

Eventos Diagenéticos del Miembro Galembo de la Formación La Luna en un Pozo de la
Cuenca Valle Medio del Magdalena y su Relación con los Yacimientos No Convencionales

Lina Marcela Pedraza Cristancho

Trabajo de Grado para Optar el título de Geóloga

Director

Mario García González

Geólogo, PhD

Codirector

Juan José Gómez Caro

Geólogo, MSc

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A mi familia quien guía mis pasos incondicionalmente.

Agradecimientos

A todos, quienes aportaron en la elaboración de este proyecto de grado.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Localización	18
3. Marco Geológico	19
3.1 Evolución geológica.....	19
4. Marco Teórico.....	23
4.1 Diagénesis	23
4.2 Procesos diagenéticos	23
4.2.1 Compactación.	23
4.2.2 Cementación.	24
4.2.3 Disolución.....	24
4.2.4 Reemplazamiento.....	24
4.2.5 Recristalización.....	25
4.3 Ambientes diagenéticos	25
4.3.1 Diagénesis en medios marinos.....	26
4.3.2 Diagénesis en medios meteóricos.....	27

4.3.3 Diagénesis de enterramiento.....	28
5. Metodología.....	29
5.1 Etapa I: Revisión bibliográfica.....	29
5.2 Etapa II: Análisis de laboratorio.....	30
5.2.1 Petrografía.....	30
5.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	30
5.2.3 Difracción de rayos X (DRX).....	31
5.3 Etapa III: Interpretación de resultados.....	31
5.4 Etapa IV: Redacción del informe final.....	32
6. Resultados.....	32
6.1 Petrografía.....	32
6.1.1 Petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos.....	32
6.1.2 Petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica.....	34
6.1.3 Petrofacies de rocas ortoquímicas.....	36
6.1.4 Petrofacies Wackestone.....	37
6.1.5 Petrofacies Packstone / Grainstone con bioclastos.....	39
6.1.6 Petrofacies de Toba.....	41
6.2 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).....	41
6.2.1 SEM de la petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos.....	42

6.2.2 SEM de la petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica.	43
6.2.3 SEM de la petrofacies Wackestone.....	44
6.2.4. SEM de la petrofacies Packstone – Grainstone.....	45
6.3 Difracción de Rayos X (DRX).....	47
6.4 Diagénesis.....	50
6.4.1 Cementación.	50
6.4.2 Compactación.	53
6.4.3 Neomorfismo.	53
6.4.4. Disolución.....	54
7. Discusión.....	55
8. Conclusiones.....	58
9. Recomendaciones.....	60
Referencias Bibliográficas.....	61

Lista de Tablas

Tabla 1. Concentración relativa a nivel bulk, roca total	47
Tabla 2. Concentración relativa a nivel de la fracción menor de 2 micras a partir de DRX	48
Tabla 3. Sucesión de eventos diagenéticos del Miembro Galembo de la Formación La Luna en el pozo 1 en la cuenca VMM	55

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del pozo 1 en la cuenca VMM cerca de la confluencia de los ríos Magdalena y Sogamoso. Tomado de MGC, SGC, 2015 y Google Earth.....	18
Figura 2. Esquema de la evolución tectónica del Valle Medio del Magdalena. Tomado de Horton et al., 2010 en Sarmiento, 2011.....	22
Figura 3. Principales zonas o ambientes diagenéticos en función del origen del agua intersticial y de la profundidad. Tomado de Rossi, 2010.	26
Figura 4. Petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos. A) Aspecto textural de la roca. B) Bioperturbación (Bpt) caracterizada por madriguera compuesta en sus bordes por cuarzo y en el interior materia orgánica y calcita, porosidad secundaria (Φ_2). C) Concentraciones de materia orgánica (MO). D) Foraminíferos (For) cementados (Cem) con calcita (Ca) y parcialmente pirita (Py).....	34
Figura 5. Petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica. A) Aspecto textural de la roca. B) Foraminíferos (For) cementados (Cem) con sílice (Si) y pirita (Py). C) Precipitación de yeso (Ys) y láminas de materia orgánica (MO). D) Foraminíferos y fragmentos de bivalvos (Biv) cementados con calcita (Ca).....	35
Figura 6. Petrofacies de rocas ortoquímicas. A) Aspecto textural de la roca (parte superior tamaños más grandes de los granos de cuarzo, fosfatos (Fos) y chert). B) Textura poiquilítica. fragmentos de chert (Ch) y cuarzo (Qz) embebidos en el mineral de calcita (Ca). C) Aspecto textural de la roca. D) Cristales de cuarzo alterados parcialmente por calcita y caolinita (Cao). 37	37
Figura 7. Petrofacies Wackestone. A) Aspecto textural de la roca. B) Radiolarios (Rad) y foraminíferos (For) cementados con calcita esparítica. C) Bioperturbación (Bpt) caracterizada	

por madrigueras rellena de calcita (Ca) y materia orgánica (MO). D) Foraminíferos y bivalvos (Biv) cementados (Cem) con calcita..... 39

Figura 8. Petrofacies Packstone / Grainstone con bioclastos. A) Aspecto textural de la roca. B) Foraminíferos cementados con calcita (Ca), caolinita (Cao) y los bordes con clorita (Chl). C) Foraminíferos y bivalvos (Biv) rellenos de calcita. D) Cuarzo (Qz) con embahiamiento. 40

Figura 9. Petrofacies de Tobas. A) Aspecto general de la roca. B) Cristal de cuarzo y arcilla illita (Ill) y esmectita (Sme)- montmorillonita (Mnt) y pirita (Py). 41

Figura 10. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10716 ft. A) fragmento alargado de pirita y pirita (Py) framboidal. B) Barita (Brt), pirita y concentraciones de materia orgánica (MO). C) Calcita (Ca) esparítica, pirita framboidal y apatitos (Ap)..... 42

Figura 11. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10729 ft. A) Foraminíferos (For) relleno de calcita, calcita (Ca) esparítica y fragmentos de apatito (Ap). B) Foraminíferos cementados con calcita, calcita esparítica y pirita (Py) framboidal. C) Minerales arcillosos (Min Arc) posiblemente esmectita-illita con fábrica floculada con contactos borde cara. 43

Figura 12. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10859 ft. A) Foraminíferos (For) rellenos de calcita (Ca) esparítica. B) Foraminíferos rellenos de calcita y pirita (Py). C) Materia orgánica (MO) diseminada. 44

Figura 13. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10887 ft. A) Foraminíferos (For) rellenos de calcita (Ca) esparítica y apatito (Ap). B) Esfalerita (Sp). C) Pirita (Py) framboidal y esfalerita..... 45

- Figura 14. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10862 ft. A) Foraminíferos (For) rellenos de calcita (Ca) esparítica y pirita (Py). B) Barita y fragmentos de foraminíferos cementados con calcita. C) Caolinita (Cao) característica por su forma de libro pseudo-hexagonal. 46
- Figura 15. Difractogramas de la fracción arcilla de la muestra de roca en la profundidad 10729'. Picos representativos de caolinita (K), cuarzo (Q), illita (I) y calcita (C). 48
- Figura 16. Columna estratigráfica para el Miembro Galembo de la Formación La Luna y las curvas revelan el comportamiento que presenta de base a techo con respecto al contenido de aloquímicos, ortoquímicos, matriz, materia orgánica y porosidad para cada muestra de roca. 49
- Figura 17. Procesos de cementación. A) Cemento de calcita esparítica (CemCa) en forma de mosaico. B) Foraminíferos (For) y fragmentos de bivalvos (Biv) cementados con calcita esparítica. C) Radiolarios (Rad) cementado con calcita esparítica. D) Microfracturas (MFra) rellenas de calcita esparítica ferrosa y no ferrosa. 51
- Figura 18. A) Foraminíferos cementados con pirita (Py). B) Foraminíferos cementados con sílice (Si). C) Foraminíferos cementados con caolinita (Cao) y los bordes clorita (Chl). D) Bioclastos cementado con calcita esparítica y parcialmente con siderita (Sd). 52
- Figura 19. A) cementación de yeso (Ys) con forma rómbica. B) Bioperturbación (Bpt) caracterizada por madriguera rellena por cuarzo (Qz). 52
- Figura 20. Superficies estilolíticas producidas por presión de solución. 53
- Figura 21. Recristalización de la Micrita. A) Microesparita (Mce). B) Pseudoesparita (Sp). 54
- Figura 22. Procesos de disolución. A) Madriguera presenta en su interior disolución en los cristales de calcita esparítica. B) Disolución de cemento de calcita esparítica generando porosidad secundaria (Φ_2). 54

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlo en la base de datos de la biblioteca UIS).

Apéndice A: Tabla de descripción composicional y textural.

Apéndice B: Catálogo de fotomicrografías del análisis petrográfico del pozo 1.

Apéndice C: Resultados de microscopía electrónica de barrido (SEM).

Apéndice D: Resultados de difracción de rayos X (DRX).

Apéndice E: Columna estratigráfica del Miembro Galembó de la Formación La Luna en el Pozo 1.

Resumen

TÍTULO: Eventos diagenéticos del Miembro Galembo de la Formación La Luna en un pozo de la cuenca Valle Medio del Magdalena y su relación con los yacimientos no convencionales*

AUTOR: Lina Marcela Pedraza Cristancho**

PALABRAS CLAVES: Formación La Luna, Miembro Galembo, diagénesis, cuenca Valle Medio del Magdalena, petrografía, difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM).

La Formación La Luna es considerada la roca generadora más importante en la cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM), sin embargo, es poca la información disponible enfocada a la definición de su mineralogía y diagénesis. Con base en análisis detallados de petrografía inorgánica, análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de difracción de rayos X (DRX), este proyecto propone un modelo de sucesión de eventos diagenéticos para el Miembro Galembo de la Formación Luna en un pozo de la cuenca Valle Medio del Magdalena.

Los diferentes análisis mineralógicos, texturales y composicionales hechos en 32 muestras de núcleos de perforación del Miembro Galembo, permitieron definir seis petrofacies: (1) arcillolita calcárea con foraminíferos, (2) arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica, (3) rocas ortoquímicas, (4) Wackestone, (5) Packstone y Grainstone con bioclastos y (6) Tobas.

El análisis y la interpretación de la información obtenida a partir de las técnicas realizadas permitieron establecer doce eventos diagenéticos principales que modificaron las características originales de los sedimentos: bioperturbación, neomorfismo, estilolitización, fracturamiento, migración de hidrocarburos, disolución, cementación de calcita y precipitación de pirita, sílice, caolinita, clorita y yeso, los cuales fueron ordenados en términos de diagénesis temprana (eogénesis), diagénesis media (mesogénesis) y diagénesis tardía o telogénesis.

*Trabajo de grado

*Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Geólogo Mario García González, PhD.

Abstract

TITLE: Diagenetic events of the Galembo member of the La Luna Formation in a well in the Magdalena Medium Valley basin and its relationship with unconventional reservoirs*

AUTHOR: Lina Marcela Pedraza Cristancho**

KEYWORDS: La Luna Formation, Galembo Member, diagenesis, Magdalena Medium Valley basin, petrography, X-ray diffraction (DRX), scanning electron microscopy (SEM).

The La Luna Formation is considered the most important source rock in the Middle Magdalena Valley basin (MMV), however, there is not much information focused on the definition of its mineralogy and diagenesis. Based on detailed analysis of inorganic petrography, scanning electron microscopy analysis (SEM) and X-ray diffraction analysis (XRD), this project proposes a succession model of diagenetic events for the Galembo Member of the La Luna Formation in a well in the Middle Magdalena Valley basin.

The different mineralogical, textural and compositional analyses made in 32 samples of drill cores for the Galembo Member, allowed to define six petrofacies: (1) calcareous claystone with foraminifers, (2) calcareous claystone with foraminifers and organic matter, (3) orthochemical rocks, (4) Wackestone, (5) Packstone and Grainstone with bioclasts and (6) Tuffs.

The analysis and interpretation of the information obtained from the performed techniques, allowed the establishment of twelve main diagenetic events that modified the original characteristics of the sediments: bioturbation, neomorphism, stylolitization, fracturing, hydrocarbons migration, dissolution, calcite cementation and pyrite, silica, kaolinite, chlorite and gypsum precipitation, which were ordered in terms of early diagenesis (eogenesis), medium diagenesis (mesogenesis) and late diagenesis or telogenesis.

* Undergraduate thesis

**Faculty of Physicochemical Engineering, Geology School. Director: PhD. Mario García González.

Introducción

La Formación La Luna ha sido objeto de estudio por décadas y es considerada como una de las rocas generadoras más importantes de hidrocarburos en varias cuencas, tanto en Venezuela como en Colombia. Actualmente es escasa la información acerca de la Formación La Luna que esté enfocada a la definición de su mineralogía y diagénesis en la cuenca VMM, siendo esto una desventaja para futuros proyectos de exploración en yacimientos no convencionales.

En años recientes, la producción de gas y petróleo a partir de los yacimientos no convencionales (YNC), ha sido de gran impacto en la industria energética mundial, a tal punto que países industrializados pasaron de ser importadores a exportadores de hidrocarburos, afectando en gran medida el precio del crudo, lo cual originó gran interés en el desarrollo de YNC.

En Colombia, la gran mayoría de campos que producen petróleo lo hacen a partir de yacimientos convencionales y las reservas asociadas a estos depósitos, se estiman en el orden de los 1.700 millones de barriles, los cuales abastecerían el país por un poco más de 7 años (Aldana, 2018). Con el fin de incrementar sus reservas, Colombia incursionó en la exploración de nuevos recursos energéticos a partir de los YNC. Este proyecto hará un aporte al conocimiento mineralógico y diagenético de las rocas del Miembro Galembó de la Formación La Luna en la cuenca VMM, definida por la ANH (2011) como una de las rocas con mayor potencial para yacimientos no convencionales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar los principales eventos diagenéticos y su posición relativa en el tiempo para el Miembro Galembó de la Formación La Luna en un pozo de la cuenca Valle Medio del Magdalena (Colombia), con el fin de evaluar la relación de los episodios definidos, con los yacimientos no convencionales (YNC).

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar análisis petrográfico a secciones delgadas (SD) de núcleos de rocas, para determinar la composición mineralógica y sus relaciones texturales para establecer las diferentes petrofacies.
- Analizar muestras de roca por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) para obtener información textural y mineralógica a nivel nanométrico que soporte la definición de las petrofacies.
- Analizar muestras de roca por medio de difracción de rayos X (DRX) para obtener información composicional de las arcillas presentes en cada petrofacies.

2. Localización

El pozo 1 objeto de estudio se encuentra ubicado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena VMM, en el departamento de Santander cerca al municipio de Barrancabermeja (ver figura 1).

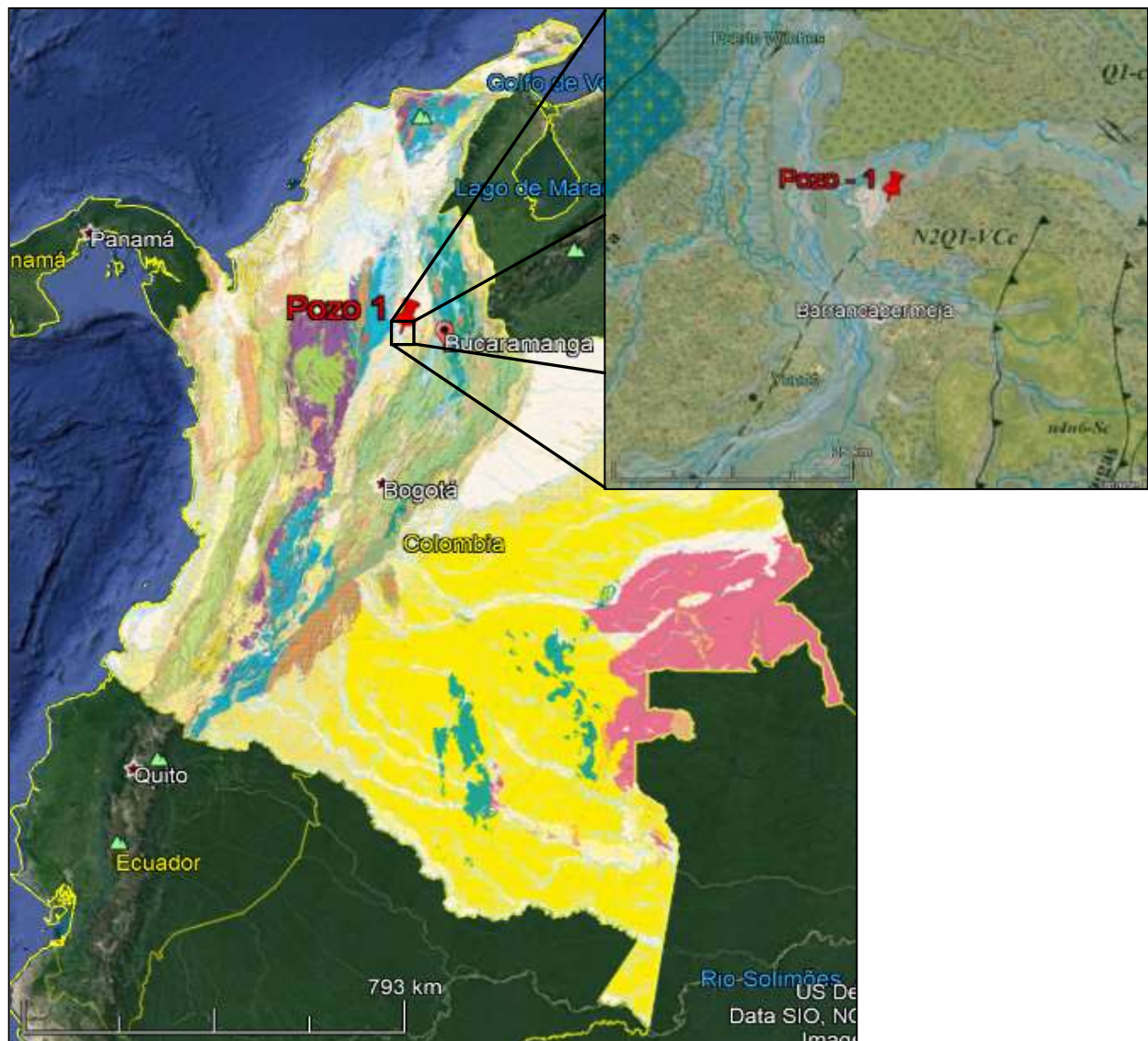


Figura 1. Localización del pozo 1 en la cuenca VMM cerca de la confluencia de los ríos Magdalena y Sogamoso. Tomado de MGC, SGC, 2015 y Google Earth.

