos. Luego de cada tamiz se esparce un poco de muestra sobre una bandeja de la cual se extraen por medio de un estereoscopio, todos los microfósiles y minerales presentes (i. e. foraminíferos, ostrácodos, pirita, glauconita, etc). Los foraminíferos que son extraídos se ubican sobre una lámina o placa dividida en 60 casillas. Al término de esta labor se procede con la agrupación de acuerdo con las características morfológicas que presenten los individuos (i.e. tipo de enrollamiento, número de cámaras, composición de la conchilla, etc.) y así poder definir los diferentes morfogrupos siguiendo los criterios propuestos por Jones y Charnock (1985) y

Murray (2011) (ver sección 4.5.5.), con este tipo de agrupamiento es posible realizar también la identificación taxonómica, la cual se hizo con base en la clasificación hecha por Loeblich y Tappan (1988) para los foraminíferos planctónicos y bentónicos calcáreos, y según Kaminski (2000) para los foraminíferos bentónicos aglutinados. La identificación taxonómica solo se logro hacer hasta el nivel de género, puesto que la mayoría de los foraminíferos se encontraban mal preservados. En algunas muestras se encontraron foraminíferos planctónicos, a los cuales se le identifico taxonómicamente según Loeblich y Tappan, la identificación se logro hacer hasta especie, sin embargo muchos individuos solo pudieron ser conferidos.

La fracción de muestra que fue picada se peso, con el fin de conocer la cantidad de individuos por fracción, y así poder estandarizar la abundancia de individuos por gramo de sedimento. Para establecer la diversidad de morfogrupos encontrados por muestra se decidió utilizar el índice de Fisher (α), y para reconocer las distintas agrupaciones de foraminíferos a lo largo de la sección Sardinata se realiza un análisis de agrupamiento o cluster, por medio de índices de similitud como la distancia euclidiana, la cual consiste en agrupar los caracteres mas cercanos.

5.2.2.3. Geoquímica. El análisis geoquímico se realizo sobre las 33 muestras recolectadas en campo, con el fin de poder relacionar los parámetros geoquímicos de la roca con las técnicas anteriormente expuestas, y así definir el ambiente de depositación de la Formación Capacho en la Sección Sardinata. La preparación de muestras para los análisis geoquímicos estuvo a cargo del Laboratorio de Geoquímica del ICP, en donde se entregaron 30g de muestra para la obtención del TC (Carbono Total) y pirolisis Rock Eval.

Los procesos químicos ocurridos en cualquier ambiente marino condicionan la vida que allí exista, por lo tanto los resultados obtenidos con los parámetros abajo

mencionados permitirán conocer las condiciones a las cuales estuvieron sujetas los foraminíferos (bentónicos y planctónicos). Los parámetros geoquímicos utilizados para cuantificar los diversos procesos químicos ocurridos durante la depositación y diagénesis de una roca fueron el COT (Carbono Orgánico Total), IH (Índice de Hidrogeno), S1 y S2 (índices del potencial de generación de hidrocarburos): Estos parámetros son obtenidos a partir de la pirolisis Rock Eval, mientras que el CaCO_3 (Carbonatos) se halla de la diferencia entre el Carbono Total (TC) con el Carbono Orgánico Total (COT), determinando así el Carbono Inorgánico, el cual se relaciona con el peso de la calcita.

El COT describe la cantidad de materia orgánica en una muestra de roca, la cual se compone de bitumen y kerógeno, y su cantidad se expresa en porcentaje en peso (McCarthy et al, 2011).

El $\% \text{CaCO}_3$ refleja del contenido de carbonatos, que a su vez está controlado por la productividad primaria (i.e. cantidad de nanofósiles calcáreos), la presencia de microfósiles calcáreos y en plataformas continentales por la presencia de corales y algas calcáreas.

El IH relaciona la cantidad de hidrogeno presente dentro del kerógeno de cada muestra, además sus valores permiten conocer el tipo de kerógeno que constituye a la roca y de acuerdo a esto conocer el ambiente de depositación (Tabla 1) (McCarthy et al, 2011).

Tabla 1. Valores de IH relacionados con el tipo de kerógeno y su ambiente de depositación.

Tipo de Kerógeno	IH (mg HC/gr COT)	Material Fuente	Ambiente general de depositación
I	>600	Algáceo principalmente	Lacustre
II	200-600	Planctónico principalmente, con alguna contribución de material algal	Marino
III	50-300	Plantas superiores principalmente	Terrestre
IV	<50	Material retrabajado u oxidado.	Diferentes tipos de ambiente

Fuente. McCarthy et al, 2011.

El pico S1 representa la cantidad en miligramos de hidrocarburo libre que puede ser destilado termalmente en un gramo de muestra (McCarthy et al., 2011). Por otro lado, el pico S2 representa en miligramos el hidrocarburo residual en un gramo de roca, indicando así la cantidad potencial de hidrocarburos que la roca fuente aun podría llegar a generar, si la maduración termal continúa (McCarthy et al., 2011).

5.3. FASE 3

5.3.1. Interpretación de resultados. Las variables involucradas en este tipo de análisis con respecto a los foraminíferos bentónicos son la cantidad de oxígeno y suministro de materia orgánica, representadas en el porcentaje de COT y la profundidad, indicada por la interpretación de los diferentes morfogrupos. Por lo tanto de la correlación de estos parámetros darán indicios de las condiciones ambientales a los cuales estuvo sujeta la Formación Capacho.

La interpretación ambiental es comparada con la estratigrafía de secuencias propuesta por Olaya y Linares (1998) en la sección Sardinata, para reconocer las diferentes asociaciones fósiles propias de alzas o bajas en el nivel del mar, así mismo los foraminíferos encontrados en la sección serán evaluados con respecto a los foraminíferos encontrados en el pozo Oripaya-1, con el ánimo de distinguir cambios en las asociaciones hacia el este de la Cuenca del Catatumbo, donde se encuentra ubicado el pozo.

6. RESULTADOS

6.1. CAMPO

La sección de Sardinata (figura 2) fue la escogida para realizar el trabajo de campo, pues es reconocida por Richards (1968) como la sección tipo de la Formación Capacho en Colombia, además de presentar ya un levantamiento estratigráfico realizado por Olaya y Linares en el año 1998, el cual fue hecho con gran detalle (Anexo 1). El trabajo en campo, se llevó a cabo bajo el marco de un proyecto de gran envergadura perteneciente a ECOPEPETROL. La sección tiene coordenadas 1'381.532 Norte y 1'140.516 Este (Anexo 2), y esta ubicada en la parte superior izquierda del cuadrángulo G13 (Ingeominas, 1998).

Olaya reportó para la Formación Capacho sobre la sección Sardinata un espesor promedio de 326m, mientras que Richards (1968) menciona un espesor de 600m aunque deja muy claro que la parte mas superior de la formación (miembro Guayacán) no fue posible medirla en la sección por lo que fue medida en otro sector. El espesor calculado en la salida de campo fue de 1010 metros, aunque este espesor genera muchas dudas, puesto que la Formación Capacho no se expone en su totalidad, y en el cuadrángulo G13 (Ingeominas, 1998) son evidentes pequeñas fallas que afectan la zona, aunque en campo fue difícil el reconocimiento debido a la existencia de muchas zonas cubiertas por capa

vegetal, y los deslizamientos y desprendimientos de roca son frecuentes en la zona.

Se tomaron en total 33 muestras (tabla 2), distribuidas en toda la sección, sin embargo hay secciones donde el muestreo es muy denso, aprovechando las características litológicas (lodolitas) y sobre todo los pocos afloramientos que existen.

Tabla 2. Listado de muestras recolectadas a lo largo de la sección Sardinata.

Muestras	Norte	Este
M112_1	1.380.976	1.140.661
M40	1.140.511	1.381.129
M41	1.140.521	1.381.139
M42	1.140.522	1.301.154
M43	1.140.518	1.381.154
M44	1.140.512	1.381.180
M45	1.140.522	1.381.202
M46	1.140.745	1.381.391
M47	1.140.748	1.381.412
M48	1.140.748	1.381.412
M49	1.140.715	1.381.409
M54	1.140.662	1.381.431
M55	1.140.662	1.381.431
M56	1.140.662	1.381.431
M57	1.140.662	1.381.431
M58	1.140.662	1.381.431
M59	1.140.662	1.381.431
M60	1.140.662	1.381.431
M61	1.140.662	1.381.431

M62	1.140.662	1.381.431
M63	1.140.662	1.381.431
M64	1.140.408	1.381.693
M65	1.140.357	1.381.746
M66	1.140.357	1.381.746
M67	1.140.357	1.381.746
M68	1.140.357	1.381.746
M69	1.140.343	1.381.749
M70	1.140.343	1.381.749
M71	1.140.338	1.381.750
M72	1.140.296	1.381.754
M74_1	1.382.764	1.140.325
M76	1.382.736	1.140.326
M77	1.382.736	1.140.326

6.2. SEDIMENTOLOGÍA

Se evidenció la presencia de distintas litologías a lo largo de la Sección Sardinata (Anexo 1), mostrando hacia la base de la columna estratigráfica una intercalación de lodolitas con areniscas de grano muy fino (figura 4), altamente bioturbadas, según Olaya y Linares (1998), hacia la parte media se incrementan las facies de grano muy fino, principalmente de compone de lodolitas, de color negro, laminadas y con espesores considerables (figura 5), estas facies persisten hacia el final de la sección.

Figura 4. Afloramiento de la parte basal de la columna estratigráfica en la Sección Sardinata, en esta zona se encuentra una intercalación de areniscas con lodolitas. La muestra M41 pertenece a este afloramiento.



Fuente. Autora

Figura 5. Parte media de la columna estratigráfica, se evidencia el predominio hacia este sector de lodolitas color negro, aquí se tomaron las muestras M49 hasta la muestra M63.



Fuente. Autora

Las muestras seleccionadas para el análisis petrográfico se encuentran distribuidas principalmente hacia la parte basal y media de la columna (tabla 3).

Tabla 3. Listado de las muestras para análisis petrográfico a lo largo de la Sección Sardinata

Muestra	Litología	Coordenadas		Observaciones
		Norte	Este	
M112_1	Arenisca grano muy fino limosa	1.380.976	1.140.661	Roca de color amarillo (5Y8/4) en muestra de mano, con una fuerte presencia de glauconita
M40	Arenisca grano muy fino limosa	1140511	1381129	Roca de color amarillo (5Y8/4) en muestra de mano, con una fuerte presencia de glauconita
M41	Arenisca de grano muy fino	1140521	1381139	Roca con cemento calcáreo.
M42	Iodolita arenosa	1140522	1381154	Roca de color gris (N3) en muestra de mano.
M43	Arenisca grano muy fino limosa	1140118	1381154	Roca impregnada de hidrocarburos.
M44	Arenisca grano muy fino limosa	1140512	1381180	Roca con predominio de glauconita de tamaño <45 μ .
M45	Arenisca grano muy fino limosa	1140522	1381202	Color blanco a grisáceo (N8), cemento silíceo.
M46	wackstone	1140745	1381391	Presenta glauconita y circón, de color gris (N3) en muestra de mano.
M55	Iodolita	1140662	1381431	Roca de color gris oscuro a negro (N2).
M56	Iodolita	1140662	1381431	Roca de color gris oscuro a negro (N2).
M57	Iodolita	1140662	1381431	Roca de color gris oscuro (N2), ligeramente calcárea.
M58	Iodolita	1140662	1381431	Roca de color gris oscuro a negro (N2), ligeramente calcárea.
M63	Iodolita	1140662	1381431	Roca de color negro (N1).
M69	Iodolita arenosa	1140343	1381749	Roca con algunas señales de oxidación.

M71	lodolita	1140338	1381750	Roca con signos de oxidación alta, la roca es de color gris (N3), no es calcárea.
M74_1	wackstone	1.382.764	1.140.325	Es evidente su textura esparítica.

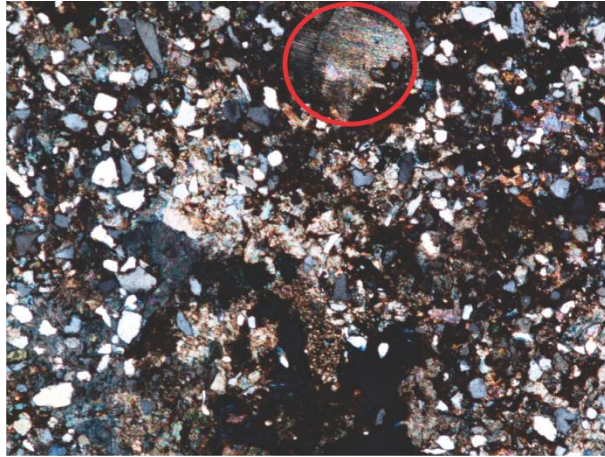
6.2.1. Areniscas. La determinación textural de las areniscas consta del análisis de armazón, matriz, cemento y porosidad, características que son descritas a continuación.

Armazón: Las areniscas analizadas presentan un armazón igual o mayor al 50% del total de la muestra, compuesto por partículas con tamaños que varían desde arena muy fina a limo muy grueso según la escala de Wentworth (Folk, 1974). El armazón se compone principalmente de partículas de cuarzo, con formas angulares a sub-redondeas, y en general con un calibrado regular a bueno.

Matriz: Lo que se puede apreciar en las secciones delgadas, es que la matriz se compone de sericita y caolinita principalmente, y esta representada por porcentajes que van desde menos del 5% hasta el 15% del total de la muestra.

Cemento: Cemento calcáreo fue encontrado en 4 muestras (M112_1, M40, M41, M44) en proporciones muy pequeñas (<5%), sin embargo en la muestra M112_1 su porcentaje es mayor y se distinguen claramente cristales de calcita (E.g. figura 6). Por otro lado las muestras M43 y M45 presentan un cemento silíceo en proporciones menores también.