3. Marco Geológico

3.1 Evolución geológica

El Valle Medio del Magdalena (VMM) se localiza entre las cordilleras central y oriental de los andes colombianos; corresponde a una cuenca intracordillerana, basculada hacia el oriente con tendencia homoclinal afectada por pliegues y fallas (Mojica y franco, 1990). Según Kingston et al. (1983) el VMM constituye una cuenca poli-histórica compleja formada a partir de diferentes eventos tectónicos y cuyos depósitos sedimentarios datan desde el Triásico al Holoceno (ver figura 2).

En el Triásico se inicia la apertura del paleocaribe por la formación de la fosa tectónica de hundimiento (graben), con presencia de actividad volcánica intensa que separa a Norte y Suramérica (Toussaint y Restrepo, 1989 en Royero y Clavijo, 2001). En las fases finales del Triásico y principios del Jurásico, se inicia la ruptura de Pangea mediante un proceso de *rifting* que conlleva a la formación de una cuenca intercontinental, generando grietas que afectan en gran parte al cratón suramericano y que evolucionaron a la etapa de aulacógeno (Maze, 1984 en Royero y Clavijo, 2001). Durante el *rifting* tuvo lugar una depositación asociada a la formación de un graben supracontinental, bordeado por paleofallas normales, con subsidencia, por causa de una tectónica de bloques (Fabre, 1983 en Mojica y Franco, 1990), acompañado de un incipiente vulcanismo explosivo, que permite la acumulación de la Formación Jordán y la secuencia fluvial del Grupo Girón (Royero y Clavijo, 2001).

A comienzos del cretácico la sedimentación continental de arenas y conglomerados pertenecientes a la Formación Tambor dan paso de manera gradual a la ingresión marina, que inicialmente inunda el *paleo-rift* del Magdalena y luego invade áreas mayores (Etayo et al., 1989

en Royero y Clavijo, 2001). Posteriormente, la cuenca es rellenada por una megasecuencia que registra hacia la base el inicio de un evento transgresivo, el cual, después de experimentar fluctuaciones menores del nivel del mar en sus partes media y alta, al final es claramente regresivo (Clavijo et al., 2008). La transgresión Cretácica inicia durante el Valanginiano - Hauteriviano con la sedimentación de carbonatos de plataforma somera de la Formación Rosablanca, seguido por la depositación durante el Hauteriviano – Barremiano de unos lodos calcáreos de plataforma interna de mayor profundidad, correspondientes a la Formación Paja (Cooper et al., 1995). En el Cretácico Medio se depositan calizas fosilíferas en un ambiente nerítico poco profundo de la Formación Tablazo y durante el Albiano, una potente secuencia de lodos y lodos calcáreos de la Formación Simití es depositada en una plataforma somera que luego se profundiza hasta alcanzar su máximo nivel de subsidencia a finales del Albiano (ECOPETROL-ICP, 1998 en Clavijo et al., 2008).

El máximo aumento global del nivel del mar y la surgencia anóxica se registra en el Turoniano – Coniaciano y con ello el desarrollo de facies de mar abierto, representadas por *shales* calcáreos y calizas pertenecientes al Miembro Galembó de la Formación La Luna (Cooper et al., 1995). El resto de la Formación La Luna muestra una progresiva somerización durante la depositación del Miembro Pujamana y facies de mar abierto proximal con episódicas somerizaciones que permitieron la depositación de litologías calcáreas y fosfáticas del Miembro Galembó durante el intervalo Coniaciano – Santoniano (Sarmiento et al., 2015). Finalmente se evidencia la sedimentación de lodos con mantos delgados de carbón en el Campaniano – Maastrichtiano para la Formación Umir, lo cual representa en términos generales la somerización definitiva de la cuenca (Clavijo et al., 2008).

Para el Cretácico Tardío y comienzo del Cenozoico, se inicia el levantamiento de la cordillera central producto del inicio de la colisión de la Placa de Farallones contra la Placa Suramericana (Gómez et al., 2003; Gómez et al., 2005 b; Caballero et al., 2010; Horton et al., 2010 en Sarmiento et al., 2015) lo que a su vez da lugar a la formación de la Cordillera Occidental. Esta fase tectónica compresiva ocasiona un cambio en los patrones de sedimentación ya que las condiciones del mar cretácico abierto se modifican para dar paso a la formación de un mar cerrado con apariencia de islas barrera, lagunas costeras y pantanos. Finalmente, en el Paleoceno Temprano existe un desarrollo de sistemas de llanuras deltaicas que generan la depositación de la Formación Lisama (Cordoba et al., 2000), registrando el cambio de ambiente marino a continental.

Relacionado al episodio compresivo se desarrolla un estilo estructural predominante de cabalgamientos con vergencia al oriente que conduce a la formación de una extensa cuenca antepaís entre la cordillera central y el escudo de Guyana, depositándose para el Eoceno Medio en esta nueva cuenca unidades sedimentarias correspondientes a la Formación La Paz y la Formación Esmeraldas, ésta última en discordancia angular y depositada en el intervalo Eoceno Tardío - Oligoceno Temprano (Morales, 1958; Gómez et al., 2005b en Caballero, 2010).

Durante el Oligoceno tardío y el Mioceno medio comienza el levantamiento de la cordillera Oriental, se depositan la Formación Mugrosa y Colorado en ambientes continentales, que varían desde abanico canaliformes hasta sistemas fluviales de llanuras de inundación y de ríos meándricos (Moreno et al., 2011 en Sarmiento et al., 2015). Finalmente, mientras se levanta y exhuma la Cordillera Oriental, esta cuenca es rellenada por depósitos continentales referentes a la Formación Real y Formación Mesa en el Plioceno (Caballero, 2010).

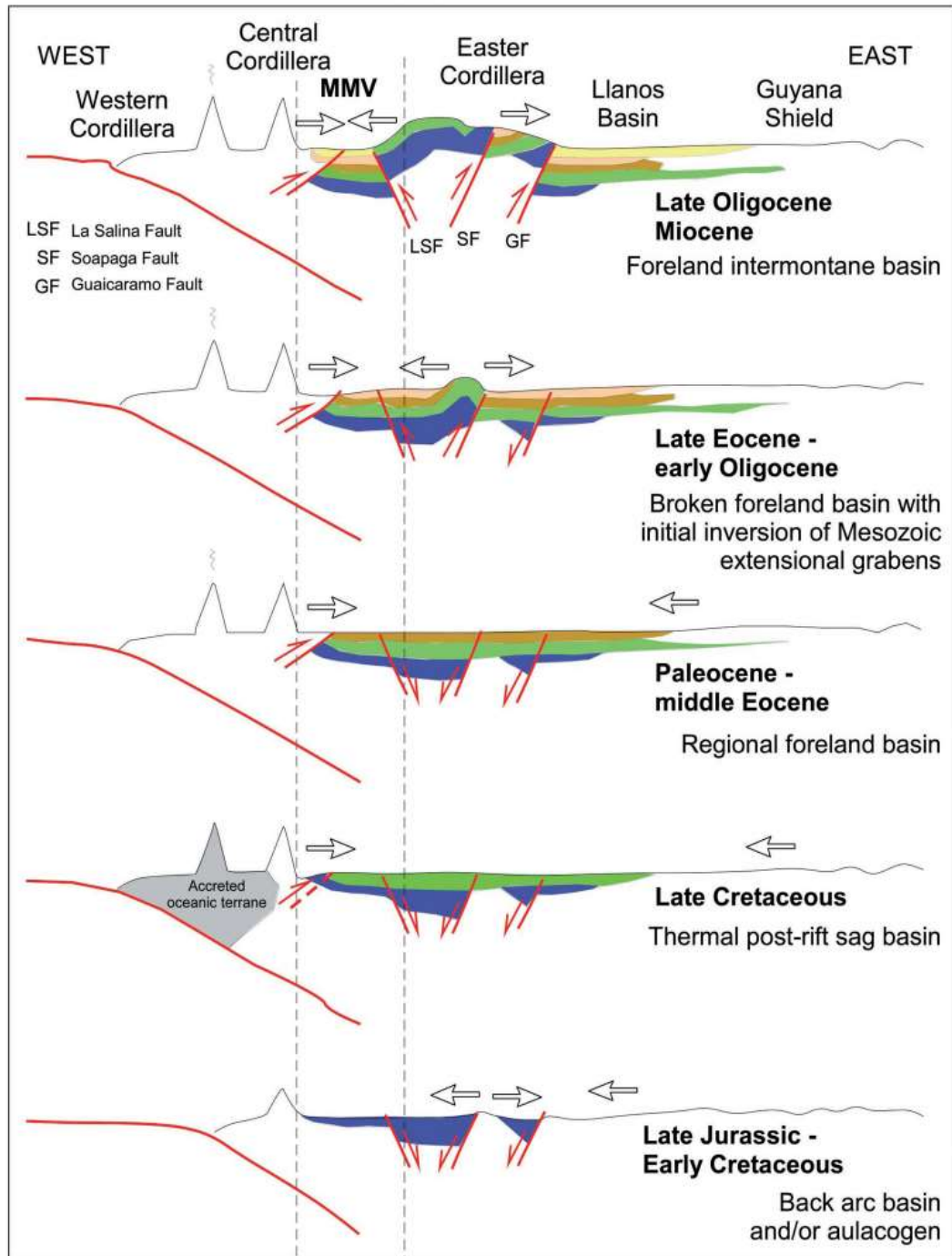


Figura 2. Esquema de la evolución tectónica del Valle Medio del Magdalena. Tomado de Horton et al., 2010 en Sarmiento, 2011.

4. Marco Teórico

4.1 Diagénesis

La diagénesis se entiende como el conjunto de procesos que transforman los sedimentos en rocas. Estos procesos son post-sedimentarios y pueden ser de tipo químico, físico y biológico, los cuales pueden ocurrir en condiciones de temperatura que varían de 0° a ~250 °C y presiones desde ~0,1 hasta 200 Mpa. La diagénesis excluye los procesos que involucran temperaturas y presiones lo suficientemente altas como para llamarse metamorfismo (Nichols, 2009).

4.2 Procesos diagenéticos

Los procesos que intervienen en la diagénesis están marcados por la compactación, cementación, disolución, reemplazamiento y recristalización.

4.2.1 Compactación. Se define como los cambios físicos que tienen lugar en un sedimento desde el mismo instante en que estos son depositados. Estos cambios se producen esencialmente por efecto de la compactación mecánica producto del aumento de la presión o carga sedimentaria al incrementarse la profundidad de enterramiento, generando reducción del volumen y pérdida de la porosidad (Sandoval, 2000). Por otra parte, la compactación química es una consecuencia del aumento de solubilidad mineral al aumentar la presión y consiste en la disolución preferencial en los puntos o zonas de la roca donde la presión es mayor, es decir en contactos intergranulares y estilolitos (Nichols, 2009).

4.2.2 Cementación. Es el proceso en el cual se forma una serie de minerales autigénicos por precipitación directa de las soluciones intersticiales. Esta precipitación ocurre debido a una sobresaturación del fluido de poro en ciertas sustancias, dando lugar a la formación de minerales de diversa composición química (Sandoval, 2000). La sobresaturación para cristalizar cementos carbonáticos es causada por varios mecanismos fisicoquímicos que son: ascenso del pH provocado por una pérdida del CO₂; concentración por evaporación; aumento de la temperatura; descenso de la presión y mezcla de aguas (Rossi, 2010).

4.2.3 Disolución. Se presenta en sedimentos carbonatados cuando los fluidos intersticiales están subsaturados con respecto a la mineralogía del carbonato (Tucker y Wright, 1990). La subsaturación es provocada por una variedad de factores como lo son: el descenso del pH provocado por la incorporación del CO₂; el descenso de la temperatura, que aumenta la solubilidad de los carbonatos; y el aumento de la presión, el cual tiende a incrementar la solubilidad del mineral. La disolución favorece la creación de porosidad secundaria (Rossi, 2010).

4.2.4 Reemplazamiento. El reemplazamiento implica la disolución de un mineral y la precipitación casi simultánea de otro mineral de diferente composición en su lugar. Descrito mediante un proceso de disolución-reprecipitación simultánea y a microescala, que se realiza mediante la migración de un frente de reemplazamiento formado por una fina película de agua (Boggs, 2009).

4.2.5 Recristalización. Se refiere al conjunto de procesos que producen cambios en la cristalinidad, textura o composición química de los minerales (Goldstein y Rossi, 2002). En el dominio diagenético, estas transformaciones suceden invariablemente en presencia de agua y por disolución o reprecipitación. En su sentido más amplio, la recristalización incluye: 1) transformaciones que no conlleven cambios de especie mineral (por ejemplo, aumentos de tamaño cristalino), y 2) transformaciones entre especies minerales distintas, pero de composición química similar (por ejemplo, transformaciones entre polimorfos) (Tucker y Wright, 1990).

El término recristalización usado en sentido amplio es similar al "Neomorfismo", definido pragmáticamente por Folk (1965), para cubrir los procesos de inversión y recristalización cuando ha habido un cambio de mineralogía. La inversión es el cambio de un mineral por su polimorfo y la recristalización, estrictamente, se refiere a los cambios en el tamaño o forma del cristal sin cualquier cambio de mineralogía.

4.3 Ambientes diagenéticos

Tradicionalmente, la diagénesis se ha dividido en tres etapas: diagénesis temprana (eogenética), diagénesis de enterramiento (mesogenética) y diagénesis de emersión (telogenética) (Choquette y Pray, 1970; Morad et al., 2000 en Rossi, 2010). Sin embargo, es útil subdividir la diagénesis de los carbonatos en tres ambientes o zonas diagenéticas (figura 3) en función del origen del agua intersticial y de la profundidad: diagénesis marina, diagénesis meteórica y diagénesis de enterramiento (Tucker y Wright, 1990).

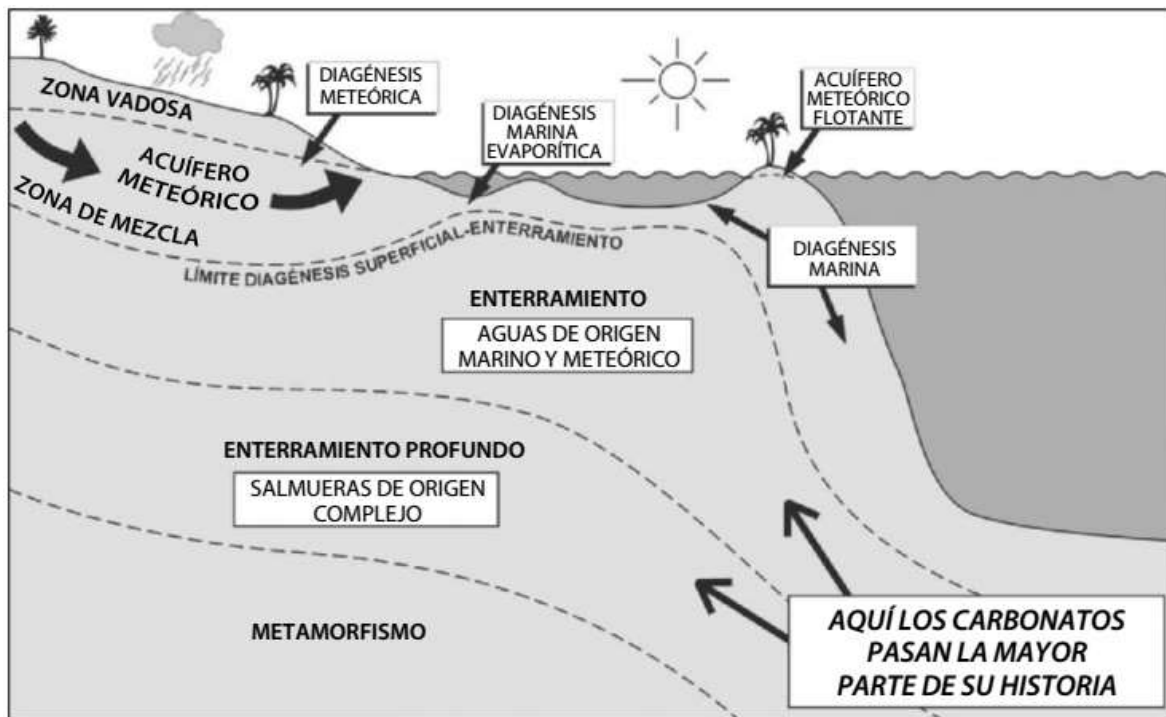


Figura 3. Principales zonas o ambientes diagenéticos en función del origen del agua intersticial y de la profundidad. Tomado de Rossi, 2010.

4.3.1 Diagénesis en medios marinos. Sucede en presencia de agua marina y a poca profundidad, por tanto, abarca los procesos que suceden tanto en la interface agua-sedimento como en el enterramiento somero, siempre que el agua intersticial sea marina (Rossi, 2010). Generalmente opera en períodos de tiempo cortos (desde algunos años a miles de años, en la mayoría de los casos) e involucra un rango restringido de química de fluidos porosos, como también se incluyen procesos de alteración biogénica y cambios físicos – químicos determinados por procesos de cementación y disolución (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003).

James y Choquette (1990) destacan cuatro zonas diagenéticas en el fondo marino. La Zona I de precipitación, se produce principalmente en entornos poco profundos de tropical a subtropical, donde predomina la sobresaturación de aragonito y calcita, el límite inferior de la zona de

precipitación está marcado por la lisoclina del aragonito, es la profundidad en la cual el agua comienza a estar subsaturada en aragonito e inicia su disolución. La zona II de disolución y precipitación, se encuentra por debajo de la lisoclina de aragonito donde las aguas están subsaturadas en aragonito, pero sobresaturadas en calcita biogénica, dando lugar a la disolución de aragonito y precipitación de calcita. El límite inferior de esta zona es la lisoclina de la calcita, que es la profundidad en que la tasa de disolución de la calcita aumenta bruscamente. La zona III de disolución activa, comprendida entre la lisoclina de la calcita y el nivel de compensación de la calcita, es la zona donde ya no puede precipitar calcita inorgánica, aunque si se puede llegar a acumular carbonato pelágico que en gran parte se disuelve. La zona IV de no carbonato, es donde predomina la disolución y no se acumula ningún carbonato.

4.3.2 Diagénesis en medios meteóricos. Representa la alteración que ocurre en o cerca de la superficie de la tierra en estratos influenciados o penetrados por aguas de origen meteórico. El ambiente meteórico se divide típicamente en zonas insaturadas (zona vadosa) y saturadas (zona freática) divididas por una capa freática. Las interfaces entre los fluidos meteóricos superficiales y los estratos llenos de otros fluidos porosos (agua de mar o aguas basales) son "zonas de mezcla" que pueden tener características diagenéticas especiales (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003).

La mayoría de los depósitos de carbonato marino superficial experimentan una diagénesis meteórica, ya sea como consecuencia de la acumulación de sedimentos sobre el nivel del mar, o a través de caídas en el nivel del mar que exponen carbonatos de plataforma. Los procesos meteorológicos suelen actuar a lo largo de períodos de tiempo de cientos a millones de años (Land, 1986 en Boggs, 2009).

La diagénesis meteórica puede producir cambios notables en la composición mineralógica de los carbonatos y en su porosidad por procesos de disolución y cementación. Este potencial se debe en parte a los grandes volúmenes de agua meteórica que pueden llegar a circular por rocas permeables a lo largo del tiempo, y a que el agua meteórica suele estar inicialmente subsaturada en carbonatos, debido a la acidificación que provoca la incorporación de CO₂ atmosférico y edáfico. De manera general, en el entorno meteórico la disolución de aragonito y calcita baja en magnesio y la precipitación de calcita son procesos dominantes (Rossi, 2010).

4.3.3 Diagénesis de enterramiento. Es controlada por factores importantes como la presión y la temperatura, las cuales tienden a incrementar con el aumento de la profundidad de enterramiento causando una reducción general de la porosidad y permeabilidad (Scholle y Halley, 1985; Bjorlykke, 1994 en Rossi, 2010). Así mismo, son también fundamentales la composición de los fluidos intersticiales, el tamaño de grano, la textura del sedimento y la mineralogía.

Los procesos diagenéticos en el entorno de enterramiento profundo incluyen la compactación física y química, la cementación, la disolución y el neomorfismo. La compactación física produce una serie de efectos sobre los sedimentos de carbonato, como la rotura de las cáscaras de los fósiles y la deformación de los granos blandos; sin embargo, su efecto más importante es la reducción de la porosidad del sedimento. La compactación química o presión de solución produce estilolitos a escala local y, en una escala mayor, causa una gran pérdida de porosidad y adelgazamiento de las capas (Tucker y Wright, 1990).

Por otro lado, tanto la cementación como la disolución ocurren en el ambiente de enterramiento dependiendo de las condiciones del entierro. Los factores que favorecen la

cementación incluyen el aumento de la temperatura, las aguas de poros sobresaturadas y la disminución de la presión parcial de CO₂. Los factores que favorecen la disolución incluyen el aumento de la presión de la roca (presión de solución), fluidos de poros insaturados y fluidos de poro químicamente agresivos debido al CO₂ disuelto y a los ácidos orgánicos generados por la diagénesis de la materia orgánica. Los cambios neomórficos, como la alteración del aragonito y la calcita de bajo magnesio a la calcita de alto magnesio, y el aumento del tamaño de los cristales debido a la recristalización también son comunes en el ambiente de entierro (Boggs, 2009). Es importante resaltar que estos procesos de entierro suelen actuar durante millones a cientos de millones de años y es donde las rocas pasan la mayor parte de su historia (Scholle y Ulmer-Scholle, 2003).

5. Metodología

El proyecto se realizó en cuatro (4) etapas las cuales serán descritas a continuación:

5.1 Etapa I: Revisión bibliográfica

En el desarrollo de esta fase se realizó una recopilación bibliográfica de la información disponible en libros, artículos y trabajos de grado que estén relacionados con petrología, procesos diagenéticos y las técnicas de análisis como microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX) con el fin de obtener fundamentos básicos para la ejecución de este proyecto.

5.2 Etapa II: Análisis de laboratorio

En esta etapa se realiza la preparación de cada muestra de roca para las técnicas de petrografía, microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX) con sus respectivos análisis.

5.2.1 Petrografía. Se realizó el análisis petrográfico a 32 secciones delgadas de muestras de roca de núcleos de perforación del Miembro Galembó de la Formación La Luna, las cuales fueron elaboradas y suministradas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) para su estudio. El análisis petrográfico se realiza a partir de un conteo de aproximadamente 250 – 300 puntos para abarcar la totalidad de la sección delgada con el fin de obtener un resultado composicional y textural de cada muestra de roca. Los valores del conteo son registrados en una tabla (Apéndice A) y teniendo en cuenta los porcentajes obtenidos de aloquímicos, ortoquímicos y terrígenos presentes en cada muestra, se define el nombre de la roca teniendo en cuenta la clasificación de rocas carbonatadas según Dunham (1962) y la clasificación para rocas sedimentarias según Folk (1974). La descripción de los niveles de tobas se realizó mediante la clasificación composicional de fragmentos piroclásticos según el diagrama de Schmid (1981).

5.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM). Esta técnica se realizó a 8 muestras de roca de núcleos de perforación y su método de preparación consiste en la partición de la muestra de roca de tal forma que una de sus caras planas se coloca sobre el *stubs* metálico y se deja la parte de la roca fresca a disposición del lector, se prosigue con el recubrimiento de la muestra de roca con grafito líquido sin cubrir la superficie de roca fresca, finalmente la muestra se purga al vacío y se recubre con oro. Teniendo las muestras de roca preparadas se procede al análisis de

cada una de ellas en el Microscopio Electrónico de Barrido FEG (*Field Emission Gun*) donde se adquieren imágenes para observar la morfología y la composición elemental de cada mineral.

5.2.3 Difracción de rayos X (DRX). Esta técnica se realizó para las mismas 8 muestras de roca de núcleo de perforación que fueron previamente seleccionadas para las pruebas de SEM. El análisis se efectúa bajo dos modalidades: Roca total o bulk y fracción arcilla.

El proceso de preparación de la muestra para el análisis de bulk se llevó a cabo mediante el cuarteo y pulverización de la roca en un mortero de ágata con montaje desorientado, para finalmente proceder con el análisis en el equipo de DRX.

El proceso de preparación de la muestra de roca para el análisis de fracción arcilla se realizó mediante la pulverización y disgregación de la muestra para eliminar cementantes, a continuación, se separa la fracción menor de 2 micras mediante el proceso de centrifugación y se disponen de tres montajes orientados para cada muestra: un montaje de un blanco (normal), un montaje con adición de etilenglicol y un montaje con la muestra calcinada a 550° C. Los tres montajes se llevan al difractómetro de polvo *Bruker D8 Advance* con el fin de identificar las arcillas presentes en los difractogramas obtenidos.

5.3 Etapa III: Interpretación de resultados

La integración e interpretación es realizada a partir de los resultados obtenidos en petrografía, microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, para proponer un modelo de sucesión de eventos diagenéticos para el Miembro Galembo de la Formación La Luna.

5.4 Etapa IV: Redacción del informe final

Esta etapa consiste en la redacción y elaboración del libro donde se consignan los resultados y conclusiones del trabajo.

6. Resultados

En este capítulo se plasman los resultados obtenidos a partir de los análisis petrográficos (Apéndice B) los cuales, para obtener mayor detalle de la mineralogía, fueron complementados con técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (DRX). Teniendo en cuenta las características composicionales, texturales y procesos diagenéticos de las muestras del Miembro Galembo (Fm La Luna), se definen seis petrofacies, las cuales se enmarcan en un modelo de sucesión de eventos diagenéticos.

6.1 Petrografía

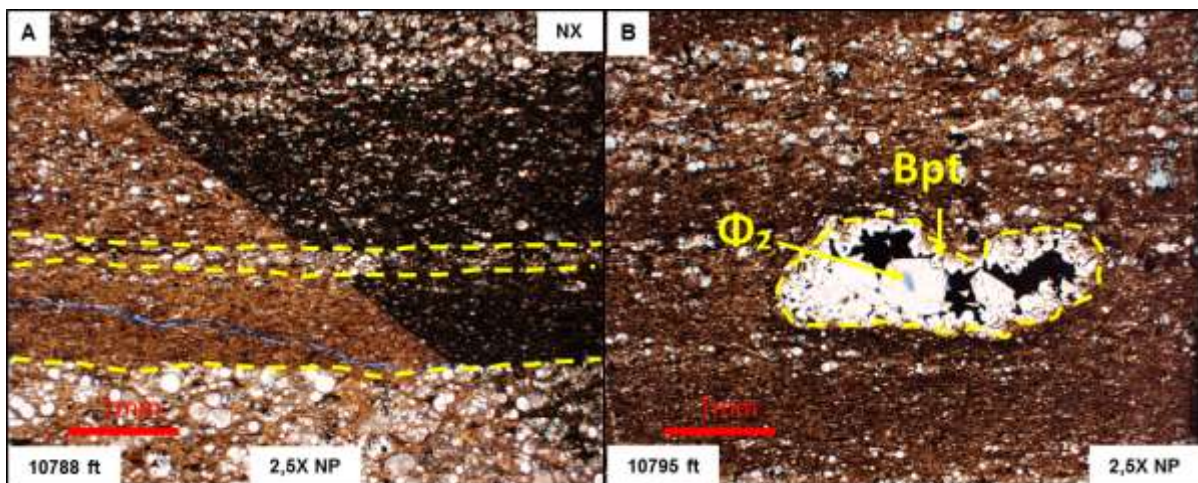
Se identificaron seis (6) petrofacies teniendo en cuenta las variaciones texturales y composicionales obtenidas de la descripción petrográfica de 32 muestras de núcleo de perforación del Miembro Galembo de la Formación La Luna.

6.1.1 Petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos. La petrofacie se encuentran hacia el tope en los intervalos 10716', 10788'- 10832' y en la parte media en las profundidades 10875' y 10893' del Miembro Galembo. Las rocas de esta petrofacie están compuestas principalmente por una matriz (35-52%) de color marrón constituida por micrita, arcillas indiferenciadas petrográficamente y en baja proporción materia orgánica (ver figura 4).

El contenido de aloquímicos (19-25%) está constituido por fósiles como foraminíferos plantónicos y en menor proporción bentónicos, fragmentos de conchas de bivalvos y bioclastos indiferenciados cementados con calcita esparítica y en menor proporción pirita; e intraclastos compuestos de calcita, ocasionalmente siderita y materia orgánica. Los ortoquímicos (20-26%) corresponden a calcita esparítica ferrosa o no ferrosa, pirita y esporádicamente arcilla.

Se presenta también cuarzo detrítico (Tr-7%), pirita (2-5%), leucoxeno (Tr%), fosfatos (Tr%) y materia orgánica (2-4%) en láminas, parches y diseminada; como también bituminosa rellenando microfracturas.

Texturalmente esta petrofacie presenta laminación bien definida o incipiente por concentración de foraminíferos, sin embargo, en algunos sectores se observa estructura masiva. Localmente se presenta bioperturbación caracterizada por madrigueras compuestas externamente de cuarzo y en el interior de materia orgánica con cristales de calcita parcialmente disueltos y calcedonia localmente; otras madrigueras están compuestas de cuarzo tamaño limo, muy fino a media con materia orgánica bordeando los cuarzos y cemento de calcita no ferrosa. Se observa porosidad secundaria (Tr%) por disolución.



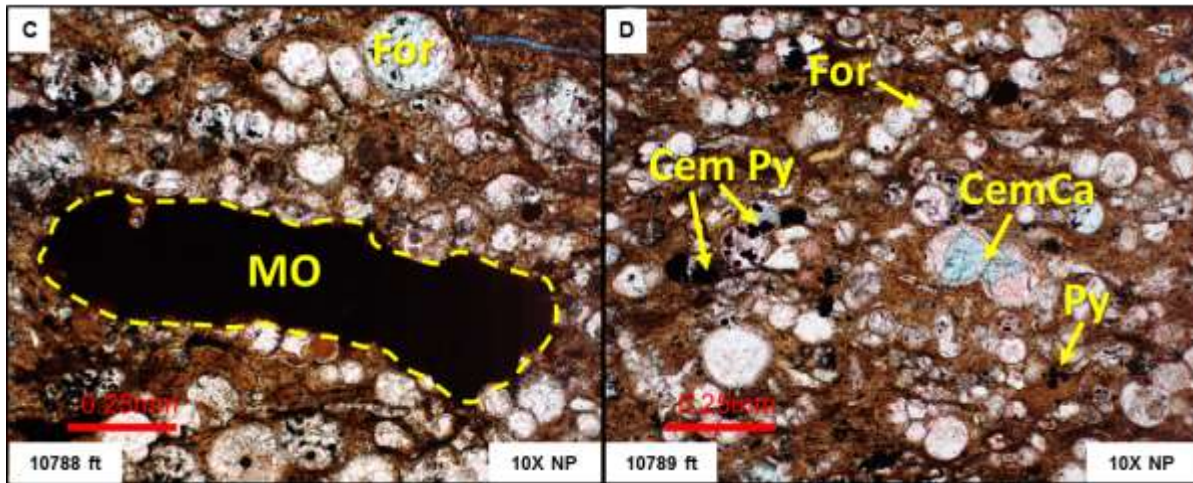


Figura 4. Petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos. A) Aspecto textural de la roca. B) Bioperturbación (Bpt) caracterizada por madriguera compuesta en sus bordes por cuarzo y en el interior materia orgánica y calcita, porosidad secundaria (Φ_2). C) Concentraciones de materia orgánica (MO). D) Foraminíferos (For) cementados (Cem) con calcita (Ca) y parcialmente piritita (Py).

6.1.2 Petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica. La petrofacie se observa hacia el tope en el intervalo 10729'-10755 en la parte media en la profundidad 10883' y en la base en las profundidades 10923', 10924', 10968' y 11052 del Miembro Galembó. Las rocas de esta petrofacie están compuestas principalmente por una matriz (31-49%) de color marrón oscuro a negro constituida por micrita, arcillas indiferenciadas petrográficamente, con un alto contenido de materia orgánica (ver figura 5).