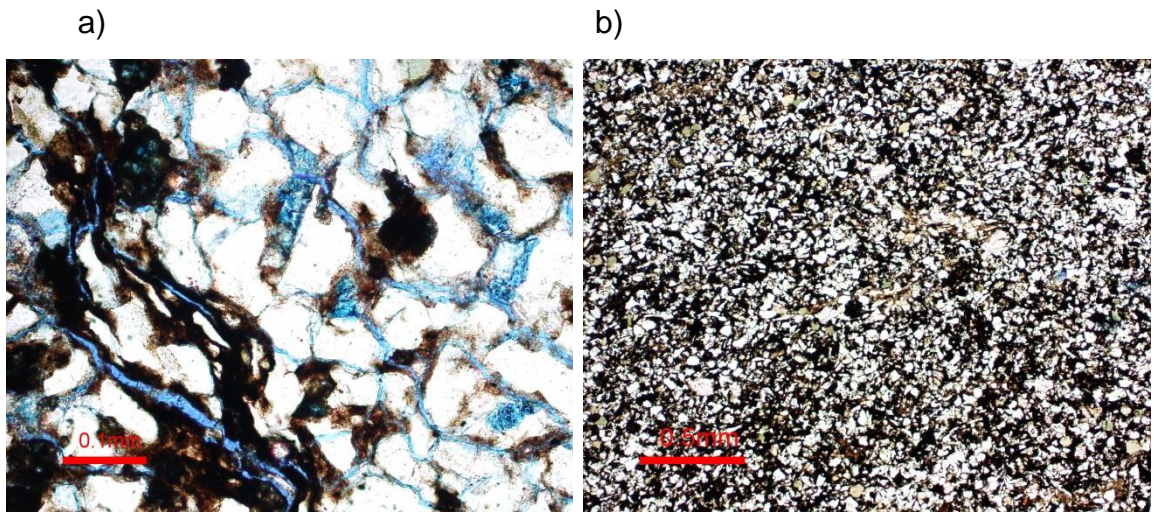
Figura 6. Cemento calcáreo presentándose en cristales (circulo rojo) en la muestra M112_1 (foto tomada en nicoles cruzados con el objetivo 5x)



Fuente. Autora

Porosidad: Es posible observar que las muestras presentan dos tipos de porosidad, porosidad primaria y porosidad secundaria; los cuales están presentes en todas las muestras. La porosidad primaria es representada por porosidad interpartícula, aunque en menor proporción, sin embargo es la porosidad secundaria la que llama la atención de las muestras, puesto que muchas presentan pequeñas fracturas que están impregnadas por fluidos, al parecer por hidrocarburos, los cuales están presentes también en los moldes de foraminíferos y de algunas partículas (E.g. figura 7, a, b).

Figura 7. (a) Porosidad secundaria representada en la fractura (izquierda), donde se evidencia el paso de fluidos (hidrocarburo) (foto en nicoles paralelos). (b) Roca impregnada de hidrocarburo (M43), ocupando gran parte de la muestra (foto en nicoles paralelos).



Fuente. Autora

En la tabla 4, están consignados los porcentajes de armazón, matriz, cemento y porosidad, obtenidos a través del análisis petrográfico. Son muy notables los altos porcentajes que se tienen para la arena los cuales superan en su mayoría el 60%, la matriz en cambio tiende a valores bajos y se compone principalmente de limo; el cemento y la porosidad presentan porcentajes considerables que ayudan a definir mas claramente las condiciones diagenéticas de las rocas.

Tabla 4. Porcentajes de los componentes texturales de seis muestras analizadas.

Muestra	% Armazón				%Matriz		%Cemento	%Porosidad
	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limo	Arcilla		
M112_1		68	7		3	2	10	10
M40		77	3		4	3	3	10
M41		71	1		4	1	3	20
M43		52	40		3	2	1	1
M44		72	6		7	3	5	10
M45		61	15		9	6	4	5

Con el recalcu de los porcentajes (tabla 5), se hace aun mas evidente el predominio del tamaño arena en las muestras, obteniéndose porcentajes mayores al 80%.

Tabla 5. Porcentajes recalculados del armazón y la matriz para las seis muestras analizadas.

Muestra	% Armazón				%Matriz		Porcentaje total	Porcentaje recalculado		
	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limo	Arcilla		Arena	Limo	Arcilla
M112_1		68	7		3	2	80	85	12,5	2,5
M40		77	3		4	3	87	89	8	3
M41		71	1		4	1	77	92	7	1
M43		52	40		3	2	97	54	44	2
M44		72	6		7	3	88	82	15	3
M45		61	15		9	6	91	67	26	7

De acuerdo con los porcentajes de la tabla 5, al ubicarlos en el diagrama triangular propuesto por Folk (1974) para clasificación textural de las rocas, la muestra M41 es una arenisca de grano muy fino, puesto que contiene mas del 90% granos tamaño arena, por otro lado las muestras M112_1, M40, M43, M44, M45 son areniscas de grano muy fino limosas, aunque con porcentajes de arena altos, al menos para las muestras M112_1 (85%) y M40 (89%) (Figura 8).

Figura 8. Diagrama triangular (Folk, 1974), modificada para mostrar la clasificación textural de las muestras analizadas.



Fuente. Autora.

Composición mineralógica.

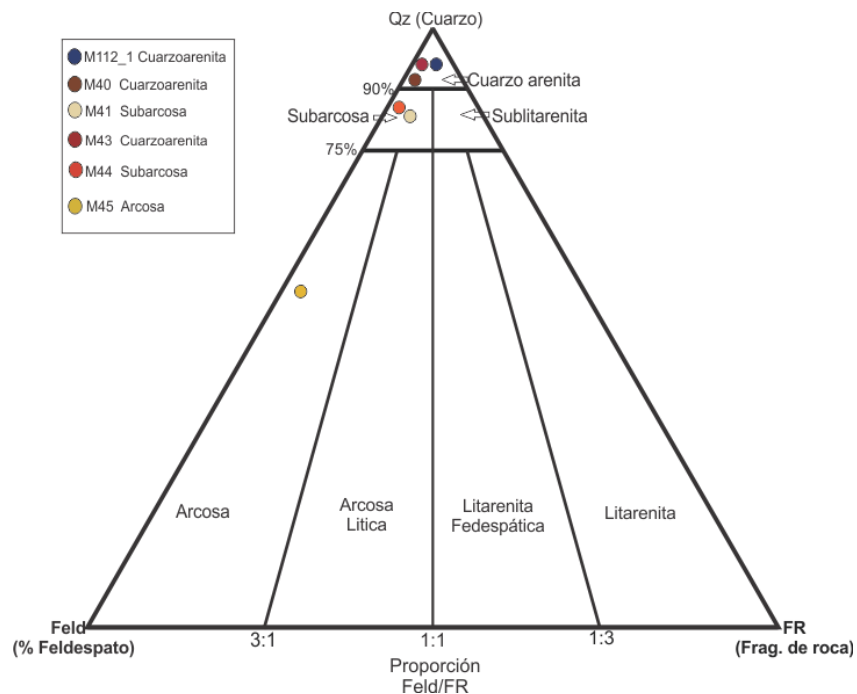
Las muestras analizadas están compuestas principalmente de cuarzo, siendo el mineral predominante en el almacén de las rocas, junto con feldespatos y mica muscovita en menor proporción, y como minerales accesorio esta el circón y la glauconita presente en todas las muestras y en cantidades considerables. En la tabla 6, se encuentra resumida la información mineralógica, donde se listan los porcentajes de los componentes principales, cuarzo (Qz), feldespatos (Feld) y Fragmentos de roca (FR), respectivamente; además de sus porcentajes recalculados para hallar la clasificación composicional.

Tabla 6. Porcentajes de los componentes principales y su respectivo porcentaje recalculado para hallar la clasificación textural.

Muestra	Porcentaje Componentes			Porcentaje total	Porcentaje recalculado		
	% Qz	% Feld	% FR		% Qz	% Feld	% FR
M112_1	40	2	0	42	95	5	0
M40	40	4	0	44	91	9	0
M41	45	6	2	53	85	11	4
M43	60	3	0	63	95	5	0
M44	50	8	0	58	86	14	0
M45	35	30	0	65	54	46	0

Según el diagrama triangular (figura 9) el nombre composicional para las muestras M112_1, M43 y M40 corresponde a cuarzoarenita, las muestras M41 y M44 son subarcosas y la muestra M45 es arcosa; en general las muestras no contienen mucho feldespato sin alterar, la mayoría está alterado a sericita o caolinita y hace parte de la matriz.

Figura 9. Diagrama triangular composicional (Folk, 1974), modificado para mostrar la clasificación de las muestras analizadas.



Madurez textural.

En general la forma de los granos para las muestras analizadas son subangulares, es decir presentan bordes irregulares, mientras que el calibrado es moderado a bueno, por otro lado de acuerdo a las descripciones texturales se determinó el contenido de arcilla en cada muestra (tabla 7).

Tabla 7. Datos usados para la determinación de la madurez textural.

Muestra	Contenido de arcilla (%)	Redondez de los granos	Calibrado
M112_1	2	Subangular	Moderado
M40	3	Subangular	Bueno
M41	1	Subangular	Bueno
M43	2	Subangular	Moderado
M44	3	Subangular	Moderado
M45	5	Subangular	Moderado - bajo

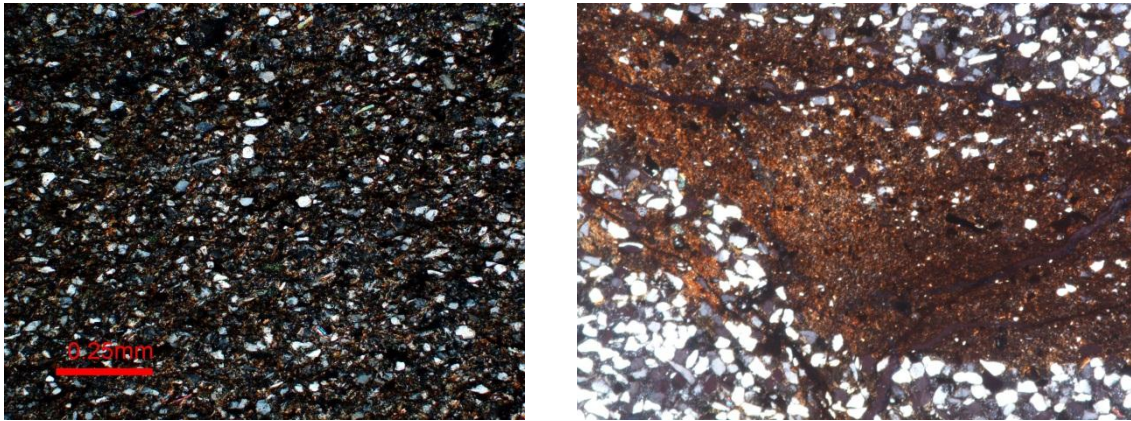
De acuerdo a los resultados de las características texturales y la gráfica para la madurez textural propuesta por Folk (1974), es posible determinar que la muestra M45 es considerada como una roca inmadura, ya que presenta un contenido de arcilla mayor al 5%. La muestra tiene un calibrado moderado a bajo, y los granos no están bien redondeados. Las muestras M112_1, M43 y M44, están dentro del rango de las rocas submaduras, debido a su bajo contenido de arcilla, a su calibrado moderado y su baja redondez; por otro lado las muestras M40 y M41 son consideradas como rocas maduras, puesto que tienen un bajo porcentaje de arcilla combinada con un buen calibrado, aunque la redondez sigue siendo baja.

6.2.2. Lodolitas. Las muestras M42, M55, M56, M57, M58, M63, M69 y M71, con un tamaño de grano inferior a 0,0624 mm, pertenecen al grupo de lodolitas. Como sus componentes son tan pequeños, a continuación se hace énfasis en la composición de la matriz o armazón en este caso, y cuando es posible se analiza la composición de los granos más grandes, además de las estructuras internas de la roca, como la laminación.

6.2.2.1. Limolitas arenosas. La observación del armazón bajo el microscopio de la muestra M42 en nicoles paralelos deja en evidencia una apariencia homogénea de un color marrón claro a oscuro, dado a que la mayoría de la muestra se compone de granos tamaño limo, es posible apreciar también en una menor proporción granos tamaño arena, en nicoles cruzados los colores de birrefringencia de la matriz son altos (figura 10a). Por otro lado la muestra M69 presenta un armazón de distinta composición, se observa por lo tanto una composición caolinítica, la cual presenta un color marrón oscuro muy homogéneo en nicoles paralelos y en nicoles cruzados se observa un color amarillo de birrefringencia media, se puede apreciar en diferentes partes de la muestra y en algunos sectores grada hacia una composición glauconítica, la cual se presenta un color verde oscuro a claro en nicoles paralelos y en nicoles cruzados tiene una apariencia moteada y con colores de alta birrefringencia; de acuerdo a las diferentes características mostradas fue posible identificarlas (figura 10b), es muy notorio también la presencia de partículas tamaño arena siendo mas abundante hacia las zonas glauconíticas.

Figura 10. (a) Vista general de la muestra M42, donde se aprecia la matriz y algunas partículas tamaño arena (nicoles cruzados). (b) Muestra M69, evidenciando las dos diferentes texturas y composiciones (Foto en nicoles cruzados tomada con el objetivo 5x).

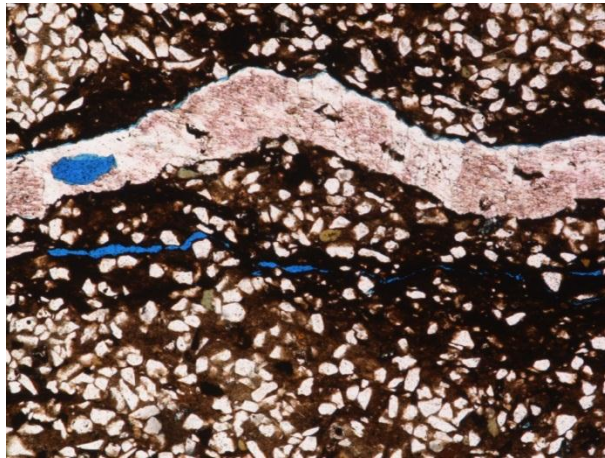
b)



Fuente. Autora

Porosidad: la porosidad secundaria prevalece en las muestras M42 y M69, como evidencia se tiene la disolución de partículas y pequeñas fracturas al parecer impregnadas de hidrocarburos, aunque en la muestra M69, se rellenaron de yeso (figura 11).

Figura 11. Fractura sinuosa rellena de yeso presente en la muestra M69 (Fotografía tomada en nicoles paralelos con el objetivo 5x)



Fuente. Autora

Composición: la composición mineralógica de los granos tamaño limo y arena que aun se pueden distinguir, se basa principalmente en cuarzo, en algunos cristales

de mica muscovita y la importante presencia de glauconita, siendo mas abundante en la muestra M69.

6.2.2.1. Lodolitas. Dentro de este tipo de rocas están las muestras M55, M56, M57, M58, M63 y M71, en general bajo la observación del armazón bajo el microscopio de luz transmitida, las muestras son homogéneas dado a la cantidad de partículas tamaño limo y arcilla en igual proporción; en nicoles paralelos las muestras son de color marrón claro a oscuro, y en nicoles cruzados el color marrón permanece pero sobresalen algunos minerales debido a sus altos colores de birrefringencia.

Porosidad. Debido a que las muestras son homogéneas como se menciono anteriormente, la porosidad es mínima y solo se ve representada por pequeñas y escasas fracturas.

Composición. El mineral más evidente es el cuarzo, aunque es posible identificar pequeños cristales de muscovita y sericita.

6.2.3. Calizas. Asociadas a este tipo de rocas están las muestras M46 y M74_1, ubicadas en la parte media y superior de la columna, respectivamente. En muestra de mano presentan una coloración grisácea y sus componentes no se distinguen fácilmente. Con el análisis petrográfico (tabla 8) se presencia una gran cantidad de bioclastos para ambas muestras, además el contenido de matriz es elevado por lo que las muestras presentan características micriticas.