El contenido de aloquímicos fósiles (19-31%) está constituido por foraminíferos plantónicos y en menor proporción bentónicos, fragmentos de conchas de bivalvos y bioclastos indiferenciados. En general los fósiles están siendo cementados con calcita esparítica ferrosa o no ferrosa y las cámaras de los foraminíferos están siendo rellenadas por piritita, materia orgánica y sílice. Los ortoquímicos (22-36%) corresponden a calcita esparítica ocasionalmente fibrosa y en mosaico, microesparita, lentejones de micrita, piritita, materia orgánica, sílice y localmente yeso.

Se presenta también cuarzo detrítico (Tr-2%), pirita (Tr-7%), fosfatos (Tr%) y materia orgánica (Tr-5%) en láminas, concentrada formando nódulos y en otros sectores como parches en forma irregular. Además, materia orgánica bituminosa rellena microfisuras.

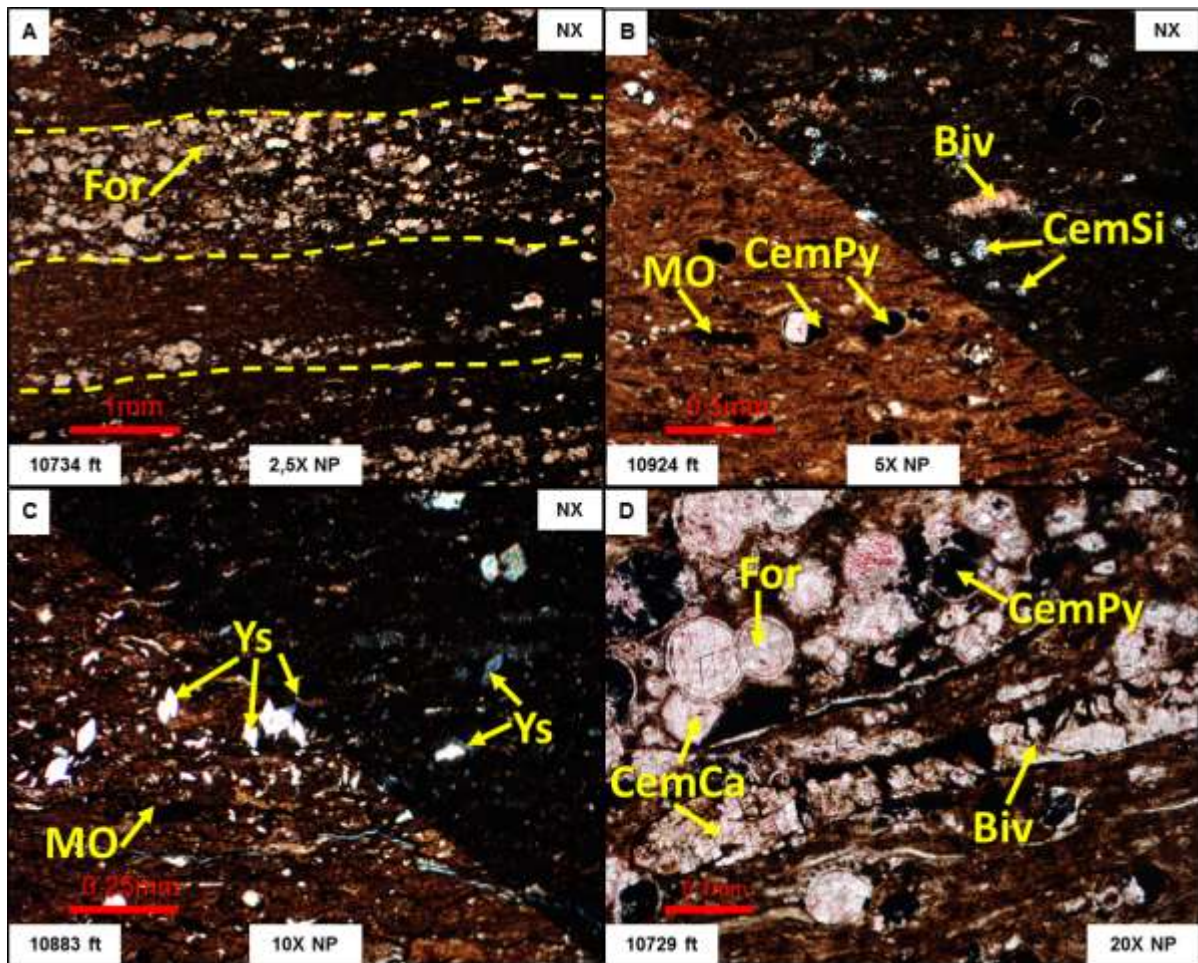


Figura 5. Petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica. A) Aspecto textural de la roca. B) Foraminíferos (For) cementados (Cem) con sílice (Si) y pirita (Py). C) Precipitación de yeso (Ys) y láminas de materia orgánica (MO). D) Foraminíferos y fragmentos de bivalvos (Biv) cementados con calcita (Ca).

Texturalmente en esta petrofacie predomina la laminación bien definida por concentración de materia orgánica y foraminíferos, sin embargo, se evidencia ocasionalmente laminación incipiente y estructura masiva. Localmente se presenta bioperturbación definida por madrigueras compuestas de cristales de calcita esparítica y materia orgánica, y otras con calcita fibrosa. También se presenta un lente compuesto por foraminíferos, fragmentos de conchas de bivalvos, micrita y materia orgánica. Se observa porosidad secundaria (Tr-1,8%) por fractura.

6.1.3 Petrofacies de rocas ortoquímicas. Las rocas de esta petrofacie se observan en las profundidades 10718', 10894', 10906', 10945 del Miembro Galembó. Se caracterizan por no tener aloquímicos sino estar compuestas netamente por el componente ortoquímico (64-79%) correspondiente a calcita esparítica, sin embargo, la muestra a la profundidad 10945' está compuesta por pseudoesparita (recristalización de la micrita) (ver figura 6).

Las muestras en las profundidades 10894' y 10906' presenta similitud por su contenido de piroclastos (15-33%) como son cristales de cuarzo, plagioclasa, feldespatos-k, ceniza volcánica desvitrificada y fragmentos piroclásticos. Mientras la muestra en la profundidad 10718' discrepa porque contiene un componente terrígeno de granos de cuarzo (7,7%), chert (12,6%) embebidos en una matriz arcillosa-fosfatizada (5,3%).

Se presenta también materia orgánica (Tr-28%), pirita (3-4%), fosfatos (2%) y patinas de óxido (1,6%).

Texturalmente en esta petrofacie predomina una estructura masiva. No se observa porosidad.

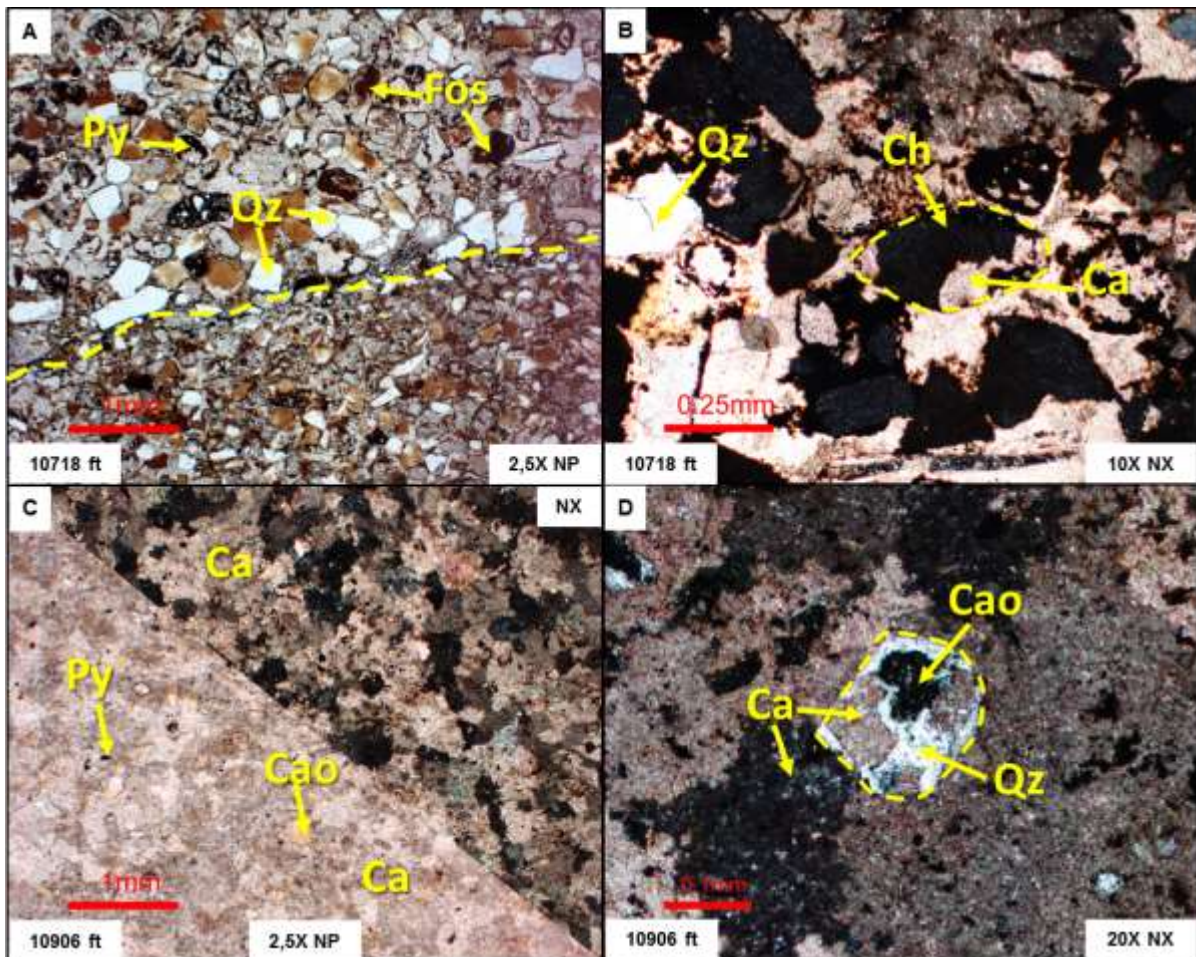


Figura 6. Petrofacies de rocas ortoquímicas. A) Aspecto textural de la roca (parte superior tamaños más grandes de los granos de cuarzo, fosfatos (Fos) y chert). B) Textura poiquilítica. fragmentos de chert (Ch) y cuarzo (Qz) embebidos en el mineral de calcita (Ca). C) Aspecto textural de la roca. D) Cristales de cuarzo alterados parcialmente por calcita y caolinita (Cao).

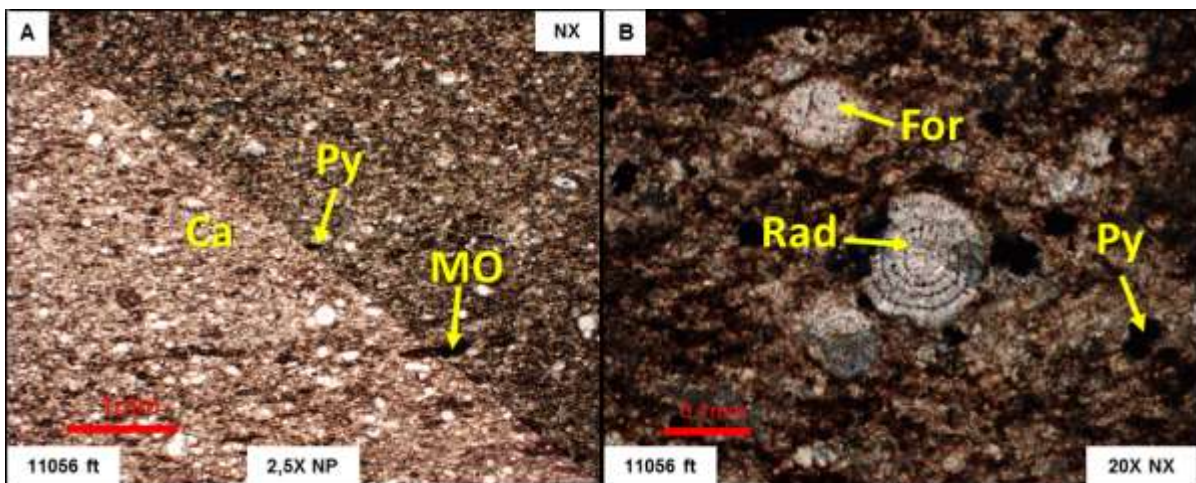
6.1.4 Petrofacies Wackestone. Esta petrofacie se observa hacia el tope en la profundidad 10728' en la parte media 10813', 10859' y en la base en las profundidades 10906', 10945', 11003' y 11056' del Miembro Galembó. Las rocas de esta petrofacie están compuestas principalmente por ortoquímicos (40-78%) definidos como micrita, microesparita y calcita esparítica (ver figura 7).

El contenido de aloquímicos (7-35%) está constituido por fósiles como foraminíferos plantónicos y en menor proporción bentónicos, fragmentos de conchas de bivalvos, bioclastos indiferenciados y radiolarios cementados con calcita esparítica ferrosa o no ferrosa y en menor proporción pirita; e intraclastos compuestos de materia orgánica y pequeños cristales de calcita en el interior.

La matriz (4-17%) está constituida principalmente de micrita y en menor proporción arcillas indiferenciadas petrográficamente.

Presentan también cuarzo detrítico (Tr-1%), chert (Tr%), pirita (Tr-3%), fosfatos (Tr%), óxidos (Tr%) y materia orgánica (Tr-8%) en láminas, parches, diseminada y materia orgánica bituminosa relleno microfracturas.

En esta petrofacie predomina una textura matriz soportada con más del 10% de granos con estructura masiva, sin embargo, en ciertos sectores se exhibe laminación incipiente. Localmente se presenta bioperturbación definida por madrigueras compuesta de cristales de calcita tamaño arena fina-media y en el interior materia orgánica. Se observa porosidad secundaria (1,3%) por fractura.



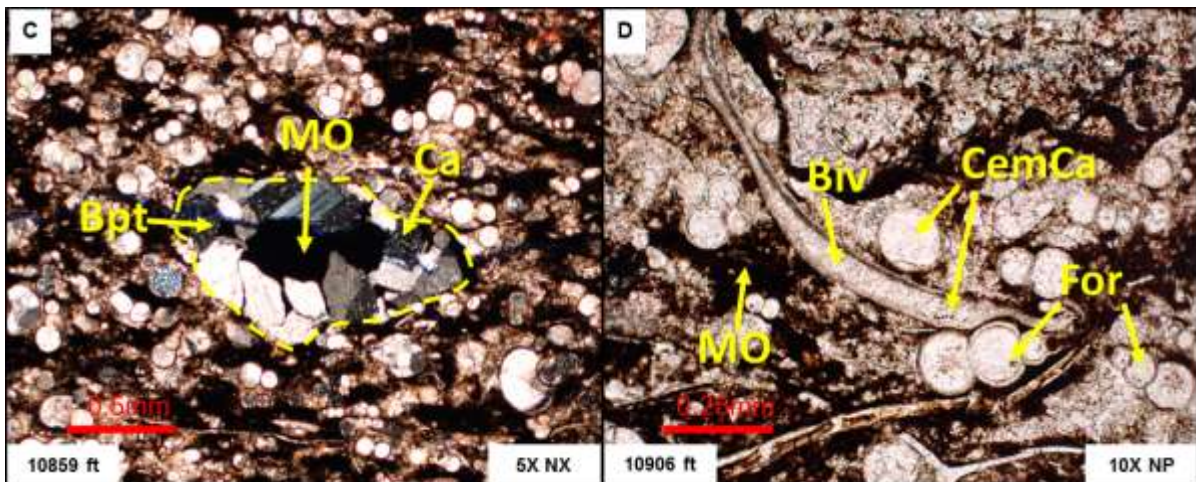


Figura 7. Petrofacies Wackestone. A) Aspecto textural de la roca. B) Radiolarios (Rad) y foraminíferos (For) cementados con calcita esparítica. C) Bioperturbación (Bpt) caracterizada por madrigueras rellena de calcita (Ca) y materia orgánica (MO). D) Foraminíferos y bivalvos (Biv) cementados (Cem) con calcita.

6.1.5 Petrofacies Packstone / Grainstone con bioclastos. Esta petrofacie se observa en las profundidades 10858', 10866', 10886', 10887', 10898', 10914' y 10928' aproximadamente están distribuidas entre la parte media y la base del Miembro Galembó.

Estas rocas están compuestas principalmente por calcita esparítica (43-75%). El contenido de aloquímicos fósiles (6-35%) como foraminíferos planctónicos y en menor proporción bentónicos, fragmentos de conchas de bivalvos, bioclastos indiferenciados y radiolarios están siendo cementados con calcita esparítica ferrosa o no ferrosa. Sin embargo, algunas cámaras de los foraminíferos están siendo rellenas por caolinita, clorita y esmectita-montmorillonita y otros bioclastos indiferenciados reemplazados parcialmente con siderita (ver figura 8).

Presenta un componente piroclástico (12-38%) constituido de cristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato-k, fragmentos piroclásticos y shards (ceniza volcánica) que están siendo alterados a

calcita, caolinita, clorita y esmectita-montmorillonita. También presenta cuarzo detrítico (Tr%), piritita (1- 5%) y materia orgánica (1-2%).