Tabla 8. Porcentajes de los componentes de las muestras M46 y M74_1.

Muestra	Aloquímicos %				Matriz (micrita) %	Cemento (espar) %
	Intraclastos	Fósiles	Pelets	Oolitos		
M46		40			45	15
M74_1		40		5	50	5

Aloquímicos: La muestra M46 contiene muchas conchas de bivalvos, ostrácodos, gasterópodos y foraminíferos, junto con pequeñas espinas de equinodermos (Figura 12, a, b, c, d), se distinguen también minerales como el cuarzo, el circón y la glauconita, mientras que la muestra M74_1 se compone de foraminíferos, bivalvos y una pequeña cantidad de oolitos (Figura 13, a, b, c).

Figura 12. En la figura 12a, se evidencia hacia la parte inferior la presencia de un ostrácodo, junto con otros organismos que no son reconocibles claramente. La figura 12b, se puede apreciar en la parte superior derecha un foraminífero uniserial, acompañado por otros organismos al parecer gasterópodos (?). La figura 12c, es dominada por un bivalvo, el cual muestra una comisura bien definida y bastante plegada. La figura 12d, en la parte central superior se observa una estructura radial, perteneciente a una espina de equinodermo. Las graficas están en nicoles paralelos.

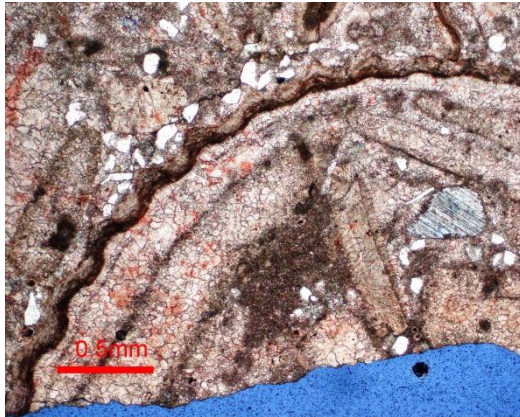
a)



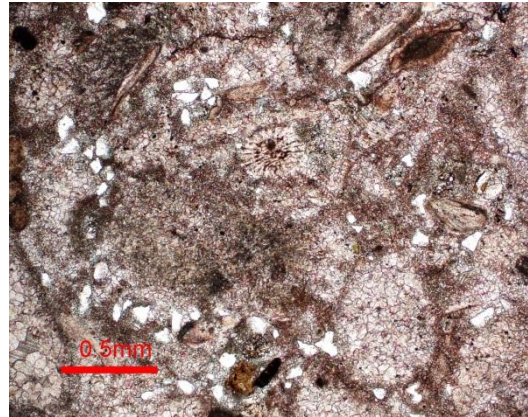
b)



c)



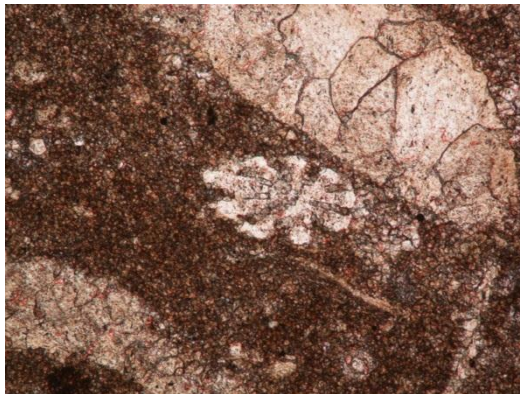
d)



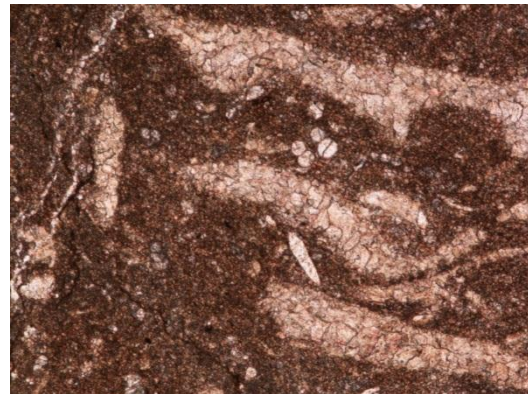
Fuente. Autora

Figura 13. La figura 13a, muestra la estructura radial de una espina de equinodermo (fotografía tomada con el objetivo 10x). La figura 13b, presenta pequeños fragmentos de lo que pudiera ser foraminíferos (?), junto con estructuras alargadas posiblemente de bivalvos (Fotografía tomada con el objetivo 5x). En la figura 13c, se puede apreciar las formas circulares, atribuidas a los oolitos (Fotografía tomada con el objetivo 5x).

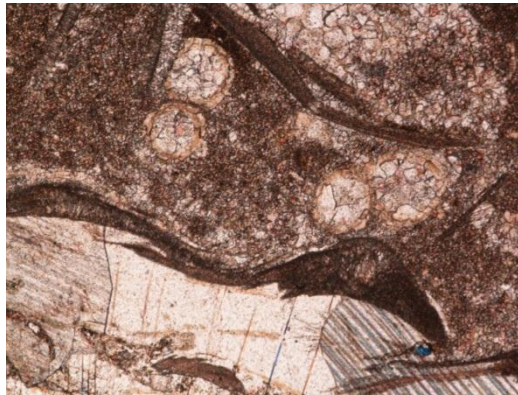
a)



b)



c)



Fuente. Autora

La clasificación de las muestras M46 y M74_1 según los criterios de Folk (1974), se encontró que las muestras están dentro del grupo de calizas tipo II, y por sus componentes (fósiles) tamaño arena son llamadas *biomicrarenitas*, y según el espectro textural se les denomina *Biomicrocritas rala* (tabla 9).

De acuerdo con Dunham (1962), las muestras son denominadas como wackstone, ya que son rocas lodosoportadas con un contenido mayor al 10% de partículas tamaño arena. Para complementar la descripción es importante combinar el nombre con las características composicionales, es decir mencionar los aloquímicos que tengan mayor presencia (tabla 9).

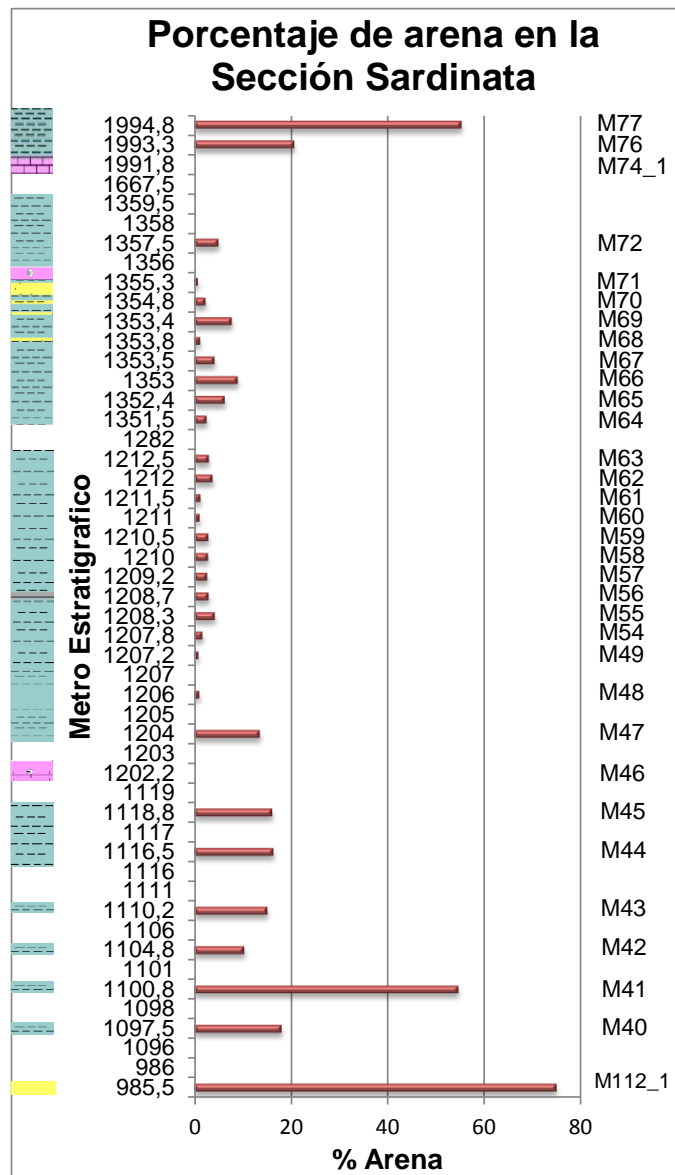
Tabla 9. Resumen de la clasificación de las rocas calcáreas (M46 y M74_1) según Folk (1974) y Dunham (1962).

Muestras	Folk (1974)		Dunham (1962)
	Clasificación	Espectro Textural	
M46	Biomicrarenita	Biomicrocrita rala	Wackstone calcáreo de bioclastos

M74_1	Biomicroarenita	Biomicrocrita rala	Wackstone calcáreo de bioclastos
-------	-----------------	--------------------	----------------------------------

6.2.4. Determinación granulométrica experimental. Con este análisis es posible conocer previamente cómo es la distribución litológica en la sección Sardinata. La Figura 13 se construyó con base en el porcentaje de partículas tamaño arena ($> 63\mu$) presente en cada muestra. De la misma, se puede inferir que a lo largo de la sección Sardinata existe una mayor influencia de rocas compuestas por granos de tamaño muy fino (limo y arcilla) en general. Sin embargo las muestras pertenecientes a la parte basal de la sección tienen una fuerte presencia de arenas, tal y como se apreció en las secciones delgadas (ver sección 6.2.1.). Las muestras M46 y M74_1 no forman parte de este análisis, debido a su carácter cristalino.

Figura 14. Distribución de los porcentajes de la fracción arena a lo largo de la Sección Sardinata, mostrando una alta coincidencia con la litología descrita en la columna estratigráfica.



Fuente. Autora

6.2.5. Microfacies. A partir de la descripción sedimentológica se reconocieron 7 microfacies, las cuales se caracterizan por las estructuras, minerales y contenido fósil presente en cada muestra (tabla 10).

Tabla 10. Microfacies de las 16 muestras analizadas.

Muestra	Litología	Microfacies
M112_1	Arenisca grano muy fino limosa	Agmfl
M40	Arenisca grano muy fino limosa	Agmfl
M41	Arenisca de grano muy fino	Agmf
M42	Lodolita arenosa	La
M43	Arenisca grano muy fino limosa	Agmfl
M44	Arenisca grano muy fino limosa	Agmfl
M45	Arenisca grano muy fino limosa	Agmfl
M46	Wackstone de bioclastos	Wb
M55	Lodolita de foraminíferos bentónicos	Lfb
M56	Lodolita de foraminíferos bentónicos	Lfb
M57	Lodolita de foraminíferos bentónicos	Lfb
M58	Lodolita de foraminíferos bentónicos	Lfb
M63	Lodolita con foraminíferos	Lf
M69	Lodolita arenosa	La
M71	lodolita	L
M74_1	Wackstone de bioclastos	Wb

6.3. MICROPALÉONTOLOGÍA

Luego del picking (selección), se encontró que 19 de 33 muestras contienen foraminíferos (tabla 11), en su mayoría bentónicos aglutinados que aparecen asociados a minerales como la pirita y glauconita, y a una litología de grano muy fino. Las muestras que no presentaron recobro en su mayoría son rocas con alto contenido de partículas tamaño arena, pertenecientes a la parte basal de la columna estratigráfica. También hubo recobro de foraminíferos bentónicos calcáreos, pero su presencia y abundancia es mínima, al igual que foraminíferos planctónicos, aunque su presencia solo se da en dos muestras, su abundancia es alta.

Tabla 11. Distribución de la cantidad foraminíferos encontrados por muestra.

Muestra	Foraminíferos Bentónicos Aglutinados	Foraminíferos Bentónicos Calcáreos
112-1		
40		
41		
42		
43		
44		
45		
46		
47		
48		
49	288,6	2
54	797,8	0
55	206,3	0
56	315,3	0
57	262,8	3
58	443,1	2
59	539,4	0
60	641,7	3
61	2356,1	0
62	454,3	0

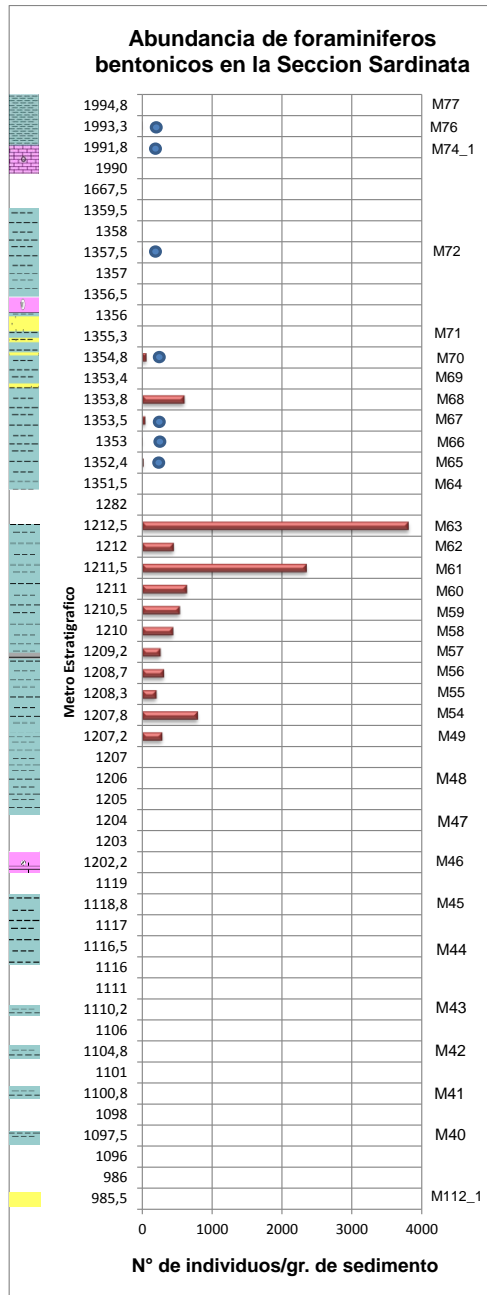
63	3800	0
64		
65	21,9	0
66	8,8	0
67	46,9	0
68	582,8	0
69		
70	62,4	0
71		
72	7	0
74_1	0	3
76	7,1	0
77		

6.3.1. Identificación taxonómica. Los foraminíferos bentónicos aglutinados pertenecen a la subclase Textulariia según Kaminski (2000), y se encontraron 2 órdenes, 4 subórdenes, 5 superfamilias, 5 familias, 3 subfamilias y 5 géneros (Anexo 3). Para los foraminíferos bentónicos calcáreos, se tuvo en cuenta la clasificación de Loeblich y Tappan, y se encontró 2 subórdenes, 2 superfamilias, 2 familias, 1 subfamilia y 2 géneros.