En esta petrofacie predomina una textura grano-soportada sin matriz con una estructura masiva. Se observa porosidad secundaria (1,6%) por disolución.

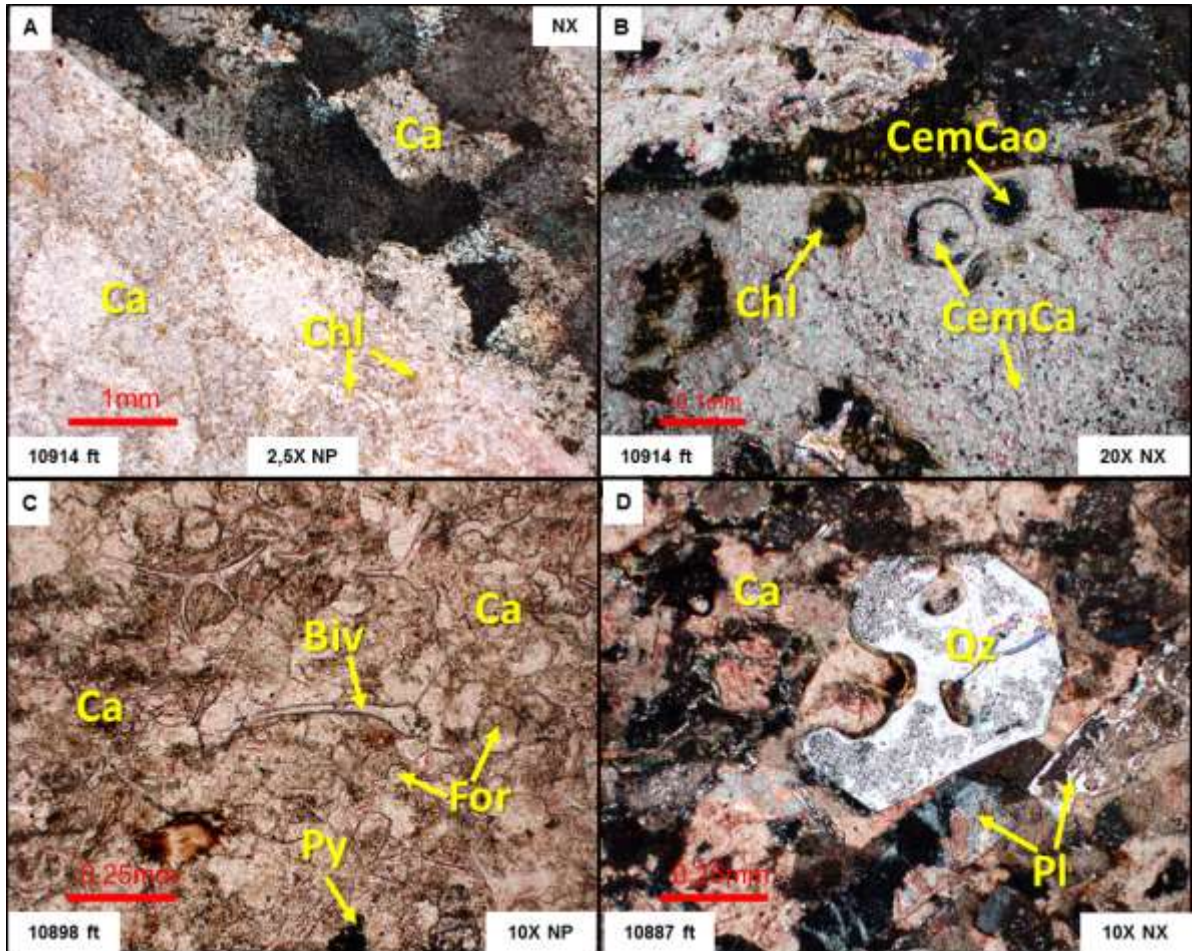


Figura 8. Petrofacies Packstone / Grainstone con bioclastos. A) Aspecto textural de la roca. B) Foraminíferos cementados con calcita (Ca), caolinita (Cao) y los bordes con clorita (Chl). C) Foraminíferos y bivalvos (Biv) rellenos de calcita. D) Cuarzo (Qz) con embahiamiento.

6.1.6 Petrofacies de Toba. Esta petrofacie se observa en las profundidades 10862' y 10894'. Estas rocas están compuestas principalmente por una matriz de arcilla del tipo illita (57-58%), contiene ceniza desvitrificada a caolinita (8-29%), esmectita-montmorillonita (1,8-19%) y otros alterados a calcita (3-3,8%) (ver figura 9).

Se presentan también cristales de cuarzo (2-4%) anhedrales de grano fino y minerales accesorios como pirita (4-5%), leucoxeno (Tr%) y circón (Tr%). No se observa porosidad.

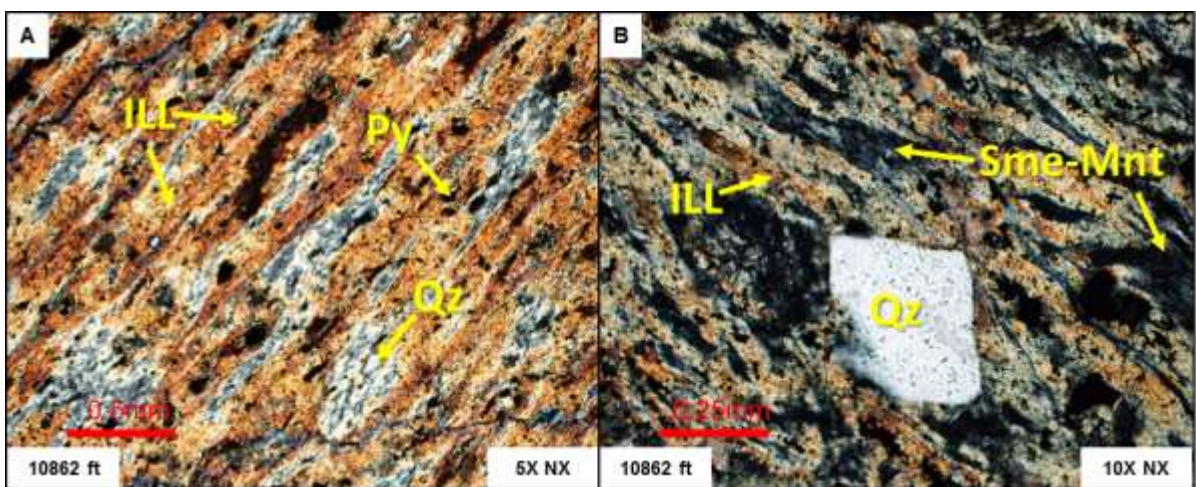


Figura 9. Petrofacies de Tobas. A) Aspecto general de la roca. B) Cristal de cuarzo y arcilla illita (Ill) y esmectita (Sme)- montmorillonita (Mnt) y pirita (Py).

6.2 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

El análisis SEM se realizó a 8 muestras de roca de núcleo de perforación correspondientes a las profundidades 10716', 10729', 10788', 10859', 10862', 10883', 10887', 10914', cada una de las muestras pertenecen a las petrofacies definidas por petrografía, a excepción de la petrofacies de tobas y rocas ortoquímicas. La adquisición de imágenes SEM junto con los espectros EDX (Apéndice C) para cada muestra de roca se interpretan basándose en la comparación de los espectros de dispersión EDX y morfologías que se presentan para cada mineral según Welton (2003).

6.2.1 SEM de la petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos. Las Muestras de roca en la profundidad 10716' y 10788' pertenecen a esta petrofacies, se logró identificar por medio de las imágenes de SEM y con ayuda de los espectros de dispersión que revela la composición química del mineral, que las rocas analizadas presentan foraminíferos, pirita en forma tabular y framboidal, cristales de calcita esparítica, barita, apatito y materia orgánica (ver figura 10).

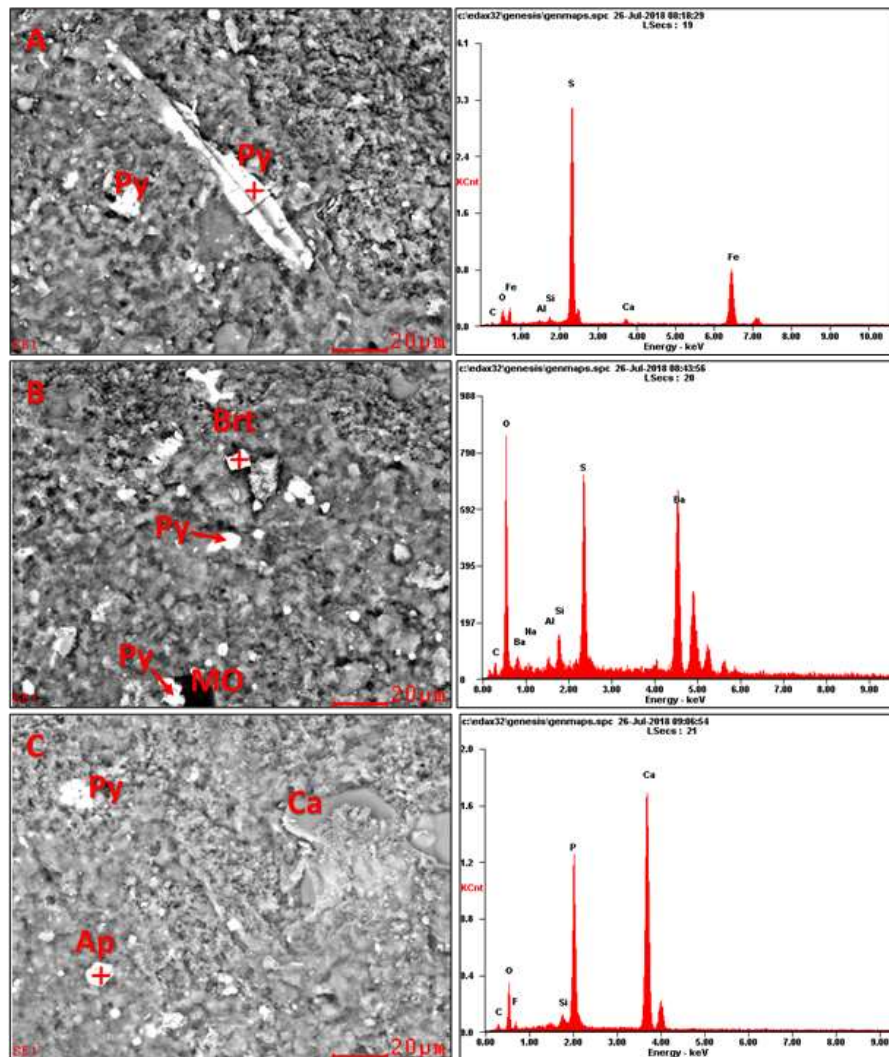


Figura 10. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10716 ft. A) fragmento alargado de pirita y pirita (Py) framboidal. B) Barita (Brt), pirita y concentraciones de materia orgánica (MO). C) Calcita (Ca) esparítica, pirita framboidal y apatitos (Ap).

6.2.2 SEM de la petrofacies Arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica.

Las muestras de roca en la profundidad 10729' y 10883' corresponden a esta petrofacies y presenta una matriz compuesta por 3 componentes principales: minerales arcillosos, cuarzo microcristalino y micrita. También se pudo identificar cristales de calcita esparítica, foraminíferos cementados con calcita, fragmentos de apatito y pirita (ver figura 11).

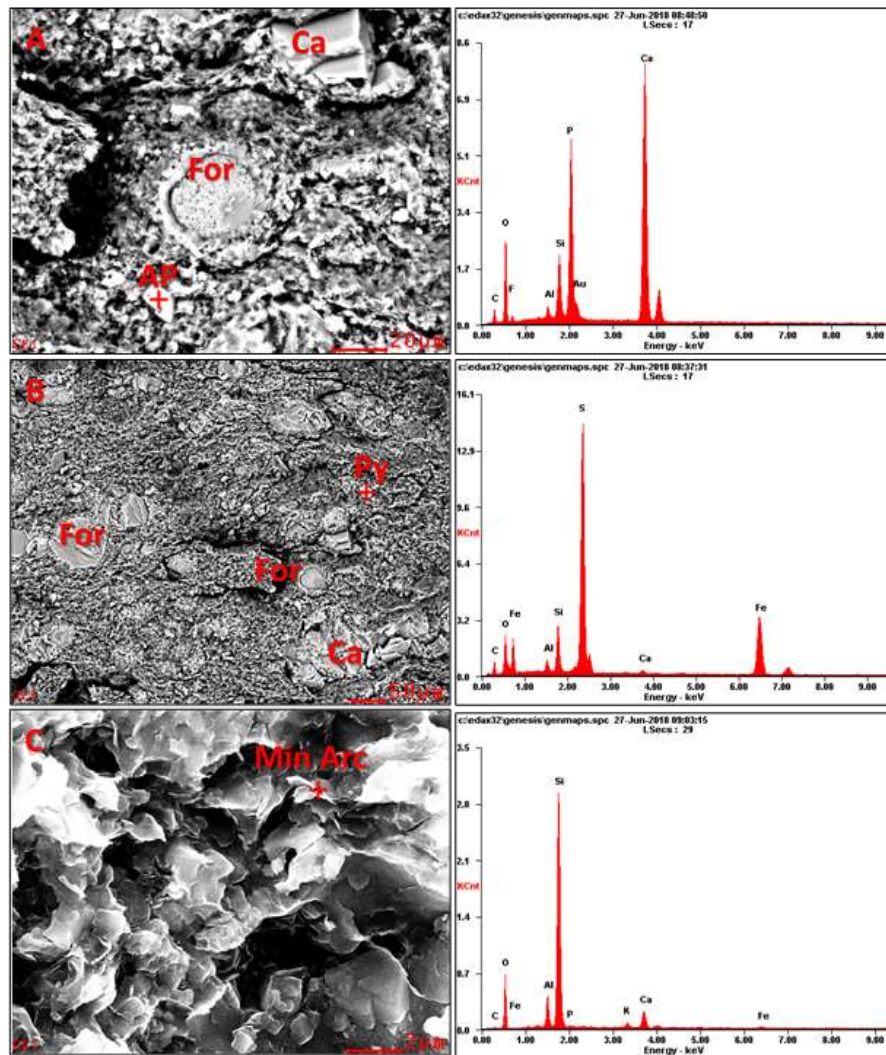


Figura 11. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10729 ft. A) Foraminíferos (For) relleno de calcita, calcita (Ca) esparítica y fragmentos de apatito (Ap). B) Foraminíferos cementados con calcita, calcita esparítica y pirita (Py) framboidal. C) Minerales arcillosos (Min Arc) posiblemente esmectita-illita con fábrica floculada con contactos borde cara.

6.2.3 SEM de la petrofacies Wackestone. La muestra de roca en la profundidad 10859' pertenece a esta petrofacies y presenta una matriz compuesta por micrita, cuarzo microcristalino. También presenta foraminíferos, los cuales están cementados con calcita esparítica, fragmentos de pirita y materia orgánica diseminada (ver figura 12).

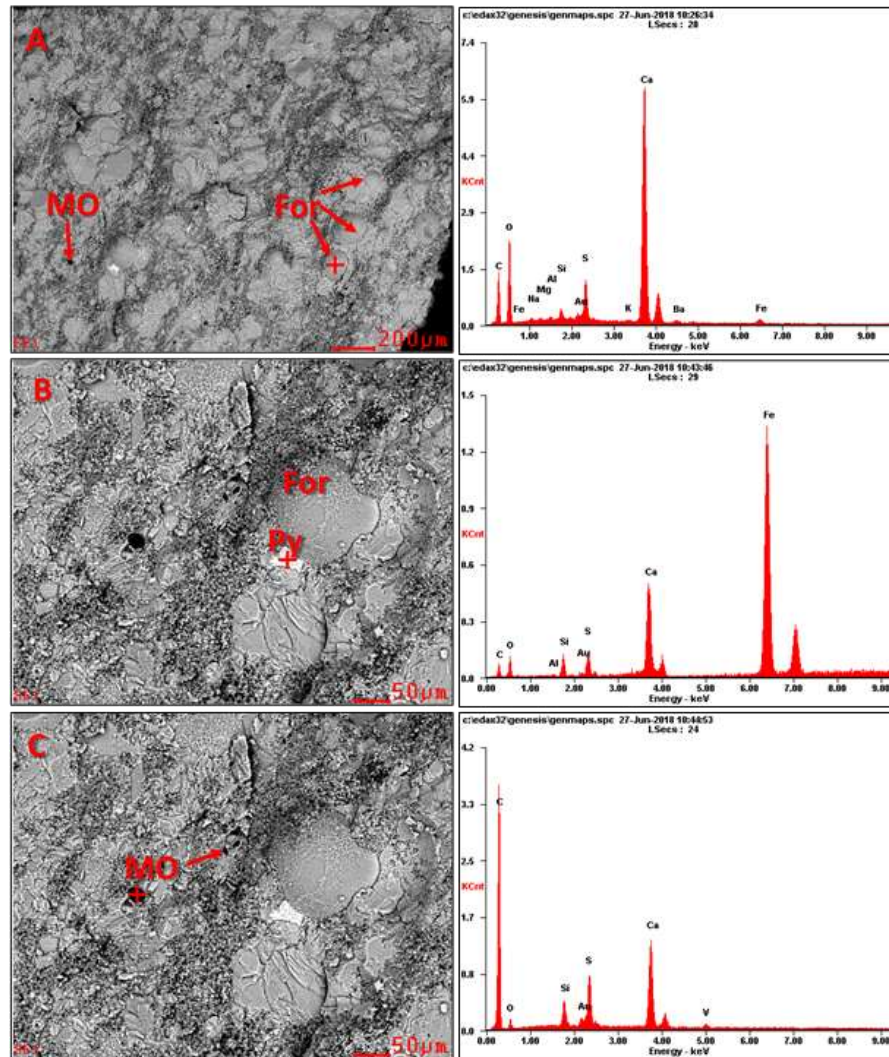


Figura 12. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10859 ft. A) Foraminíferos (For) rellenos de calcita (Ca) esparítica. B) Foraminíferos rellenos de calcita y pirita (Py). C) Materia orgánica (MO) diseminada.