6.3.2. Abundancia. La abundancia de foraminíferos bentónicos esta dominada por los foraminíferos aglutinados, acompañada de unos pocos foraminíferos bentónicos calcáreos. Por otro lado los foraminíferos planctónicos encontrados en las muestras M63 y M68, no se tuvieron en cuenta para el calculo de abundancia puesto que el foco de este estudio esta dirigido a los foraminíferos bentónicos, por lo tanto es importante resaltar, que los valores de abundancia de foraminíferos en total de estas muestras puede ser mayor al que en este trabajo se reporta. En el resto de muestras no hubo recobro. La mayor abundancia de foraminíferos bentónicos aglutinados se ubica hacia la parte media de la columna, coincidiendo con un paquete grande de lodolitas de color gris a negro, los valores bajos se ubican también en litologías lodosas, pero con altos indicios de oxidación. En

general las abundancias oscilan entre los 8 a 3800 individuos por gramo de sedimento (Figura 15).

Figura 15. Abundancia de foraminiferos bentonicos. El circulo que acompaña a la muestras M65, M66, M72, M74_1 y M76, esta indicando una cantidad de individuos menor a 50.



6.3.3. Morfogrupos. Los foraminíferos aglutinados encontrados están asociados con tres de los morfogrupos propuestos por Jones y Charnock (1988) y Murray (2011), mostrando en la mayoría de las muestras (tabla 12) una preferencia por el morfogrupo C1 y el morfogrupo B3 y en una menor proporción el morfogrupo D. Para poder conocer el ambiente de depositación de las secuencias que contienen a los foraminíferos es importante conocer las proporciones entre ellos (figura 16), para el caso del morfogrupo B3 es mas abundante que el morfogrupo C1 en tres muestras, M60, M61 y M63, con proporciones altas, del 57%, 64% y 58% respectivamente. El morfogrupo C1 es el predominante en la mayoría de las muestras, aunque en la figura 16 no se evidencie mucho debido a que el numero de individuos es menor a mil individuos, sin embargo en la tabla 13, con ayuda de los valores de la media, desviación estándar y un calculo de la diferencia de las medianas (figura 17) es posible comprobar la predominancia del morfogrupo C1. Los conteos para el morfogrupo C1 por lo tanto son mayores en las muestras M49 hasta la M59, en la muestra M63 y desde la muestra M65 en adelante; para el morfogrupo B3 los conteos son predominantes en las muestras M60 y M63, y el morfogrupo D presenta conteos muy bajos en las muestras donde se presentan (tabla 12), es posible también notar la variación entre fauna epifaunal e infaunal (figura 16) la cual no cambia mucho con respecto a la proporción de morfogrupos, puesto que las muestras con mayor porcentaje del morfogrupo B3, presentan también una mayor representación de foraminíferos con hábitos epifaunales, y lo mismo ocurre con las demás muestras, las cuales tienen mayor presencia del morfogrupo C1 y por ende los foraminíferos de habito infaunal prevalecen.

Tabla 12. Conteos y tipos de morfogrupos encontrados en las muestras de la Sección Sardinata.

Muestra	P. inicial (gr)	P. final (gr)	Peso fraccion picada	N° total de individuos	Morfogrupo A	Morfogrupo B				Morfogrupo C		Morfogrupo D
						Morfogrupo B1	Morfogrupo B2	Morfogrupo B3	Morfogrupo B4	Morfogrupo C1	Morfogrupo C2	
112-1	107,13	87,56	1,896									
40	56,48	11,56	2,785									
41	55,9	32,11	1,178									
42	63,27	7,81	1,163									
43	59,96	9,97	1,594									
44	64,38	11,84	1,758									
45	65,56	11,72	1,959									
46	60,93	11,34	2,515									
47	59,88	8,42	2,285									
48	55,13	0,8	0,8									
49	61,96	0,79	0,79	228			52		175			1
54	59,5	1,84	0,45	359			170		189			0
55	58,27	3,28	0,8	165			70		83			12
56	60,88	2,46	0,72	227			80		147			0
57	58,4	2,42	0,666	175			35		126			14
58	63,19	2,62	0,519	232			80		121			29
59	60,81	2,38	0,33	178			40		128			10
60	65,99	1,05	0,427	277			155		113			6
61	56,41	0,84	0,132	310			198		113			0
62	60,35	2,62	0,559	254			108		140			6
63	60,21	2,16	0,1	380			220		150			10
64	56,32	1,69	1,245									
65	58,55	4,4	1,185	26			0		26			0
66	57,86	7,32	1,257	11			2		9			0
67	61,29	2,9	0,98	46			11		35			0
68	57,5	1,22	0,429	260			20		228			2
69	62,53	5,7	0,825									
70	63,14	2,1	0,673	42			11		31			0
71	58,72	0,53	0,503									
72	56,92	5,85	0,431	3			0		3			0
74_1	96,46	80,3	1,668									
76	102,37	21,31	0,982	7			0		7			0
77	94,34	52,81	2,414									

Figura 16. Proporción de los tres morfogrupos presentes en la sección Sardinata, además de la variación entre foraminíferos bentónicos infaunales y epifaunales.

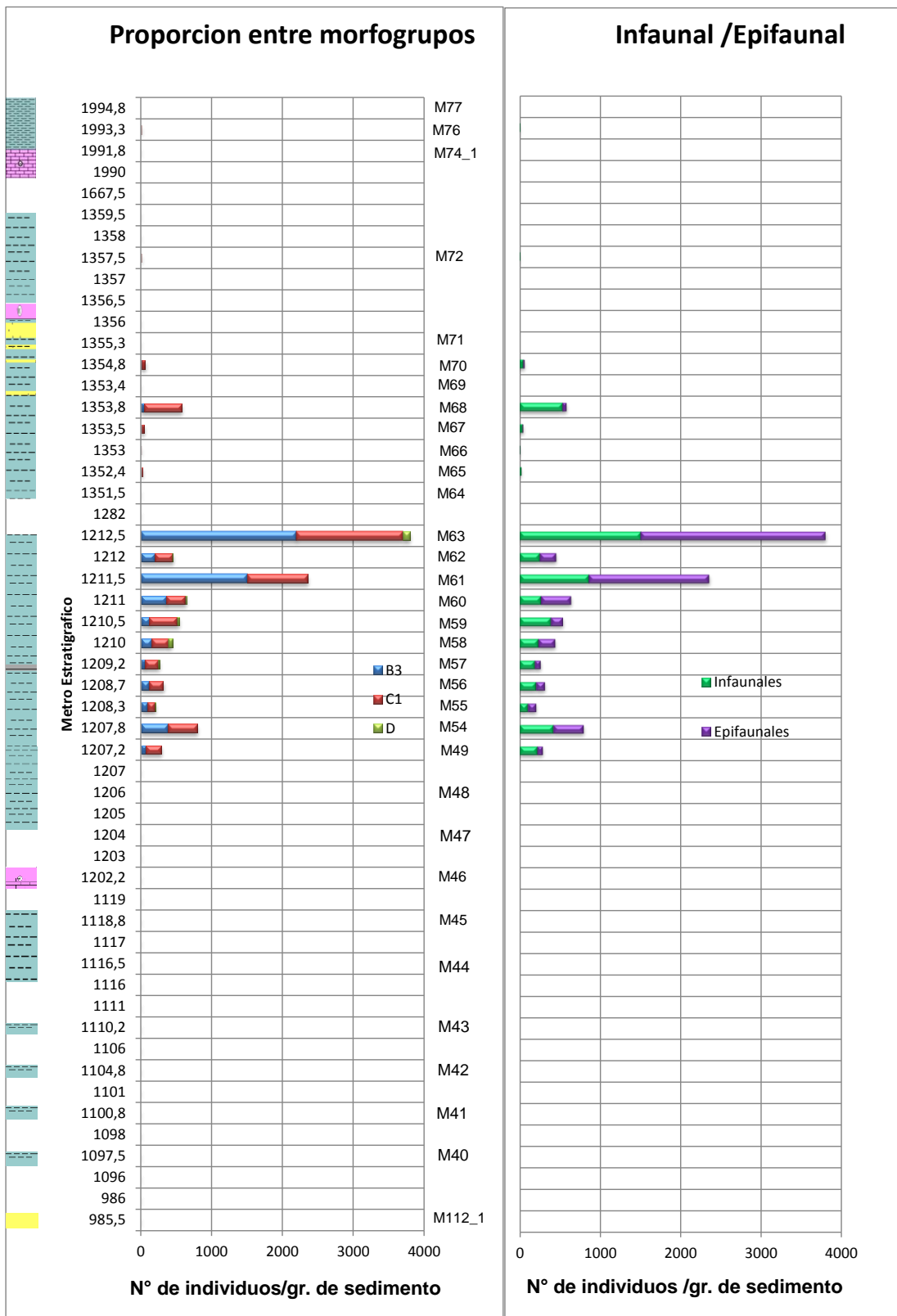
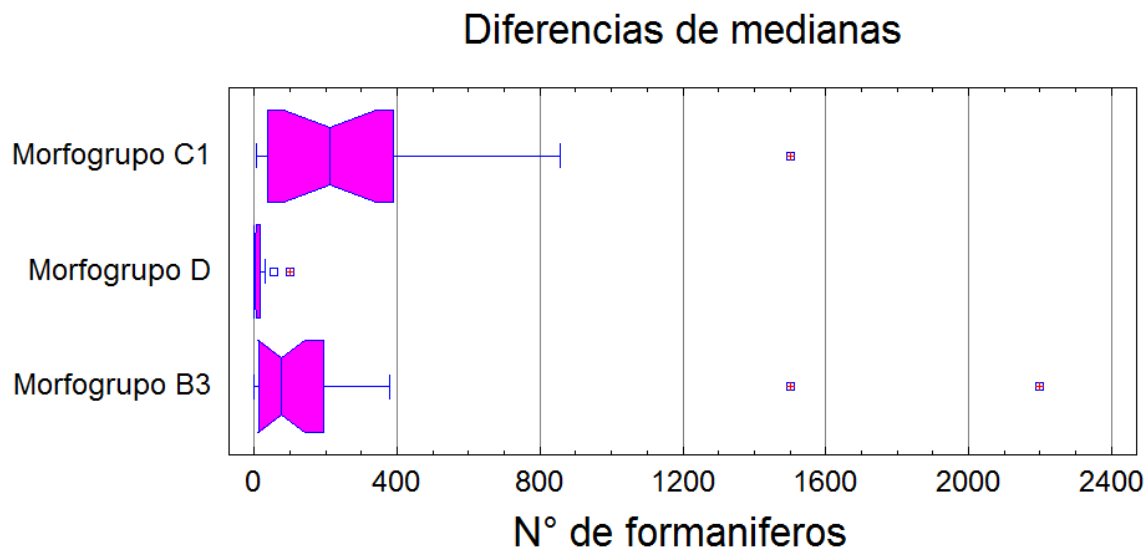


Tabla 13. Estadística descriptiva de los morfogrupos en la Sección Sardinata, determinados en N° de individuos por gramo de sedimento.

Análisis de datos	Morfogrupo B3	Morfogrupo C1	Morfogrupo D
Media	294,56	293,73	14,05
Error típico	138,95	87,96	6,13
Mediana	76,66	212,84	0,63
Moda	0,00	0,00	0,00
Desviación estándar	589,52	373,19	26,00
Varianza de la muestra	347537,43	139268,18	675,87
Curtosis	7,04	6,14	7,05
Coefficiente de asimetría	2,73	2,31	2,58
Rango	2200,00	1493,04	100,00
Mínimo	0,00	6,96	0,00
Máximo	2200,00	1500,00	100,00
Suma	5302,10	5287,22	252,91
Cuenta	18,00	18,00	18,00

Figura 17. Diferencias de medianas entre los distintos morfogrupos.



6.3.4. Diversidad y dominancia. Analizando todos los foraminíferos bentónicos incluyendo los pocos calcáreos encontrados, el índice de Fisher (α) arroja valores bajos (Figura 18), indicando una diversidad baja, posiblemente debido a la dominancia del género *Ammobaculites*. Debido a que el índice de Fisher es influenciado por el tamaño de la muestra (Magurran, 2004), la muestra M66 la cual tiene un conteo de 8 individuos pero con la presencia de 3 géneros presenta el índice de diversidad mas alto.

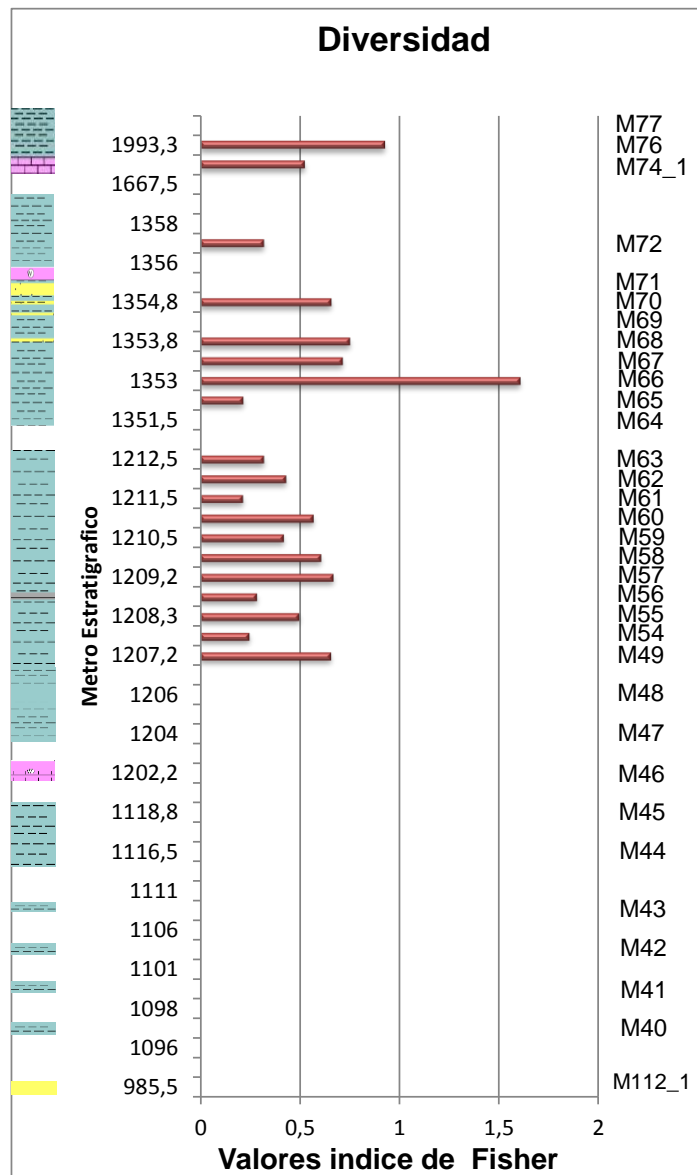
En la tabla 14, se encuentran consignados los conteos de los diferentes géneros, junto con el porcentaje del género más dominante, estos porcentajes superan todos, el 50% alcanzando valores de 77%, las muestras con un solo género presente, pues tienen valores de dominancia del 100%. Como se observa en la tabla 13 el género mas dominante es el *Ammobaculites* principalmente y luego el genero *reophax*, juntos conforman el morfogrupo C1, siendo por lo tanto el morfogrupo mas abundante, el índice de Simpson para la dominancia también se tomo en cuenta.