6.2.4. SEM de la petrofacies Packstone – Grainstone con bioclastos. Las muestras de roca en la profundidad 10887', 10862' y 10914' pertenecen a esta petrofacies. Estas rocas presentan foraminíferos cementados con calcita esparítica, fragmentos de apatito, pirita framboidal y esfalerita (ver figura 13).

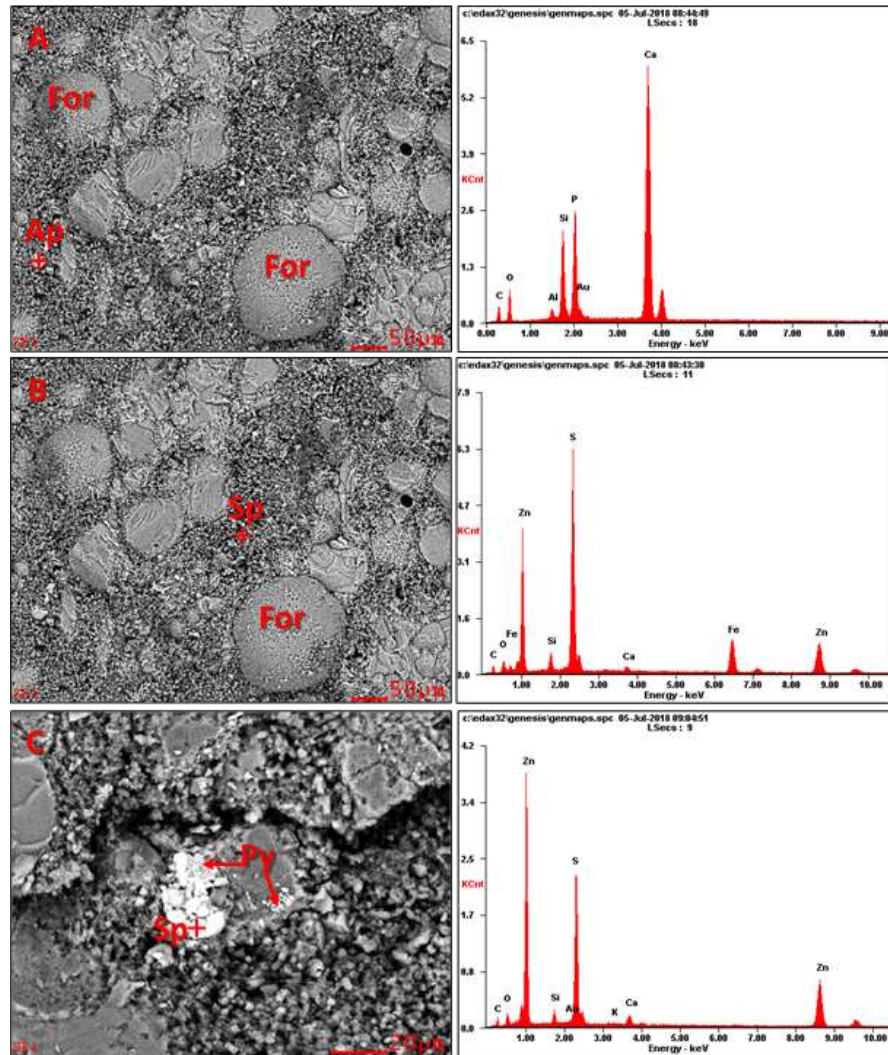


Figura 13. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10887 ft. A) Foraminíferos (For) rellenos de calcita (Ca) esparítica y apatito (Ap). B) Esfalerita (Sp). C) Pirita (Py) framboidal y esfalerita.

La muestra de roca en la profundidad 10862' se pudo identificar foraminíferos, fragmentos de pirita, barita, y caolinita (ver figura 14).

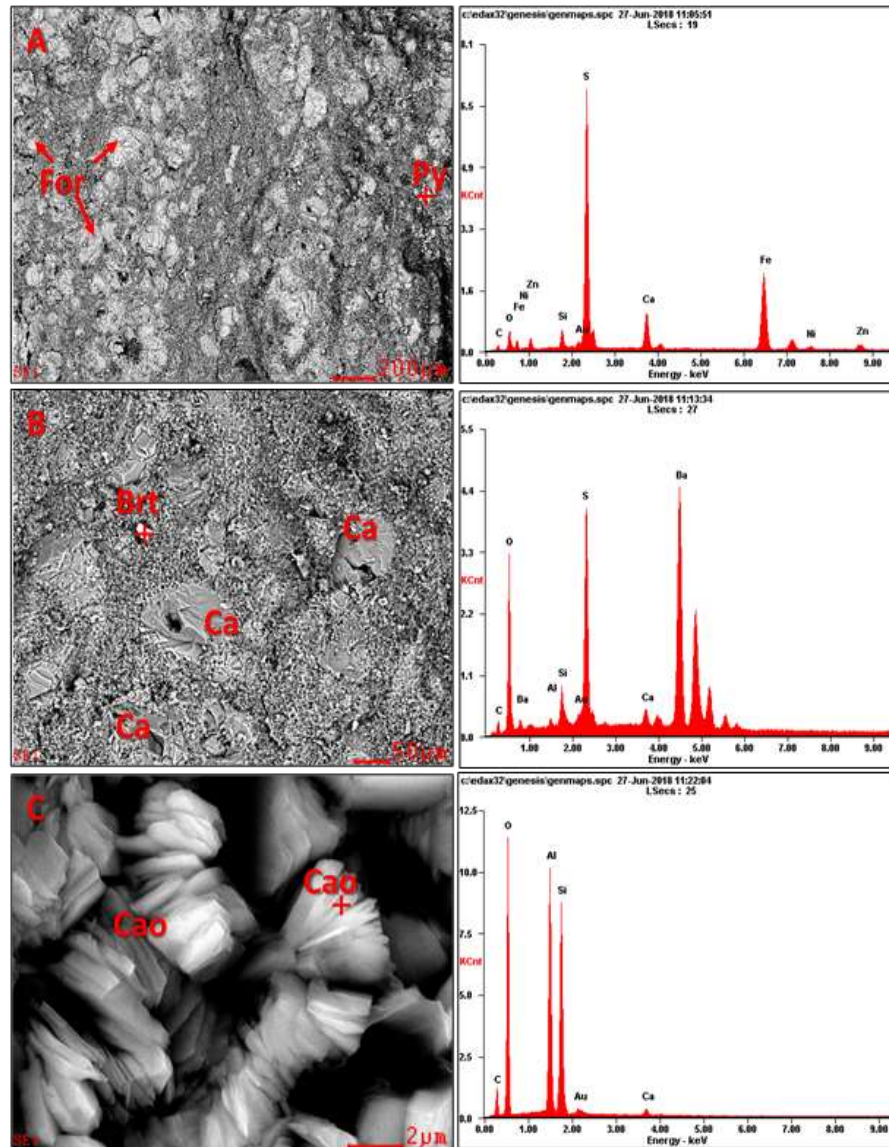


Figura 14. Morfología y espectros de dispersión de los minerales que componen la roca en la profundidad 10862 ft. A) Foraminíferos (For) rellenos de calcita (Ca) esparítica y pirita (Py). B) Barita y fragmentos de foraminíferos cementados con calcita. C) Caolinita (Cao) característica por su forma de libro pseudo-hexagonal.

6.3 Difracción de Rayos X (DRX)

El análisis de difracción de rayos X se realizó para las 8 muestras de roca que fueron seleccionadas para el SEM. Con la interpretación de los difractogramas se obtiene información detallada acerca de la estructura cristalográfica y mineralógica tanto de los minerales que componen la roca total como también los minerales arcillosos en la fracción arcilla (Apéndice D).

El análisis bulk o roca total muestra mineralogías representadas por el contenido de cuarzo entre el 36% y 86% y contenidos de carbonatos entre el 9% y 59% principalmente por calcita y en menor proporción calcita ferrosa. Se encuentran también minerales secundarios o minoritarios como minerales arcillosos (Tr- 17%) o filosilicatos, plagioclasas (Tr%) y en forma local barita (<5%) y pirita (<5%). “Otros” incluyen los compuestos que se encuentran en bajos contenidos y baja cristalinidad que no son identificados con facilidad (ver tabla 1).

Tabla 1.

Concentración relativa a nivel bulk, roca total.

Profundidad (ft)	Minerales arcillosos (filosilicatos)	Cuarzo	Feldespatos /plagioclasa	Carbonatos	Barita	Pirita	Otros
	%	%	%	%	%	%	%
10716´	13	73	ND	9	ND	ND	<5
10729´7	17	50	ND	23	ND	<5	<5
10788´	13	73	Tr	9	ND	Tr	<5
10859´	Tr	36	ND	59	ND	ND	<5
10862´4	Tr	86	ND	9	ND	ND	<5
10883´2	Tr	79	ND	16	ND	Tr	<5
10887´7	9	56	ND	25	<5	Tr	<5
10914´8	<5	60	ND	30	ND	ND	<5

Nota. ND: No detectado, Tr: <0,5% realizado por Ecopetrol S.A. (2018).

En la fracción menor de dos micras como muestra la tabla 2 y la figura 15, se identificó minerales arcillosos dados por illita (6-30%), interestratificados (5-42%) que corresponden

posiblemente a esmectitas alteradas a illitas y localmente clorita (21%) y caolinita (<5%). Otros minerales que presentan tamaño de grano a nivel de fracción menor de 2 micras identificados son el cuarzo, calcita, barita, plagioclasa y yeso microcristalino.

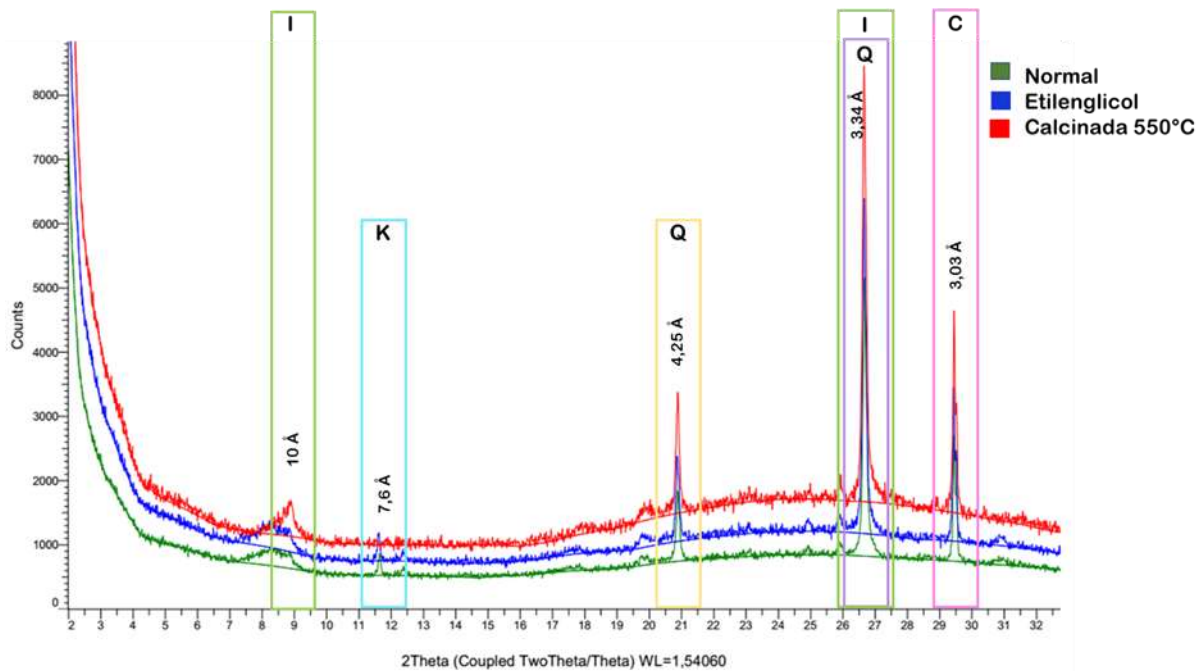


Figura 15. Difractogramas de la fracción arcilla de la muestra de roca en la profundidad 10729'. Picos representativos de caolinita (K), cuarzo (Q), illita (I) y calcita (C).

Tabla 2.

Concentración relativa a nivel de la fracción menor de 2 micras a partir de DRX.

Profundidad (ft)	Minerales Arcillosos				Cuarzo micro	Calcita micro	Barita micro	Plagioclasa micro	Yeso micro
	Interestratificados	Clorita	Illita	Caolinita					
10716'	18	ND	12	ND	54	16	ND	ND	ND
10729'7	25	ND	30	<5	30	5	ND	ND	<5
10788'	42	ND	6	ND	42	<5	ND	<5	ND
10859'	<5	ND	ND	ND	22	73	ND	ND	ND
10862'4	ND	ND	6	ND	67	22	<5	ND	ND
10883'2	ND	ND	8	ND	57	30	<5	ND	ND
10887'7	13	21	8	ND	34	19	<5	ND	ND
10914'8	11	ND	6	ND	47	36	ND	ND	ND

Nota. ND: No detectado, realizado por Ecopetrol S.A. (2018).

En resumen, la figura 16 representa la columna estratigráfica para el Miembro Galembo de la Formación La Luna, donde se evidencia las petrofacies identificadas de base a tope para cada muestra de roca y las gráficas revelan el comportamiento variante con respecto al contenido de aloquímicos, ortoquímicos, matriz, materia orgánica y porosidad que presentan las rocas (Apéndice E).