Tabla 14. Valores de dominancia para las muestras que presentaron recobro de foraminíferos bentónicos, dadas por el Índice de Simpson, y la diversidad es dad por el Índice de Fisher. Las casillas que están resaltadas indican el género más abundante en la muestra. Ammo= *Ammobaculites*, Haplop= *Haplophragmoides*, Troch=*Trochammina*, Reop=*Reophax*, Preab=*Preabulimina*, Lent=*Lenticulina*.

Muestra	Ammo.	Haplop.	Troch.	Reop.	Text.	Preab.	Lent.	Total individuos	% genero mas común	Índice de Fisher	Índice de Simpson
M49	221,5	65,8	1,3	0,0	0,0	2,0	0,0	290,6	76,2	0,6562	0,6323
M54	420,0	377,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	797,8	52,6	0,2476	0,5014
M55	103,8	87,5	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	206,3	50,3	0,4975	0,4383
M56	204,2	111,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	315,3	64,8	0,2854	0,5436
M57	189,2	52,6	21,0	0,0	0,0	3,0	0,0	265,8	71,2	0,6679	0,5522
M58	233,1	154,1	55,9	0,0	0,0	2,0	0,0	445,1	52,4	0,606	0,4099
M59	387,9	121,2	30,3	0,0	0,0	0,0	0,0	539,4	71,9	0,4189	0,5708
M60	264,6	363,0	14,1	0,0	0,0	3,0	0,0	644,7	56,3	0,5686	0,486
M61	856,1	1500,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2356,1	63,7	0,215	0,5373

M62	250,4	193,2	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	454,3	55,1	0,4309	0,4852
M63	1500,0	2200,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3800,0	57,9	0,3197	0,4917
M65	0,0	0,0	0,0	21,9	0,0	0,0	0,0	21,9	100,0	0,216	1
M66	1,0	1,6	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0	8,8	70,5	1,605	0,5424
M67	9,0	11,2	0,0	26,7	0,0	0,0	0,0	46,9	56,9	0,7144	0,418
M68	50,0	46,6	4,7	300,0	181,5	0,0	0,0	582,8	51,5	0,7513	0,3758
M70	6,0	16,3	0,0	40,1	0,0	0,0	0,0	62,4	64,3	0,6574	0,4905
M72	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0	7,0	100,0	0,3193	1
M74_1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3	3,0	100,0	0,5252	1
M76	4,1	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	7,1	57,7	0,9262	0,512

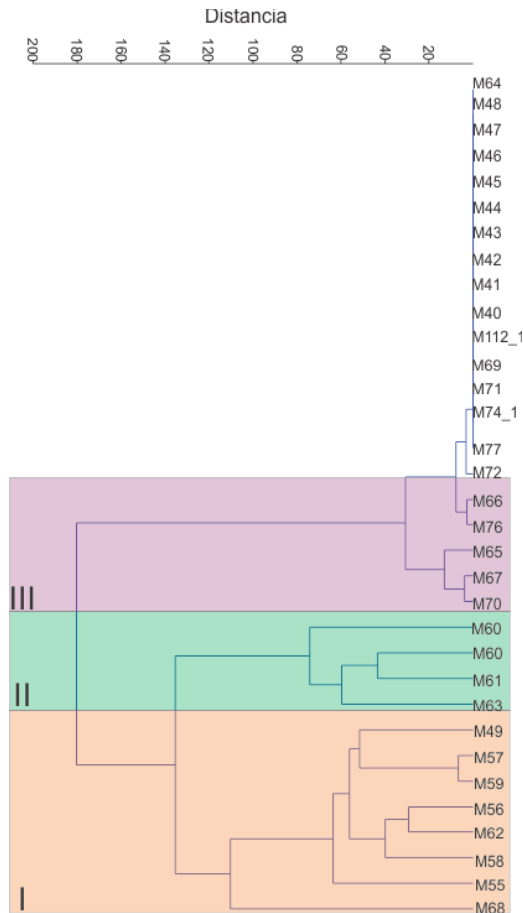
Figura 18. Los valores de diversidad para las muestras de la Sección Sardinata.



6.3.5. Clúster. Se tienen tres asociaciones principales I, II y III (Figura 19) donde se han agrupado las diferentes muestras que contienen en cantidades similares a los tres morfogrupos ya reconocidos. La asociación I contiene a los morfogrupos B3 y C1 en proporciones grandes, con la presencia del morfogrupo D1, pero en una proporción mucho menor. Las muestras asociadas en el grupo II, no contienen al morfogrupo D1, sin embargo tienen grandes proporciones de los demás morfogrupos. El grupo III, donde están consignadas las muestras donde el recobro

es muy bajo, pero que conservan como elemento en común la presencia del morfogrupo C1 en una proporción de casi el doble que el morfogrupo B3 y no contiene al morfogrupo D. Las demás muestras que no están asociadas con los grupos mencionados anteriormente, son las muestras que no presentaron recobro.

Figura 19. Dendograma de las asociaciones presentes en la Sección Sardinata.

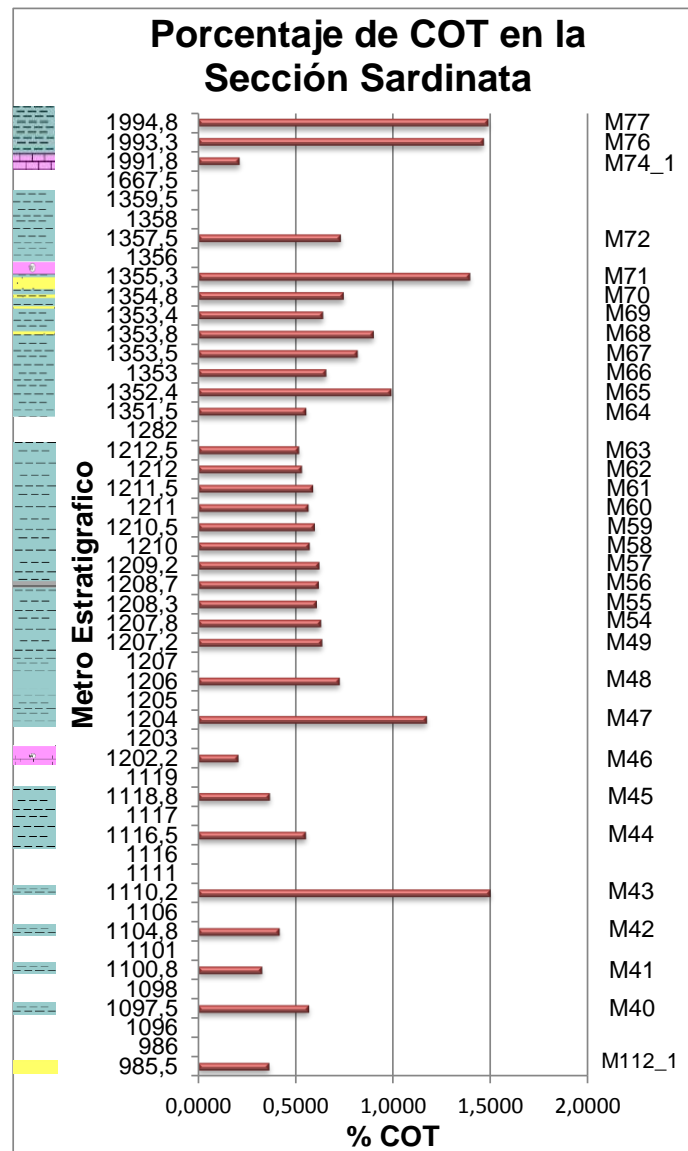


6.4. GEOQUÍMICA

Los resultados para el COT (Figura 20) dieron en promedio un porcentaje de 0,7044, y según la tabla 1, este valor correspondería a una baja preservación de la materia orgánica, sin embargo las muestras M43, M47, M71, M76 y M77 alcanzan porcentajes mayores al 1% caracterizándolas como rocas con buen potencial de

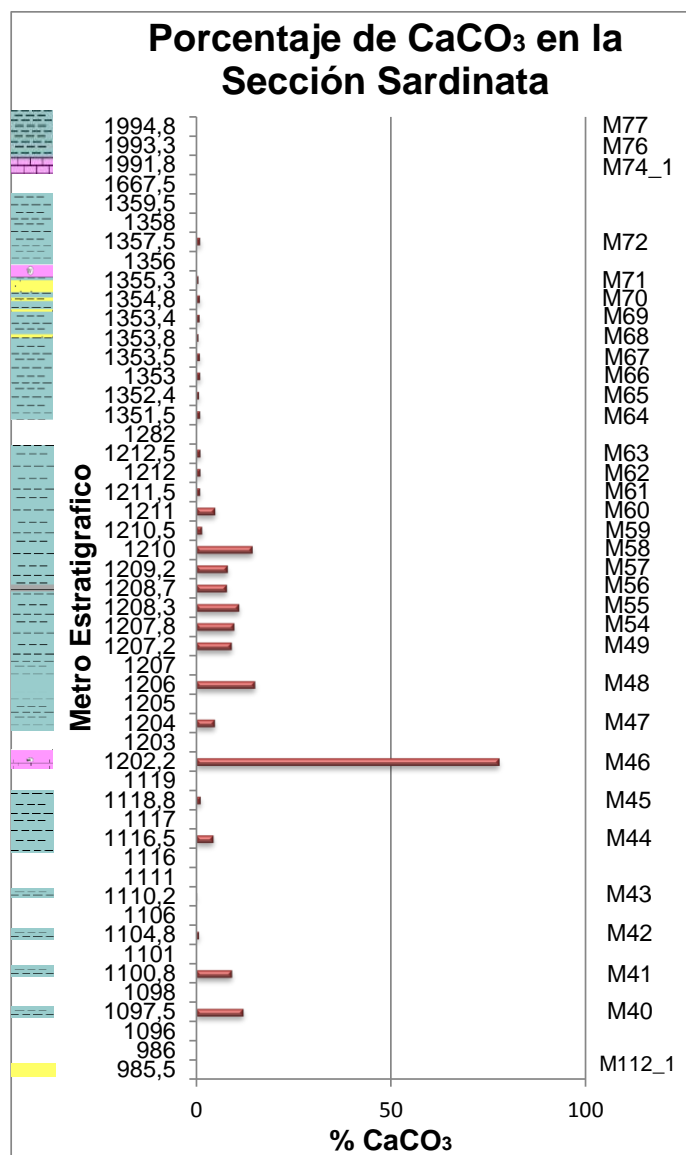
materia orgánica. Las rocas calcáreas M46 y M74_1 presentan los valores más bajos de COT, con un porcentaje de 0,2090 en promedio.

Figura 20. Distribución de los porcentajes de COT sobre la sección Sardinata.



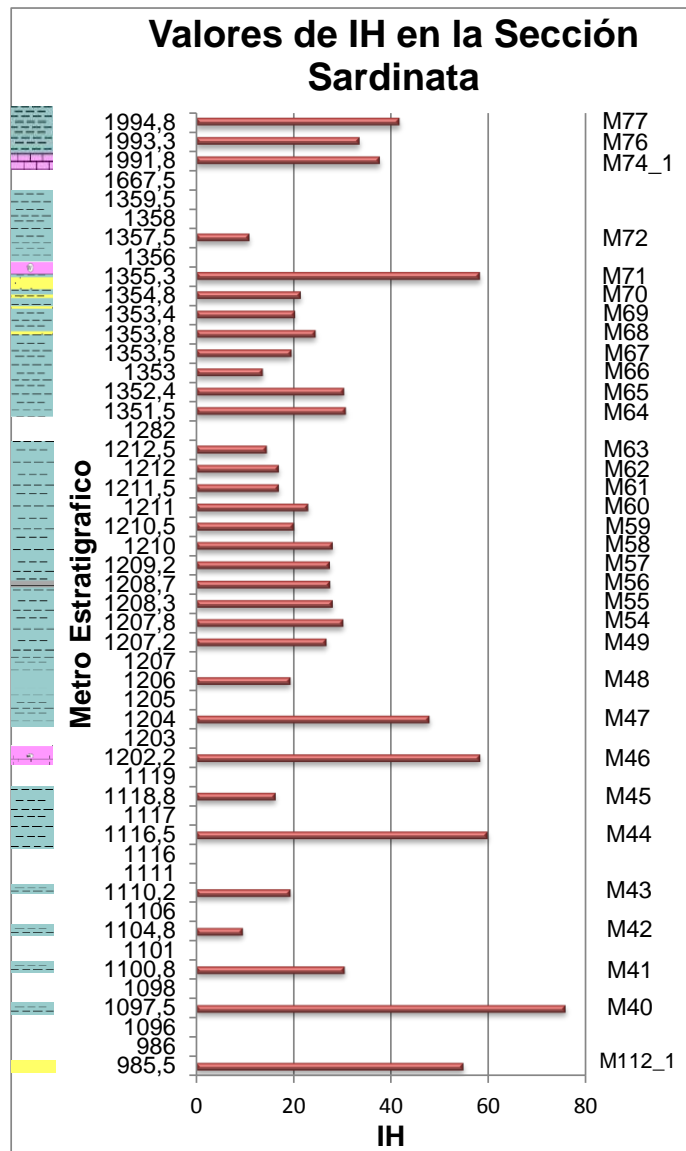
Los porcentajes de CaCO_3 (Carbonatos), en general presentan valores muy bajos menores al 15%, mientras que la muestra M46 dado a su carácter calcáreo tiene un porcentaje elevado del 77% (figura 21).

Figura 21. Porcentajes de CaCO₃ a lo largo de la Sección Sardinata.



Índice de Hidrogeno (IH). La mayoría de los valores obtenidos para el IH son bajos (< 50) (Figura 22), prevaleciendo entonces para la sección Sardinata el kerógeno tipo IV, indicando que las rocas se pudieron haber formado en cualquier ambiente de depositación (Tabla 1). Sin embargo las muestras M112_1, M40, M44, M46 y M71, tienen valores mayores a 50 se considera entonces que tienen un kerógeno tipo III, y que pertenecen a ambientes continentales.

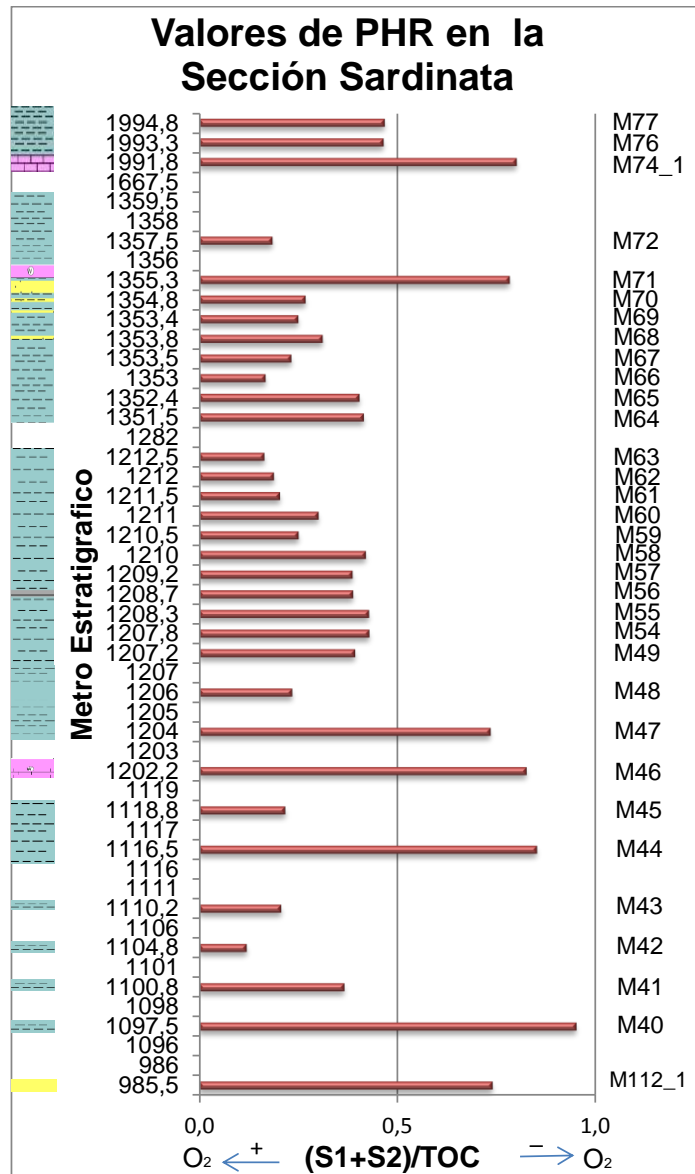
Figura 22. Valores del Índice de Hidrogeno para las muestras de la Sección Sardinata.



Potencial de Hidrocarburos Relativo. Los datos para el Potencial de Hidrocarburos Relativo (PHR) están representados en la figura 23, mostrando hacia la parte media, condiciones de buena oxigenación, las cuales permanecen constantes en esta parte; hacia la parte de la base y tope de la columna estratigráfica se pueden observar cambios bruscos en las condiciones ambientales

según el PHR, es posible que estos cambios sean graduales, ya que la sección Sardinata cuenta con varias zonas cubiertas, interrumpiendo la información,

Figura 23. Se muestran los diversos ciclos anóxicos/oxicos en la Sección Sardinata por medio del PHR.



7. INTERPRETACION DE RESULTADOS

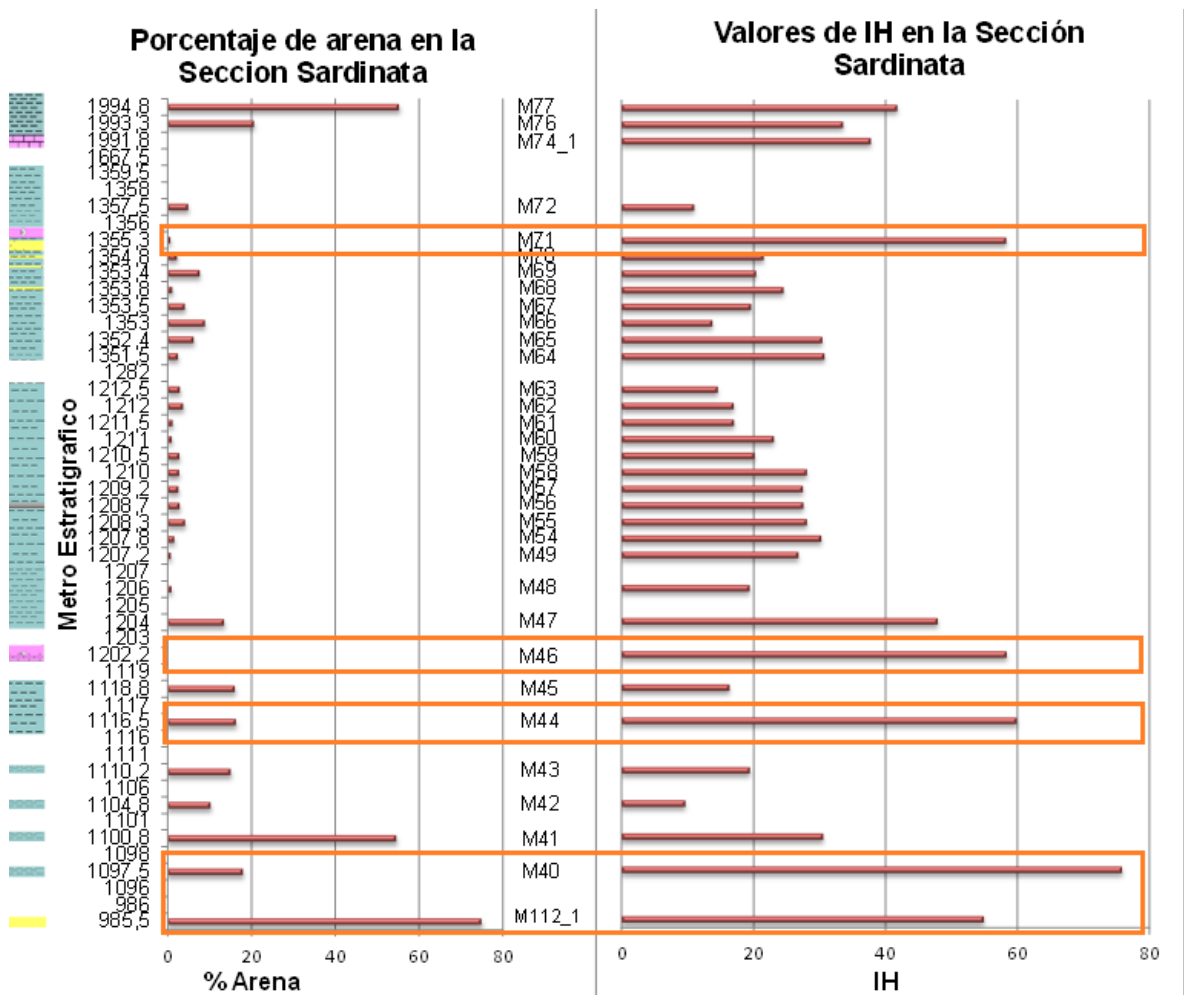
7.1. ANÁLISIS AMBIENTAL

Hacia la parte basal de la columna estratigráfica (Anexo 1), no fue posible identificar el contacto con la Formación Aguardiente, debido a que esta parte se encuentra cubierta en la sección. La muestra M112_1 fue la más basal, ubicada a una distancia estratigráfica de 37 metros del tope de la Formación Aguardiente. De acuerdo con las características sedimentológicas observadas sobre la madurez textural (sección 6.2.1., tabla 7) de las muestras más basales de la columna, se puede inferir que las muestras M112_1, M43 y M44, clasificadas como rocas submaduras y con predominancia de partículas tamaño arena, presentan afinidad con ambientes someros muy cercanos al continente (E.g. Folk, 1974). Soporte a esta interpretación se da en la figura 24, donde se reconocen cuatro zonas en las cuales el IH alcanza valores mayores a 50, indicando ambientes continentales o al menos una gran influencia continental (McCarthy, 2011; tabla 1). La muestra M45, clasificada como una roca inmadura, se sugiere que corresponde a ambientes de baja energía (marinos neríticos o estuarinos; E.g. Folk, 1974), la cual además presenta un valor de IH menor a 50, sugiriendo aporte de material retrabajado (McCarthy, 2011; tabla 1). Las muestras M40 y M41 se clasificaron como rocas maduras, y por tanto se sugieren de ambientes costeros con influencia marina, evidenciada en las grandes cantidades de glauconita. Para la muestra M40, quizá el porcentaje de arena sea muy poco para una roca madura, por lo que se toma más en cuenta la descripción petrográfica, lo importante es la coincidencia con el ambiente de depositación, la cual corresponde con ambientes continentales o con gran influencia continental, mientras que la muestra M41 posee un valor de IH menor a 50, valor que no corresponde con sus características litológicas que indican claramente ambientes continentales o al menos con influencia de él, posiblemente se deba a que sea un ambiente más transicional, y de muy alta energía haciendo que el material retrabajado se incremente. Los valores de IH

para las muestras M112_1, M43 y M44, encaja con el ambiente de depositación de las muestras M112_1 y M44, y mostrando un carácter mas continental que marino. La muestra M43 tiene un valor de IH inferior a 50 el cual no coincide con ningún ambiente, no obstante las descripción sedimentológica es muy clara al mostrar una cantidad de arena y limo en proporciones semejantes, indicando un ambiente somero pero no muy cercano al continente.

De la figura 24, las dos zonas (rectángulo naranja) pertenecientes a las muestras M46 y M71 de acuerdo con el IH estarían influenciadas por ambientes continentales. Sin embargo sus características litológicas indican ambientes diferentes, por lo tanto se puede inferir que el kerógeno encontrado en estas zonas se deposito allí debido al fuerte accionar de las corrientes que lo transportaba o a material re TRABAJADO. En general los valores de IH inferiores a 50 predominan en la sección Sardinata, estos valores corresponden a kerógeno tipo IV (tabla 1), el cual no es un buen indicador de ambientes, sin embargo la descripción petrográfica y los bajos valores del porcentaje de arena sugieren el predominio de ambientes marinos.

Figura 24. Correlación entre el porcentaje de arena y el Índice de Hidrogeno (IH), para determinar los posibles ambientes de sedimentación de la Formación Capacho en la sección Sardinata.



Hacia la parte central de la columna estratigráfica (Anexo 1), es evidente la fuerte presencia de lodolitas, y aunque dentro de la descripción no se realiza un análisis de madurez, por su tamaño de grano, el poco contenido de arena, su carácter ligeramente calcáreo (figura 21) y estructuras como la laminación, es evidente el predominio de ambientes marinos de baja energía en esta parte de la Formación Capacho.

Sin embargo con la ayuda de los morfogrupos encontrados es posible definir más claramente el ambiente de depositación, con la grafica comparativa de Jones y Charnock (figura 25), en las zonas donde la proporción del morfogrupo C1 es mayor al morfogrupo B3 y D (tabla 12; Anexo 1), se infiere un ambiente de plataforma marina interna. Se tiene en cuenta también el ambiente de plataforma marina externa para las muestras que aunque no tienen la misma proporción entre el morfogrupo C1 y B3 (tabla 12; Anexo 1), como se muestra en la figura 25 (recuadro rojo) si es reconocible la abundancia del morfogrupo B3, por lo tanto para estos sectores se tiene ambientes que no superan los 200 metros de profundidad.

Figura 25. Imagen donde se relaciona la proporción de morfogrupos con los diferentes ambientes marinos de sedimentación. Los recuadros rojo y verde, pertenecen a los ambientes encontrados hacia la parte media de la Formación Capacho.

INCREASED DEPTH, STABILITY OF ENVIRONMENT, FAUNAL DIVERSITY, FINE SEDIMENT
DECREASED ENERGY OF ENVIRONMENT, VARIABILITY OF ENVIRONMENT (TEMPERATURE,
SALINITY etc), FAUNAL DOMINANCE, COMPETITION, COMPETITIVE EXCLUSION, FOOD
AVAILABILITY, OXYGENATION, LIGHT PENETRATION, TURBIDITY, TURBULENCE.

←

ENVIRONMENT								MORPHOGROUP*
ABYSSAL >2250 m	LOWER BATHYAL 1650 - 2250 m	MIDDLE BATHYAL 1000 - 1650 m	UPPER BATHYAL 200 - 1000 m	OUTER SHELF	INNER SHELF	MARGINAL	MARSH	
(OMNI- VORES)	SUSPENSION FEEDERS (A)	(B) *	SEDIMENT DWELLING SCAVENGERS (C)	BACTERIAL/D ETRITAL	HERBIVORES (D)			
A	A	A	A B ₁ B ₂ B ₃	B ₃	B ₃	B ₃	B ₃	RELATIVE ABUNDANCE
11		11		3	C ₁	C ₂	C ₂	
B ₁		B ₁ B ₂						
8		3 4						
B ₂	1	B ₃	C ₁	C ₁		1	1	
13		5						
B ₃	9							
	B ₁ B ₂ B ₃							
9	9 7 7	C ₁						
C ₁	C ₁					D	D	
19		10	7	3	6			
D	2	D	D	1	2	1	1	
	D	2	D	1	2	1	1	

Fuente. Tomada y modificada de Jones y Charnock (1988).

Por otro lado dentro de la caracterización hecha por Richards (1967), se menciona la presencia de niveles de roca caliza con un espesor considerable. Sin embargo en la sección solo se encontraron dos pequeños niveles, con alto contenido de lodo calcáreo (micrita) y grupos fósiles, y de acuerdo con las descripciones hechas por Olaya y Linares (1998) son zonas transicionales de una ambiente marino somero a costa afuera. De acuerdo con los fósiles encontrados, bivalvos, ostrácodos y espinas de equinodermo es posible asociar a estas calizas con ambientes someros submareales. La cantidad de partículas tamaño lodo sugiere que el efecto de las olas sea bajo o que el ambiente de depositación se encuentre alejado del continente, y como se puede apreciar en la columna (Anexo 1) luego de los dos niveles de caliza siempre grada a una secuencia lodosa ligeramente calcárea con predominio de foraminíferos bentónicos aglutinados, sin presencia de

la fauna encontrada en las calizas, indicando el cambio de un ambiente somero a uno de mayor profundidad.

Las microfacies encontradas (tabla 11) respecto con las reportadas en el trabajo de Olaya y Linares (1998), muestran la transición que tiene la formación en su parte basal de un ambiente marino costero a uno de plataforma externa (<200 m) en la parte media y superior de la formación en la Sección Sardinata.