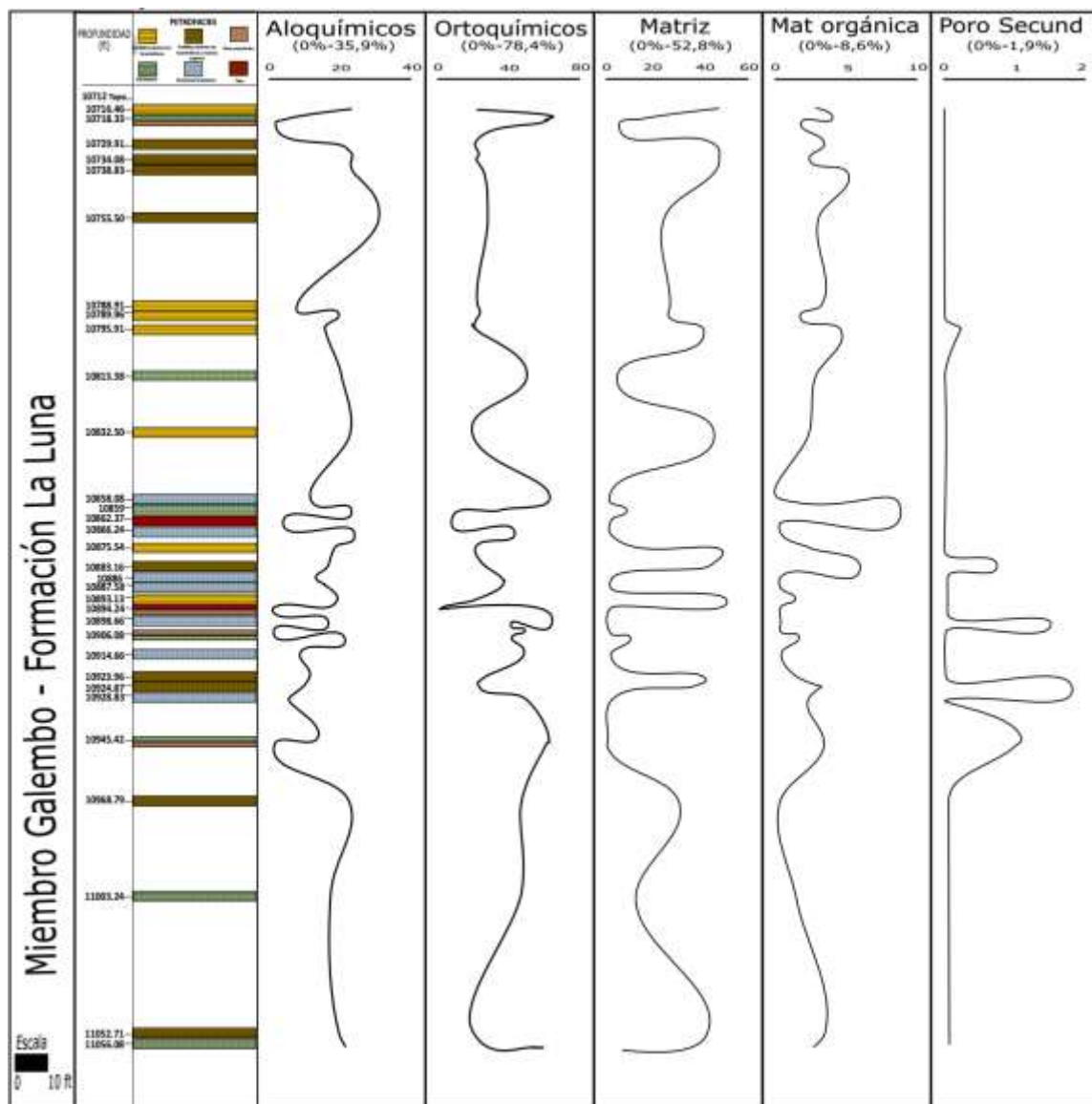
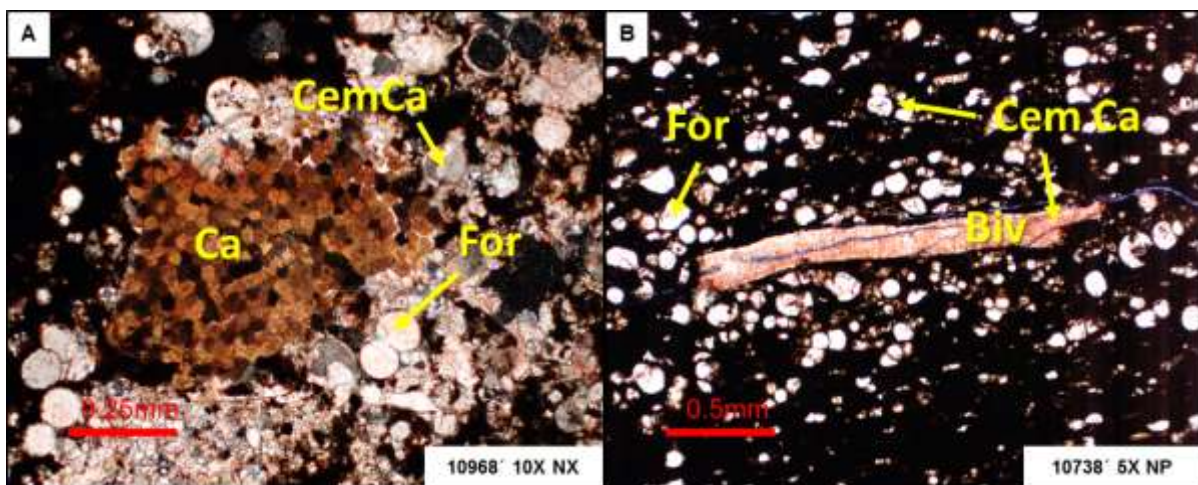


Figura 16. Columna estratigráfica para el Miembro Galembo de la Formación La Luna y las curvas revelan el comportamiento que presenta de base a techo con respecto al contenido de aloquímicos, ortoquímicos, matriz, materia orgánica y porosidad para cada muestra de roca.

6.4 Diagénesis

El estudio petrográfico de las muestras de roca permitió identificar varios procesos diagenéticos importantes que sufrieron los sedimentos durante las diagénesis: cementación, compactación, neomorfismo y disolución.

6.4.1 Cementación. Este proceso se evidenció en la mayoría de las muestras de roca analizadas, dado por la cementación de calcita esparítica en fósiles como foraminíferos, fragmentos de bivalvos, radiolarios y bioclastos indiferenciados. Cabe resaltar que se encontró cemento de calcita esparítica ferrosa rellenando las cámaras de los foraminíferos y localmente rellenando fracturas. Por otro lado, también se exhibe como cemento de calcita esparítica en forma de mosaico y fibrosa rellenando espacio poral y cavidades (ver figura 17).



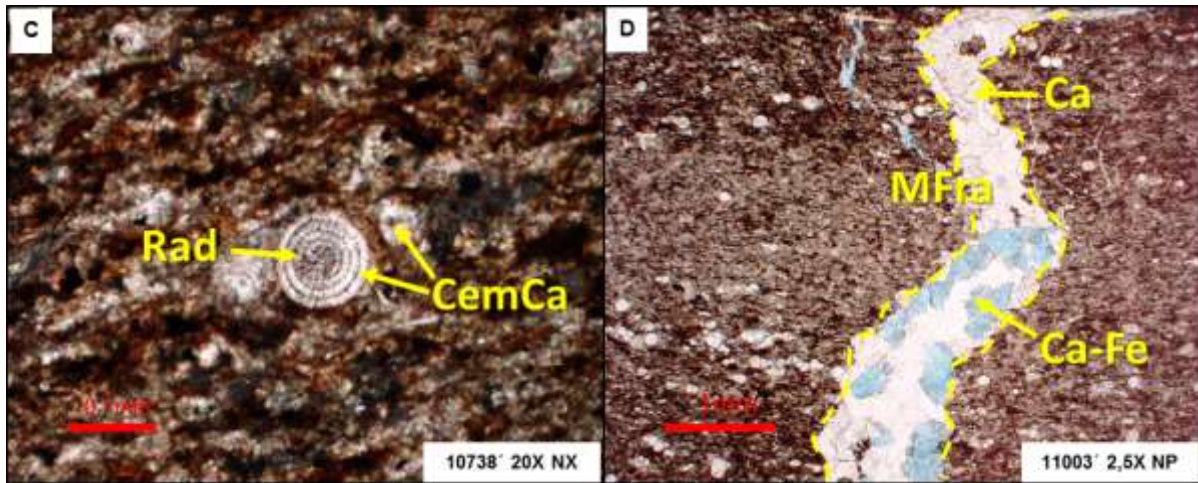
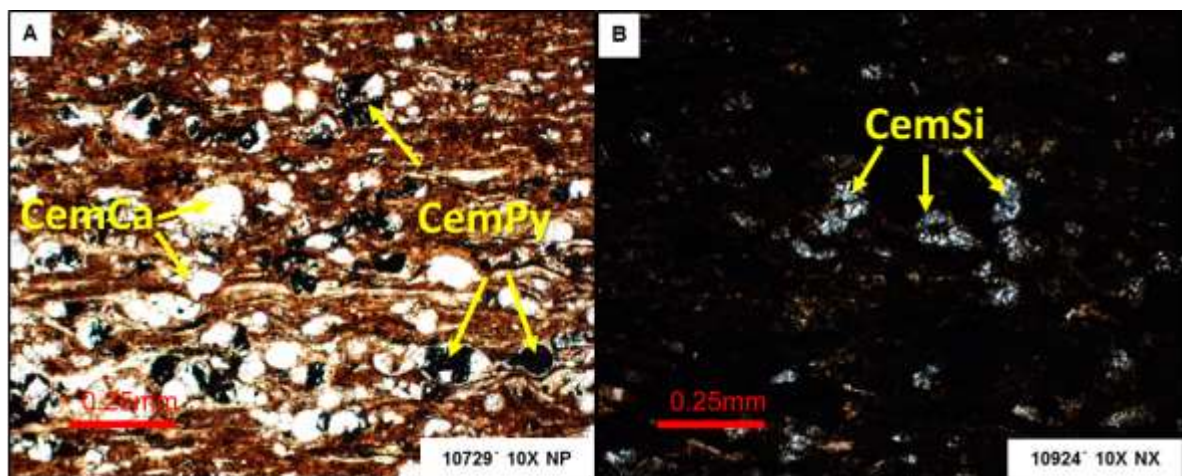


Figura 17. Procesos de cementación. A) Cemento de calcita esparítica (CemCa) en forma de mosaico. B) Foraminíferos (For) y fragmentos de bivalvos (Biv) cementados con calcita esparítica. C) Radiolarios (Rad) cementado con calcita esparítica. D) Microfracturas (MFra) rellenas de calcita esparítica ferrosa y no ferrosa.

Se presenta cementación de pirita, materia orgánica, sílice y arcilla del tipo caolinita y clorita rellenando las cámaras de los foraminíferos y bioclastos indiferenciados cementados parcialmente con siderita (ver figura 18).



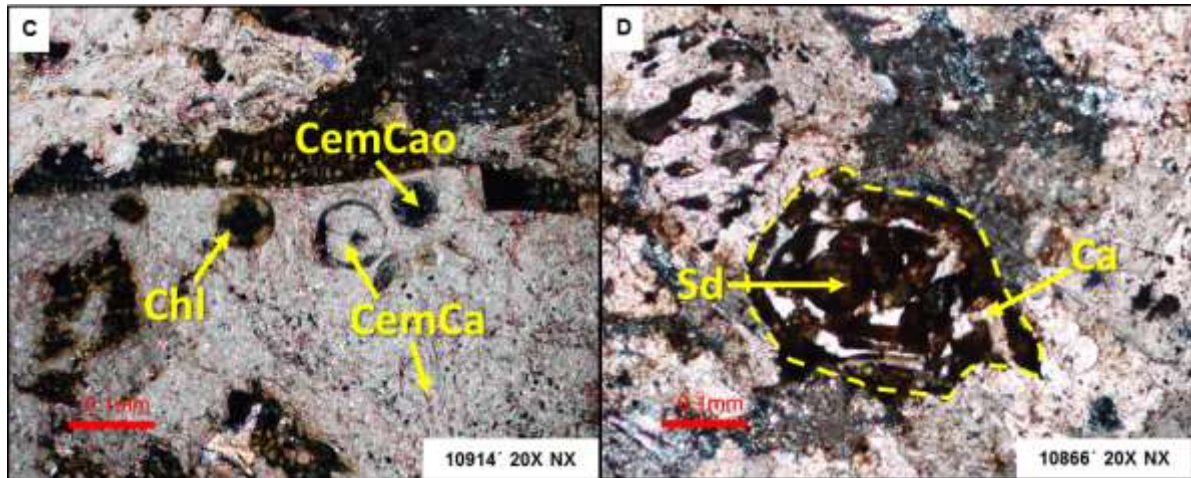


Figura 18. A) Foraminíferos cementados con piritita (Py). B) Foraminíferos cementados con sílice (Si). C) Foraminíferos cementados con caolinita (Cao) y los bordes clorita (Chl). D) Bioclastos cementado con calcita esparítica y parcialmente con siderita (Sd).

Otros minerales precipitantes fueron identificados como yeso, barita y fosfatos. Se presenta también como producto de la actividad biogénica madrigueras cementadas por cuarzo y otras están siendo rellenadas por calcita esparítica y cuarzo (ver figura 19).

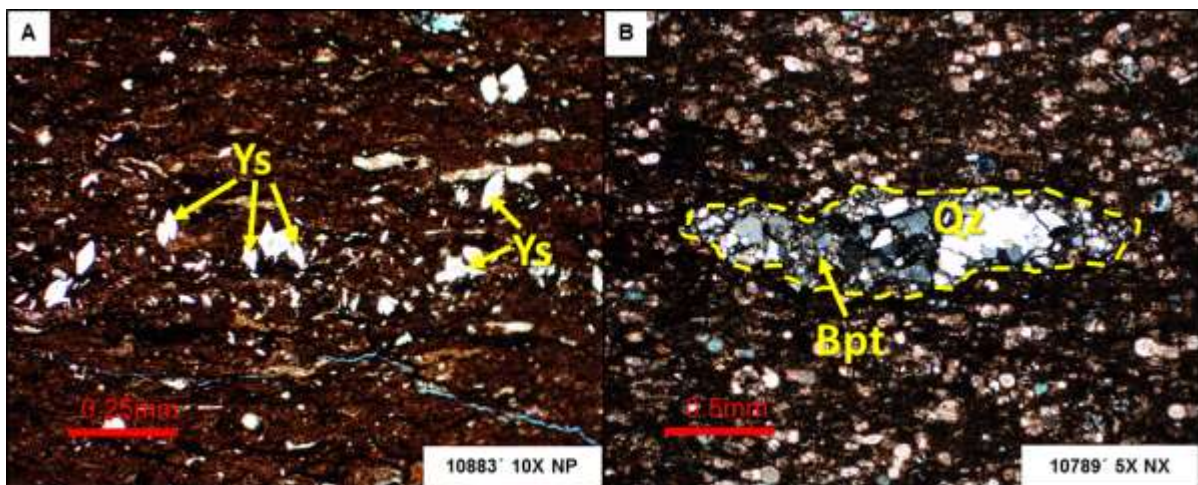


Figura 19. A) cementación de yeso (Ys) con forma rómbica. B) Bioperturbación (Bpt) caracterizada por madriguera rellena por cuarzo (Qz).

6.4.2 Compactación. Este proceso es producto de la presión litostática y se evidencia por la pérdida en general de la porosidad de la roca. El proceso de compactación trae consigo efectos de disolución, entre los cuales se puede resaltar superficies estilolíticas por presión de solución, generadas por los residuos de materiales insolubles como materia orgánica amorfa y minerales arcillosos como se puede ver en la figura 20.

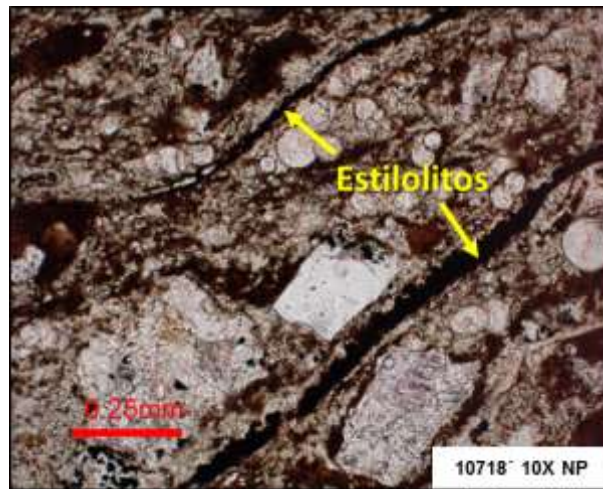


Figura 20. Superficies estilolíticas producidas por presión de solución.

6.4.3 Neomorfismo. Este proceso se presenta inicialmente en las cámaras de los foraminíferos y los fragmentos de conchas de bivalvos originalmente de aragonito, los cuales son reemplazados por calcita esparítica posiblemente baja en magnesio. Otro proceso relevante es la recristalización que también tuvo lugar a partir de la transformación de micrita a microesparita y localmente a pseudoesparita (ver figura 21).

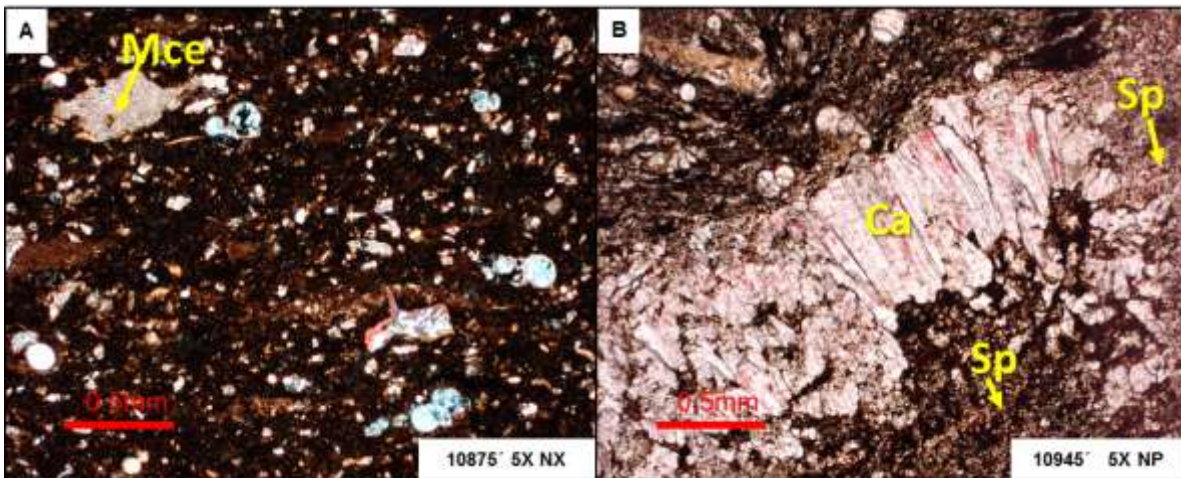


Figura 21. Recristalización de la Micrita. A) Microesparita (Mce). B) Pseudoesparita (Sp).

6.4.4. Disolución. Este proceso se presenta en la muestra de roca en la profundidad 10795' donde se observa una madriguera rellena en su exterior por cuarzo y en su interior por bitumen y cristales de calcita esparítica en disolución. De manera general en otras muestras de roca se observa la disolución parcial de cemento de calcita esparítica, favoreciendo la porosidad secundaria (ver figura 22).

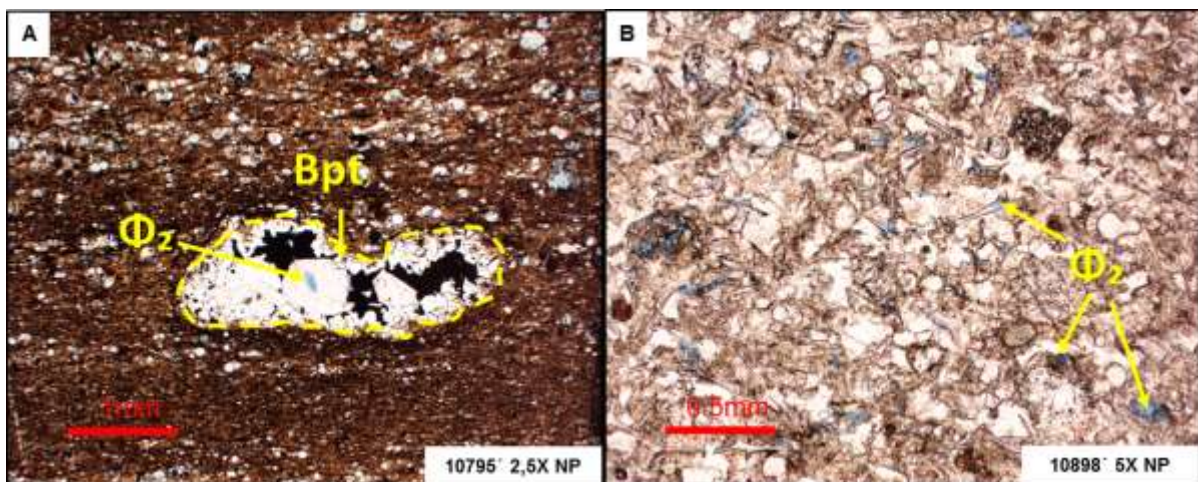


Figura 22. Procesos de disolución. A) Madriguera presenta en su interior disolución en los cristales de calcita esparítica. B) Disolución de cemento de calcita esparítica generando porosidad secundaria (Φ_2).

A continuación, se presenta la sucesión de eventos diagenéticos y su posición relativa en el tiempo, basándose en los datos adquiridos petrográficamente. Estos procesos son: bioperturbación, neomorfismo, cementación, compactación mecánica y química (estilolitos), fracturamiento, migración de hidrocarburos y disolución (ver tabla 3).

Tabla 3.

Sucesión de eventos diagenéticos del Miembro Galembó de la Formación La Luna en el pozo 1 en la cuenca VMM.

SECUENCIA DE EVENTOS DIAGENÉTICOS	DURACIÓN EN EL TIEMPO			
	Eogenética	Mesogenética Temprana	Mesogenética Tardía	Telogenética
Bioperturbación	■			
Precipitación pirita	■			
Neomorfismo de aragonito a calcita y recristalización de la micrita a microesparita	- - ■ - -			
Cementación de calcita no ferrosa y ferrosa	- - - - ■ - - -			■
Cementación de sílice		- - ■ - -		
Cementación de caolinita			■	
Cementación de clorita			■	
Precipitación de yeso			■	
Estilolitización			- - - -	
Fracturamiento				■
Migración de hidrocarburos			- - - - ■	
Disolución		■		■

7. Discusión

La diagénesis temprana o eogénesis incluye la alteración y degradación biogenética marcada por la bioperturbación, es decir, las actividades perforadoras de los organismos (Boggs, 2009). La pirita es también un mineral diagenético temprano común formado dentro de sedimentos ricos en

compuestos orgánicos en ambientes reductores superficiales o poca profundidad (Raiswell, 1982; Passier et al., 1997). La estrecha relación entre las piritas y los materiales orgánicos asociados a las muestras de roca implica que se formaron a partir de la reducción de sulfato bacteriano de los materiales orgánicos según lo descrito por Taylor y Macquaker (2000).

Por otro lado, el proceso de neomorfismo de aragonito a calcita que ocurre en la fase temprana de la diagénesis se evidencia en los fósiles como foraminíferos y fragmentos de conchas de bivalvos. El material compuesto de aragonito se reemplaza por calcita ya sea por la solución del aragonito para crear un vacío que posteriormente se llena con calcita o por un reemplazo del mineral directo. En el primer caso se pierde la estructura interna del fósil por completo, pero cuando el aragonito se transforma en calcita, se pueden conservar algunas reliquias de estructura interna original (Tucker, 2001). Los minerales menos estables como el aragonito experimentan al menos una disolución parcial en presencia de aguas frías y ricas en CO₂ en condiciones de latitudes altas y profundidades. En esta misma fase puede ocurrir la precipitación de calcita esparítica si las aguas se saturan con CaCO₃ (Boggs, 2009).

En la mesogénesis se da la precipitación de sílice por varios factores: la fuente de sílice puede generarse por el enriquecimiento en las aguas intersticiales de los sedimentos marinos principalmente por la disolución de organismos silíceos como radiolarios o diatomeas; de esta manera la sílice biogénica puede precipitar posteriormente (Schieber et al., 2000). Otro factor es la relación que hay entre la calcita y la sílice con el pH, a condiciones de aguas ácidas prevalece la disolución de la calcita y la precipitación de la sílice (Blatt et al., 1980 en Sandoval, 2000).

El hábito euhedral, pseudo-hexagonal de las laminillas de caolín es característico de los caolines formados en condiciones ácidas durante el entierro (De Ros y Scherer, 2012). La sustitución del feldespatos también se produce por el agua de poro de baja salinidad con CO₂

disuelto a partir de la fermentación bacteriana que lixivia el feldespato y lo transforma en caolinita mientras libera sílice (Dutton, 2008; Mansurbeg et al., 2012; Bjørlykke, 2014). La muy baja solubilidad del aluminio puede conducir a la precipitación *in situ* de caolinita. Los iones Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} y Mg^{2+} , liberados de la disolución de esmectita y caolinita, pueden reaccionar para formar clorita (Huggett, 2005).

La anhidrita es probablemente el cemento no carbonático más abundante producido en la diagénesis de enterramiento (Machel, 2005). Los cementos de anhidrita pueden formarse si el flujo de aguas intersticiales produce una mezcla de agua rica en SO_4^{2-} , con otra rica en Ca^{2+} (Jones y Xiao, 2005).

En el enterramiento profundo también puede generarse cementación de calcita ferrosa debido a que las aguas intersticiales profundas son típicamente reductoras (Hanor, 1994) y además pueden contener Fe^{2+} disuelto, por tanto, para que se formen calcita ferrosa el contenido de Fe^{2+} de las aguas intersticiales no tiene que ser muy alto, de hecho, si el contenido en Fe^{2+} del agua es muy alto se podría formar siderita (Rossi, 2010). Durante esta fase la presión de solución produce superficies estilolíticas que se desarrollan en carbonatos que contienen insolubles como minerales de arcilla y materia orgánica (Boggs, 2009).

A finales de la mesogénesis y principios de la telogénesis se generan fracturas producto de la exhumación. La migración de hidrocarburos rellena dichas fracturas, inhibiendo la precipitación de calcita. Por último, la disolución de carbonatos se atribuye a una migración de aguas ácidas previas a la migración de hidrocarburos, debiéndose su acidez al contenido en CO_2 y ácidos orgánicos procedentes de la maduración de la materia orgánica (Moore, 2001).

8. Conclusiones

La asociación de características composicionales y texturales de las muestras de roca a partir del análisis petrográfico permitió definir 6 petrofacies: arcillolita calcárea con foraminíferos, arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica, rocas ortoquímicas, Wackestone, Packstone y Grainstone con bioclastos y Tobas.

El análisis de microscopía electrónica de barrido para las petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos, petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica, la petrofacies Wackestone y la petrofacies Packstone y Grainstone con bioclastos presentan de manera general un contenido de minerales como pirita en forma tabular y framboidal, minerales arcillosos, calcita esparítica y micrítica, apatito, barita y materia orgánica. Solo en la petrofacies Packstone y Grainstone con Bioclastos se detectó esfalerita y caolinita.

Mediante el método de DRX se pudo determinar que las arcillas presentes en las petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos, petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica, la petrofacies Wackestone y la petrofacies Packstone y Grainstone con bioclastos son principalmente interestratificados de esmectita a illita, e illita. Localmente la petrofacies arcillolita calcárea con foraminíferos y materia orgánica presenta caolinita mientras la petrofacies Packstone y Grainstone con bioclastos clorita.

En el Miembro Galembo de la Formación la Luna se registran 12 eventos diagenéticos que modificaron las características originales de los sedimentos y que actuaron en la eogénesis, mesogénesis y telogénesis. La eogénesis o diagénesis temprana estuvo marcada por los procesos de bioperturbación, neomorfismo de aragonito a calcita en las conchas de los fósiles, precipitación de pirita, cementación de calcita y disolución de aragonito y calcita. La diagénesis

de entierro o mesogénesis estuvo regida por la estilolitización y cementación de calcita, caolinita y clorita, así como también precipitación de sílice y yeso. Por último, en la mesogénesis tardía e inicio de la telogénesis se produce un fracturamiento producto de la exhumación, migración de hidrocarburos y disolución.

La porosidad para el Miembro Galembó es muy baja debido a los procesos de compactación y cementación que sufrieron las rocas en las etapas diagenéticas. Así mismo, el principal mecanismo generador de porosidad secundaria presentado (0,5-1,8%) se da por la disolución de calcita y fracturamiento.

Las características mineralógicas presentes en las rocas del Miembro Galembó tienen potencial para producir HC; por una parte, presentan buenos contenidos de materia orgánica y por otra, hay presencia de minerales como cuarzo y calcita que le dan fragilidad a las rocas, condición necesaria para que sean fracturables y así configurar un yacimiento no convencional.

9. Recomendaciones

- Realizar estudios de catodoluminiscencia a cementos de carbonatos para discriminar los cementos antiguos de los jóvenes, de esta forma se podría precisar el estadio de la diagénesis en que precipitan cada carbonato. También esta técnica se puede practicar para diferenciar los cuarzos microcristalinos autigénicos de los detríticos.
- Realizar estudios de diagénesis en otros pozos para la Formación La Luna de tal forma que se puedan corroborar los resultados obtenidos en este proyecto de grado.

Referencias Bibliográficas

- Aldana, A. (27 de abril de 2018). La vida de reservas petroleras es de más de 1.659 millones de barriles para 7,1 años. *La República*. Recuperado de <https://www.larepublica.co>
- ANH (2011). *Potential Resources of Unconventional Hydrocarbons in Colombia*. Recuperado de <http://www.anh.gov.co>
- Bjørlykke, K. (2014). Relationships between depositional environments, burial history and rock properties: Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 301, 1–14.
- Boggs, S. (2009). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Caballero, V. (2010). *Evolución Tectono – Sedimentaria del Sinclinal de Nuevo Mundo, Cuenca sedimentaria Valle Medio del Magdalena Colombia, durante el Oligoceno – Mioceno* (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Clavijo, J., Mantilla, L., Pinto, J., Bernal, L., y Pérez, A. (2008). Evolución geológica de la Serranía de San Lucas, norte del Valle Medio del Magdalena y noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30(1), 45-62.
- Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martínez, J., Naar J., Peñas, R., Pulham, A., y Taborda, A. (1995). Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, 79(10), 1421-1443.

- Córdoba, F.; Rolón, L.; Buchelli, F.; & Suárez, M. (2000): Provincia Petrolífera del Valle Medio del Magdalena, Colombia. *VII Simposio Bolivariano: Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*. Memorias. Caracas, Venezuela.
- De Ros, L., y Scherer, C. (2012). Stratigraphic controls on the distribution of diagenetic processes, quality and heterogeneity of fluvial-aeolian reservoirs from the Recôncavo Basin, Brazil. En S. Morad, M. Ketzer, y L. De Ros (Ed.), *Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy* (pp. 105-132). Oxford, Reino Unido: Wiley-Blackwell.
- Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En: Ham, W.E (Ed.), *Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir* (pp. 108-121).
- Dutton, S.P. (2008). Calcite cement in Permian deep-water sandstones, Delaware Basin, west Texas: origin, distribution, and effect on reservoir properties. *AAPG Bulletin*, 92(6), 765–787.
- Ecopetrol S.A. (2018). *Análisis mineralógico por difracción de Rayos-X a muestras de corazón – Miembro Galembo, Pozo la Luna-1*.
- Folk, R. L. (1965). Some aspects of recrystallization in ancient limestones. En L. Pray, y R. Murray (Ed.), *Dolomitization and Limestone Diagenesis* (pp. 14-48), Toronto, Canada: SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Folk, R.L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Estados Unidos: Hemphill Publishing Co.
- Goldstein, R. & Rossi, C. (2002). Recrystallization in Quartz Overgrowths. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3), 432-440.

- Hanor, J. S. (1994): Origin of saline fluids in sedimentary basins. En J. Parnell (Ed.), *Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins* (pp. 151-174). Oxford, Reino Unido: Geological Society Special Publication.
- Hugget, J.M. (2005). Clays and Their Diagenesis. En Selley, R.C., Cocks, L.R.M., y Plimer, I.R. (Ed.), *Encyclopedia of Geology* (pp. 61-69). Amsterdam, Países Bajos: Elsevier Science Inc.
- James N., y Choquette, P. (1990). Limestone: the burial diagenetic environment. *Geological Association of Canada Reprint Series, 4*, 75-111.
- Jones, G.J., y Xiao, Y. (2005). Dolomitization, anhydrite cementation, and porosity evolution in a reflux system: Insights from reactive transport models. *AAPG Bulletin, 89(5)*, 577-601.
- Kingston, D., C. Dishroon, C., y Williams, P. (1983). Global basin classification system. *AAPG Bulletin, 67(12)*, 2175-2193.
- Machel, H.G. (2005). Investigations of Burial Diagenesis in Carbonate Hydrocarbon Reservoir Rocks. *Geoscience Canada, 32(3)*, 103-128.
- Mansurbeg, H., De Ros, L.F., Morad, S., Ketzer, J.M., El-Ghali, M.A.K., Caja, M.A., y Othman, R. (2012). Meteoric-water diagenesis in late Cretaceous canyon-fill turbidite reservoirs from the Espírito Santo Basin, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology, 37(1)*, 7–26.
- Mojica, J., y Franco, R. (1990). Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. *Geología Colombiana, 00(17)*, 41-64.
- Moore, C.H. (2001). *Carbonate Reservoirs, Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework*. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier Science Inc.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. Oxford, Reino Unido: Wiley-Blackwell.

- Passier, F.H., Middelburg, J., de Lange, G., y Böttcher, M. (1997). Pyrite contents, microtextures, and sulfur isotopes in relation to formation of the youngest eastern Mediterranean sapropel. *Geology*, 25(6), 519-522.
- Raiswell, R.A. (1982). Pyrite texture, isotopic composition, and the availability of iron. *American Journal of Science*, 282(8), 1244-1263.
- Rossi, C. (2010). Introducción a la diagénesis de las rocas carbonáticas. En A. Arche (Ed), *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenta sedimentaria* (pp. 1105-1182). Madrid, España: CSIC.
- Royero, M., y Clavijo, J. (2001). *Mapa Geológico generalizado departamento de Santander: Memoria Explicativa*. Bucaramanga, Colombia: Ingeominas.
- Sandoval, M. (2000). *Diagénesis de Arenisca*. Caracas, Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Sarmiento, L. (2011). *Petroleum Geology of Colombia: Middle Magdalena Basin*. Medellin, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Sarmiento, G., Puentes, J., y Sierra, C. (2015). Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. *Geología Norandina*, 12, 51-82.
- Schieber J., Krinsley D. & Riciputi L. (2000). Diagenetic origin of quartz silt in mudstones and implications for silica cycling. *Nature*, 406(6799), 981-985.
- Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments of the IUGS Subcommision on the Systematics of igneous Rocks. *Geology*, 9(1), 41-43.

- Scholle, P., y Ulmer-Scholle, D. (2003). *A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis*. Oklahoma, Estados Unidos: American Association of Petroleum Geologists.
- Servicio Geológico Colombiano y Google Earth (2015). Mapa Geológico de Colombia.
- Taylor, K., y Macquaker, J.H.S. (2000). Early diagenetic pyrite morphology in a mudstone-dominated succession: The Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation, eastern England. *Sedimentary Geology*, 131(1), 77-86.
- Tucker, M.E. (2001). *Sedimentary Petrology*. Oxford, Reino Unido: Blackwell Science.
- Tucker, M., y Wright, V. (1990). *Carbonate Sedimentology*. Oxford, Reino Unido: Blackwell Scientific.
- Welton, J.E. (2003). *SEM Petrology Atlas*. Tulsa, Estados Unidos: American Association of Petroleum Geologists.