7.2. RECONSTRUCCIÓN PALEOECOLOGICA.

Para la Formación Capacho en la sección Sardinata, se tiene una gran abundancia de foraminíferos aglutinados, de hábitos infaunales en su mayoría, y con una baja diversidad tanto de morfogrupos como de géneros, asociados a un porcentaje de COT bajo a moderado hacia la parte media de la formación (Figura 26, recuadro 2). El recuadro 1 en la figura 26, corresponde a las muestras más cercanas al tope de la formación, representadas por porcentajes de COT moderados, con foraminíferos bentónicos de hábito infaunal en una proporción muy reducida, además la litología en este sector corresponde a lodolitas de color negro de ambientes de plataforma interna (figura 25). La parte mas basal encontrada en la sección Sardinata de la Formación Capacho, se caracteriza por porcentajes de COT en su mayoría bajos a regulares, con una excepción en la muestra M43, donde el valor es moderado (1,49 % COT), quizá por la alta presencia de hidrocarburo (figura 6b); un factor muy importante es el tipo de litología y el ambiente al que pertenece estas muestras, dado al predominio continental de las muestras la materia orgánica es muy baja, y la poca que puede existir, no se preserva fácilmente, ya que la materia orgánica necesita para preservarse de litologías de grano muy fino y de una tasa de sedimentación relativamente baja, esto se acompaña también del no recobro de foraminíferos en este sector, indicando también la baja cantidad de materia orgánica presente en este sector.

De acuerdo con los valores establecidos para el COT (tabla 13), la Formación Capacho contiene muy poca materia orgánica, salvo algunas muestras que indican valores moderados, sin embargo estaría indicando ambientes con buena oxigenación haciendo difícil la conservación de la materia orgánica, esto coincide con lo reportado por Olaya y Linares (1998) hacia la parte basal, donde encontraron rocas con alta bioturbación, sugiriendo por lo tanto una alta oxigenación permitiendo condiciones estables para la vida.

Tabla 13. Relación entre los porcentajes de COT con sus respectivas interpretaciones.

Contenido de Carbono Orgánico Total (% COT)	Calidad de la roca fuente
< 0,5%	Pobre
0,5% - 1,0%	Aceptable
1.0% - 2,0%	Buena
> 2,0%	Muy buena

Fuente. McCarthy et al, 2011.

Para la parte media de la formación la interpretación ambiental se basa en el modelo TROX, propuesto por Jorissen (1995), mostrando para ambientes con condiciones eutróficas un aumento en la cantidad de materia orgánica, con bajos niveles de oxígeno y un predominio de foraminíferos con hábitos infaunales; mientras que para condiciones oligotróficas la materia orgánica disminuye, el oxígeno aumenta y los foraminíferos con hábitos epifaunales aumenta también; por lo tanto la asociación encontrada para esta parte de la formación (figura 26; tabla 11) esta indicando ambientes con disoxia a anoxia, debido al predominio del morfogrupo C1, el cual presenta un habito infaunal; además en las zonas con bajo contenido de oxígeno se presenta una baja diversidad (e.g. Kaminski, 1995), tal y

como se evidencia en la sección 6.3.4., es importante anotar también la presencia de pirita framboidal en algunas de las muestras de esta zona, confirmando por lo tanto estas condiciones de baja oxigenación. Aunque los valores de COT son bajos, la cantidad de individuos encontrados en la parte media de la formación es relativamente alta (figura 27), incluso hay dos muestras que alcanzan un número de individuos superior a 3500, ante tal abundancia de organismos es posible deducir que la materia orgánica fue abundante, y debido a procesos diagenéticos los valores de COT disminuyeron, como se percibe en los valores de Tmax, obtenidos de la pirólisis Rock Eval (Anexo 4). En la parte superior de la sección Sardinata (figura 26, recuadro 1), las condiciones ambientales son parecidas.

Para el Cenomaniano-Turoniano se ha reportado un evento anóxico oceánico (EAO2), muy importante pues de él, se deriva la depositación de rocas generadoras de hidrocarburos tan importantes como la Formación La Luna (Jenkyns, 2010), este evento solo lo ha reconocido en Colombia por Villamil y Arango en el Valle Superior del Magdalena (1998). Aplicar las características de este evento a la sección Sardinata es muy difícil, debido a los pocos afloramientos existentes, sin embargo la presencia del foraminífero planctónico *Heterohelix* *Moremani* en la muestra M63, es un buen indicador de la existencia de este evento en la Formación Capacho, pues son denominados como foraminíferos oportunistas y son capaces de resistir condiciones adversas (Leckie, 1987), aunque sería muy complicado documentarlo, puesto que la sucesión estratigráfica después de la muestra M63 está muy cubierta.

Figura 26. Correlación entre los distintos parámetros para la reconstrucción paleoecológica.

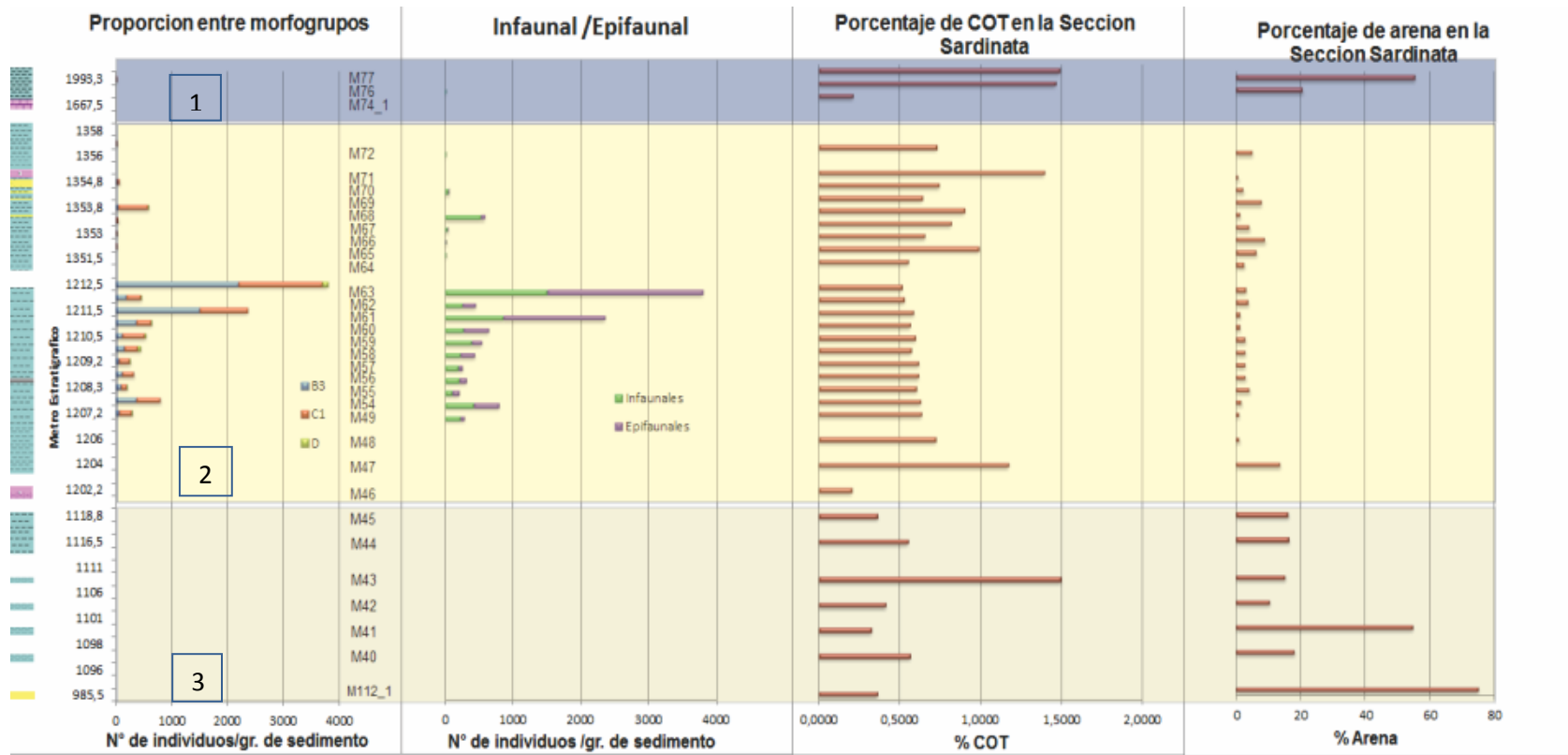
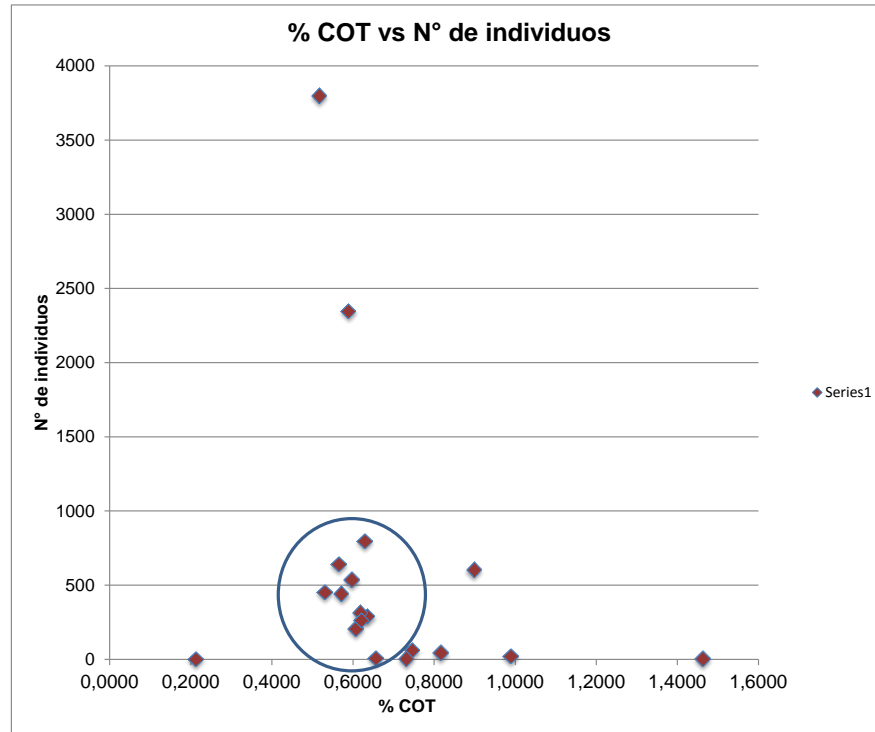


Figura 27. Relación entre la cantidad de individuos contra el porcentaje de COT en la Sección Sardinata. El círculo azul muestra el porcentaje de COT donde se encuentran concentradas las muestras con un número de individuos similares.



Otro parámetro utilizado para establecer las condiciones ambientales en la Formación Capacho es el PHR (Potencial de Hidrocarburos Relativo) (Abouelresh y Slatt, 2012), el cual permite establecer secuencias de facies orgánicas, bajo el concepto que un incremento en el PHR hacia la derecha (figura 23) podría resultar en un cambio vertical de facies orgánicas que pasa de una condición oxica a una condición anóxica, mientras que un incremento hacia la izquierda en el modelo de PHR (figura 23) estaría indicando un cambio de condiciones anóxicas a unas condiciones óxicas. La figura 23 muestra condiciones óxicas en la parte media de la formación, discrepando con la información micropaleontológica; y hacia la parte basal se aprecia condiciones anóxicas; dado a que los organismos responden de diversas maneras con las variaciones ambientales, es un parámetro mas confiable

al determinar las características de la formación, dejando sin validez para este caso los datos de PHR.

7.3 ESTRATIGRAFIA DE SECUENCIAS

Olaya y Linares (1998) proponen para la Formación Capacho en la Sección Sardinata un Transgressive Systems Tract (TST), en la parte basal de la formación (Anexo 1), acompañado de varios hem Ciclos, en general en el Transgressive Systems Tract se da un aumento en espacio de acomodación y se tienen secuencias progradacionales, para esta etapa no se encuentran asociados ningún tipo de asociación microfósil, debido a que no hubo recobro en las muestras analizadas a esta zona. El TST se extiende hasta la parte media de la columna estratigráfica (Anexo 1) donde el predominio de lodolitas es mayor, se halló entonces en esta zona la asociación de foraminíferos bentónicos aglutinados de hábito infaunal principalmente, donde el género predominante es el *Ammobaculites*.

Luego del Transgressive Systems Tract, comienza una etapa donde la transgresión alcanza su máximo nivel, permaneciendo estable por un tiempo, a esta secuencia se le denomina Highstand Systems Tract y es reportada por Olaya y Linares (1998) finalizando la depositación de la parte media de la formación hasta llegar a la zona más superior de la Formación Capacho en la sección Sardinata; reportándose para este momento una asociación de foraminíferos pertenecientes al morfogrupo C1, con predominio del género *Reophax*, también están asociados pequeños niveles de yeso, indicando pequeños ciclos evaporíticos.

7.4. POZO ORIPAYA-1

Con el ánimo de conocer la variación de asociaciones de foraminíferos a lo largo de la Cuenca del Catatumbo, se decide comparar los datos obtenidos con los del pozo Oripaya-1, ubicado al este de la cuenca, debido a su gran estabilidad permitiendo tener datos mas seguros lejos de la contaminación. De acuerdo con los conteos de foraminíferos aplicados a 18 muestras distribuidas a lo largo de la Formación Capacho la abundancia de foraminíferos planctónicos es evidente, reportando géneros como la Guembelitria, Hedbergella, Heterohelix en abundancias medias, estos géneros son muy característicos del Cenomaniano, por otra parte la cantidad de foraminíferos aglutinados es mínima comparados con los de la sección Sardinata, aunque la proporción de bentónicos calcáreos es mucho mayor a la encontrada en la sección Sardinata. El espesor reportado para el pozo Oripaya-1 es de 467,5 metros, mientras que el espesor reportado en la salida a campo para la Sección Sardinata es de 1010 metros, este espesor esta afectado posiblemente por pequeñas fallas satélites (Ingeominas, 1998), esta diferencia en espesores y de asociaciones de foraminíferos hace difícil poder correlacionar un nivel específico entre la sección y el pozo, aunque con la cantidad de foraminíferos planctónicos y la ausencia de litología arenosa en el pozo Oripaya-1 se puede inferir al menos una mayor profundidad en la cuenca hacia el este.

8. CONCLUSIONES

La Formación Capacho en la sección Sardinata comienza con un ambiente de depositación marino costero, con buena oxigenación, para dar paso a un ambiente de plataforma marina que no supera los 200 metros de profundidad, con indicios de condiciones disóxicas y anóxicas presentes hasta la parte superior de la formación.

Del análisis micropaleontológico se tiene la presencia de 5 géneros de foraminíferos bentónicos aglutinados, *Ammobaculites*, *Haplophragmoides*, *Trochammina*, *Reophax* y *Textularia*, agrupados en 3 diferentes morfogrupos B3, C1 y D (Jones y Charnock, 1988; Murray, 2011). También se encontraron 2 géneros de foraminíferos bentónicos calcáreos, *Preabulimina* y *Lenticulina*, en proporciones muy pequeñas; y un solo género de foraminíferos planctónicos, clasificado como *Heterohelix*.

Los análisis de abundancia y diversidad aplicados a las asociaciones de foraminíferos encontradas, muestran la gran abundancia de foraminíferos bentónicos aglutinados en la parte media de la formación, junto con una baja diversidad de acuerdo con los valores del Índice de Fisher, evidenciándose también la dominancia del género *Ammobaculites* en la mayoría de las muestras. Estos factores están condicionados por la falta de oxígeno en el ambiente donde habitaban.

La mayor asociación de foraminíferos encontrada en la Formación Capacho, coincide con secuencias progradacionales y con el crecimiento del espacio de acomodación propio de un Transgressive Systems Tract, que dominó hacia la parte media de la formación. Una segunda asociación de foraminíferos bentónicos aglutinados donde predomina el género *Reophax*, coincide con una etapa de máxima inundación, donde prevalecen condiciones estables.

La comparación hecha con los datos del Pozo Oripaya-1, dan cuenta de una profundización hacia la parte este de la cuenca, teniendo en cuenta la gran proporción de foraminíferos planctónicos.

9. RECOMENDACIONES

Realizar un nuevo muestreo en otras secciones reportadas por Olaya y Linares (1998) en el área del Catatumbo, para tener mayor cobertura de la formación y establecer su ambiente de depositación desde diferentes puntos geográficos para documentar variaciones y por ende mejorar las prospectividad en la cuenca.

Realizar un muestreo mas denso y sin descartar litologías arenosas, para obtener datos mas solidos y una visión mas clara en cuantos a los ciclos estratigráficos se refiere.

10. BIBLIOGRAFIA

ABOUELRESH, M. O., SLATT, R. M., 2012, Lithofacies and sequence stratigraphy of Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas, AAPG Bulletin, Vol. 96, No. 1, p. 1 – 22.

ACOSTA HERRERA, Nelly Cecilia, 2004, Compendio de Foraminíferos de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, p. 144.

ARENILLAS, Ignacio, ALEGRET, Laia, ARZ, José A. y MOLINA, Eustoquio, 2000, El Uso Didáctico de los Foraminíferos en la Enseñanza de Ciencias de la Tierra: Su Distribución Paleooceanográfica en el Transito Cretácico – Terciario, Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, p. 108-118, Zaragoza.

ARMSTRONG, Howard y Brasier, Martin, Microfossils, Blackwell Publishing, ed. 2, 2005, p. 296.

ARMYNOT DU CHÂTELET, Éric, BOUT-ROUMAZEILLES, Viviane, RIBOULLEAU, Armelle, TRENTESAUX, Alain, Sediment (Grain Size and Clay Mineralogy) and Organic Matter Quality Control on Living Benthic Foraminifera, Revue de Micropaléontologie, Vol. 52, 2009, p. 74 – 84.

BARRERO, Dario, PARDO, Andres, VARGAS, Carlos A., MARTINEZ, Juan F., 2007, Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal, ANH, Bogotá.

BENTON, Michael J. y Harper, David A. T., 2009, Introduction to Paleobiology and the Fossil Record, Wiley-Blackwell, p. 592.

BERNHARD, J. M., 1986, Characteristic Assemblages and Morphologies of Benthic Foraminifera From anoxic, Organic-rich Deposits: Jurassic Through Holocene, *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 16, No. 3, p. 207 - 215.

BOZAK, Tanja, LAHR, Daniel J. G., PRUSS, Sara B., MACDONALD, Francis A., GOODAY, Andrew J., DALTON, Lilly y Matis, Emily D., Possible Early Foraminiferans in Post-Sturtian (716 – 635 Ma) cap Carbonates, *Geological Society of America*, Vol. 40, No. 1, 2012, p. 67 – 70.

CAICEDO NIVIA, C., ESPITIA VANEGAS, D., 2006, Análisis Bioestratigráfico de Foraminíferos del Pozo Gonzalez-1 (6680' – 7800'), Cuenca del Catatumbo, Colombia, informe interno 029-06, ECOPETROL, Piedecuesta.

CAICEDO, Claudia, MANTILLA, Oswaldo, ESPITIA, Diana, Reporte Final de Bioestratigrafía (Micropaleontología) Pozo Zulia Profundo-1, informe interno 23-07, ECOPETROL, Piedecuesta, 2007.

CHRISTIANSEN, O., Notes of the Biology of Foraminifera, Zoological Laboratory, University of Oslo, Norway, 1971.

COOPER, M. A., ADDISON, F. T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R. H., HAYWARD, A. B., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A. J., TABORDA, A., Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, *AAPG Bulletin*, Vol. 79, No. 10, 1995, p. 1421–1443.

CORLISS, Bruce H., 1985, Microhabitats of benthic foraminifera within deep-sea sediments, *Nature*, vol. 314, p. 435 – 438.

CORLISS, Bruce H., CHEN, Christina, 1988, Morphotype patterns of Norwegian Sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implications, *Geology*, vol. 16, p. 716 – 719.

CORLISS, Bruce H., FOIS, Elisabetta, 1990, Morphotype Analysis of Deep-Sea Benthic Foraminifera from the Northwest Gulf of Mexico, *PALAIOS*, vol. 5, p. 589 – 605.

CRUZ GUEVARA, L. E., CABALLERO, V. M., 2007, Guía para la descripción de la textura de rocas terrígenas, Guía de laboratorio de sedimentología para Geólogos, Escuela de Geología, UIS.

CULVER, Stephen J., Early Cambrian Foraminifera from the Southwestern Taoudeni Basin, West Africa, *Journal of Foraminiferal Research*, Vol. 24, No. 3, 1994, p. 191 – 202.

DE PORTA, J., Tertiaire et Quaternaire, Amérique Latine, Union Internationale des Sciences Géologiques, Volume V, fascicule 4b, 1968.

DE RIJK, S., Jorissen, F. J., Rohling, E. J., Troelstra, S. R., 2000, Organic Flux Control on Bathymetric Zonation of Mediterranean Benthic Foraminifera, *Marine Micropaleontology*, vol. 40, p. 151 – 166.

DE, S., Gupta, A. K., Deep-sea Faunal Provinces and their Inferred Environments in the Indian Ocean Base on Distribution of Recent Benthic Foraminifera, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 291, p. 429 – 442.

DUARTE, J., CAICEDO, C., MANTILLA, O., RAMIREZ, Y., 2010, Reporte Final de Bioestratigrafía (Micropaleontología) Pozo Oripaya-1 ST-1, Cuenca del Catatumbo, informe interno 22-10, ECOPETROL, Piedecuesta.

FOLK, R. B., 1974, Petrology of Sedimentary Rocks, Hemphill Publishing Company, p. 184.

GOMEZ RIOS, Laura, MEJIA, Camilo, 2009, Sedimentología y Ambientes de Deposito del Pozo Petrolea-224, informe interno ECOPETROL, Piedecuesta.

HAQ, Bilal U. y Boersma, Anne, 1998, Introduction to Marine Micropaleontology, Elsevier Science, p. 376. Singapur.

HERNANDEZ, Roberto, Cinemática e Interacción de Sistemas Opuestos de Cabalgamientos en el Área del Catatumbo, Colombia, 7th Simposio Bolivariano – Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, 2000.

JENKYNS, H. C., 2010, Geochemistry of oceanic anoxic events, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 11, No. 3., p. 1 – 30.

JONES, R. W., Charnock, M. A., 1985, “Morphogroups” of Agglutinating Foraminifera: Their Life Positions and Feeding Habits and Potential Aplicability in (Paleo)ecological Studies, *Revue de Paléobiologie*, vol. 4, No. 2, p. 311 – 320.

JORISSEN, F. J., de Stigter, H. C., Widmark, J. G. V., 1995, A Conceptual Model Explaining Benthic Foraminiferal Microhabitats, *Marine Micropaleontology*, vol. 26, p. 3 – 15.

JULIVERT, M., Précambrien, Paléozoïque, Mésozoïque, et intrusions d'âge Mésozoïque – Tertiaire, Amérique Latine, *Union Internationale des Sciences Géologiques*, Volume V, fascicule 4a, 1968.

KAMINSKI, M. A., 2004, Agglut-2004 A current database of genera of agglutinated foraminifera, Grzybowski Foundation.

KITAZATO, H., Microhabitats of Benthic Foraminifera and their Application to Fossil Assemblages, Benthos' 83, 2nd Int. Symp. Benthic Foraminifera

KUHNT, W., COLLINS, E. S., 1996, Cretaceous to Paleogene Benthic Foraminifers from the Iberia Abyssal Plain, Whitmarsh, R.B., Sawyer, D.S., Klaus, A., and Masson, D.G. (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 149.

LECKIE, R. M., 1987, Paleoecology of mid-Cretaceous planktonic foraminifera: A comparison of open ocean and Epicontinental Sea assemblages, Micropaleontology, Vol. 33, No. 2, p. 164 – 176.

LOEBLICH, Alfred R., Jr., Tappan, Helen, 1964, Sarcodina Chiefly "Thecamoebians" and Foraminiferida, Treatise on Invertebrate Paleontology, Parte C, Protista 2, The Geological of America and The University of Kansas Press, p 900, New York.

LOEBLICH, Alfred R., Jr., Tappan, Helen, 1988, Foraminiferal Genera and their Classification, Van Nostrand Reinhold, vol. 1, p. 970, New York.

McCARTHY, K., ROJAS, K., NIEMMAN, M., PALMOWSKI, D., PETERS, K., STANKIEWICZ, A., 2011, Basic Petroleum Geochemistry for Source Rock Evaluation, Oilfield Review Summer 2011:23, No. 2.

MACELLARI, C. E., Cretaceous Paleogeography and Depositional Cycles of Western South America, Journal of South American Earth Sciences, Vol. 1, No. 4, 1988, p. 373 – 418.

MAGURRAN, A. E., 2004, *Measuring Biological Diversity*, Blackwell Publishing, Reino Unido.

MARTINEZ, J. I., 1995, Microfósiles del Grupo Guadalupe y la Formación Guaduas (Campaniano-Maastrichtiano) en la sección de Tausa, Cundinamarca, Colombia, CT&F, Instituto Colombiano del Petróleo, vol. 1, No. 1, p. 65 – 79.

MONDRAGON, Juan Carlos, Proyecto de Evaluación Regional de la Cuenca del Catatumbo, informe interno de ECOPEPETROL, Bogotá, 2002.

MURRAY, John W., 2006, *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*, Cambridge University Press, p. 426.

MURRAY, John W., ALVE, Elisabeth, JONES, Bob W., 2011, A New Look at Modern Agglutinated Benthic Foraminiferal Morphogroups: Their Value in Palaeological Interpretation, *PALAEO*, vol. 309, p. 229 – 241.

NOTESTEIN, F. B., Hubman, C. W., Bowler, J. M., 1944, *Geology of the Barco Concession, Republic of Colombian, South America*, Bull. Geol. Soc. Amer., vol. 55, p. 1165-1216, New York.

OLAYA LOPEZ, Iván. D., Linares, Roberto, 1998, Patronamiento Bioestratigráfico de un Área al Sur de la Cuenca del Catatumbo, Instituto Colombiano del Petróleo, Informe interno.

PATARROYO-CAMARGO, G. D., Patarroyo, P., Sánchez-Quiñonez, C. A., 2009, Foraminíferos bentónicos en el Barremiano inferior de la Formación Paja (Boyacá-Santander, Colombia): Evidencias preliminares de un posible bioevento,

GEOLOGIA COLOMBIANA, Universidad Nacional de Colombia, vol. 34, p. 111 – 122, Bogotá.

PINDELL, James L., HIGGS, Roger, DEWEY, John F., Cenozoic Palinspastic Reconstruction, Paleogeographic Evolution and Hydrocarbon Setting of the Northern Margin of South America, Paleogeographic Evolution and Non-glacial Eustasy, Northern South America, SEPM Publication especial, No. 58, 1998.

RICHARDS, H. Glenn, Cretaceous Section in Barco Area of Northeastern Colombia, Bull. AAPG., vol. 52, No. 12, 1968, p. 2324 – 2336.

ROD, Emile y MAYNC, Wolf, Revision of Lower Cretaceous Stratigraphy of Venezuela, AAPG, Vol. 38, No. 2, 1954, p. 193 – 237.

SUESCUN, D., 1998, Memoria del Cuadrángulo G-13 Cúcuta, INGEOMINAS.

SUTTON, F. A., Geology of Maracaibo Basin, Venezuela, AAPG, Vol. 30, No. 10, 1946, p. 1621 – 1946.

TCHEGLIAKOVA, N., Sarmiento, G., Guerrero, J., 1997, Bioestratigrafía y Paleoecología de los Foraminíferos Bentónicos de la Formación Chipaque y el Grupo Guadalupe. Turoniano-Maastrichtiano del Piedemonte Llanero de los Andes Colombianos, GEOLOGIA COLOMBIANA, Universidad Nacional de Colombia, vol. 22, p. 103 – 109, Bogotá.

TUCKER, M. E., WRIGHT, V. P., 1990, Carbonate Sedimentology, Blackwell Science, p. 482.

VAN DER ZWAAN, G. J., Jorissen, F. J., de Stigter, H. C., 1990, The Depth Dependency of Planktonic/Benthic Foraminiferal Ratios: Constraints and Applications, *Marine Geology*, vol. 95, p. 1 – 16, Amsterdam.

VAN DER ZWAAN, Duijnste, den Dulk, M., Ernst, S. R., Jannink, N. T., Koumenhoven, T. J., Benthic Foraminifers: proxy or problems? A Review of Palaeological Concepts, Elsevier Science, *Earth-Science Reviews*, vol. 46, 1999, p. 213-236.

VILLAMIL, T., ARANGO, C., 1998, Integrated Stratigraphy of Latest Cenomanian and Early Turonian Facies of Colombia, *Paleogeographic Evolution and Non-glacial Eustasy, Northern South America*, SEPM Publication especial, N° 58, 1998.

VILLAMIL, Tomas, PINDELL, James L., Mesozoic Paleogeographic Evolution of Northern South America: Foundations for Sequence Stratigraphic Studies in Passive Margin Strata Deposited During Non-glacial Times, *Paleogeographic Evolution and Non-glacial Eustasy, Northern South America*, SEPM Publication especial, N° 58, 1998.

VILLAMIL, Tomas, ARANGO, Claudia, HAY, William W., Plate Tectonic Paleooceanographic Hypothesis for Cretaceous Source Rocks and Cherts of Northern South America, *Evolution of the Cretaceous Ocean-Climate System: Boulder*, Barrera, E. y Johnson, C. C. eds., Geological Society of America Special Paper 332, 1999.

YUREWICZ, D. A., Advocate, D. M., Lo, H. B., Hernandez, E. A., 1998, Source Rocks and Oil Families, Southwest Maracaibo Basin (Catatumbo Subbasin), Colombia, *Bull. AAPG*, vol. 82, No. 7, p. 1329 – 1352.

ZAPATA, J. F., et al, 2009, Evaluación Integrada y Caracterización petrofísica del Intervalo Corazonado en el Pozo Petrolea-224, Formaciones La Luna – Ostrea – Cogollo - Aguardiente, informe interno Ecopetrol, Piedecuesta.