

**ESTUDIO ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL PARA LA FORMACIÓN LA LUNA  
EN EL COSTADO ORIENTAL DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL  
MAGDALENA: UNA VISIÓN EXPLORATORIA DE HIDROCARBUROS NO  
CONVENCIONALES.**

**CARLOS ANDRES BALLESTEROS CAMARO**

**JOULIN ANYINETH PARRA MENDEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2012**

**ESTUDIO ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL PARA LA FORMACIÓN LA LUNA  
EN EL COSTADO ORIENTAL DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL  
MAGDALENA: UNA VISIÓN EXPLORATORIA DE HIDROCARBUROS NO  
CONVENCIONALES.**

**CARLOS ANDRES BALLESTEROS CAMARO**

**JOULIN ANYINETH PARRA MENDEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de geólogo**

**Director**

**M.Sc ALBERTO ORTIZ FERNANDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2012**

## **DEDICATORIA**

Agradezco primero a Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida, porque después de tantos esfuerzos y dedicación puedo gracias a él compartir este gran triunfo con los seres que más amo en mi vida.

Agradezco a mi Mamá, una mujer que a pesar de las dificultades me sacó adelante, gracias a ella por sus consejos y enseñanzas que solo una madre puede brindar tengo los valores para continuar en esta nueva etapa de mi vida.

A mi abuelita, mi Yolita (Q.E.P.D), a ella la principal de las dedicatorias y la más especial de todo corazón, mi bella Yolita que luchó hasta el final para poder verme en este punto de mi vida, pero hasta sus últimos días me dio su bendición y me prometió estar conmigo hasta el final y estar conmigo en todo momento como un angelito, mi angelito. A ella, que después de unos años y por el resto de mi vida la llevare en mi corazón. Te amo nonita.

A ti Abuelito!.. Que te debo todo lo que soy en este momento, porque me ayudaste en todo desde mi infancia hasta ahora, porque eres ese apoyo incondicional en mi vida, una persona que me enseñó y me seguirá enseñando muchas cosas para mi vida personal y profesional. Te quiero demasiado mi viejito.

A mi hermana, Paola que aunque me ha aguantado las buenas y las malas, pero sencillamente la quiero demasiado, gracias por tu apoyo incondicional.

A Sergio Navas y Angela Guerrero, mis mejores y grandes amigos que siempre estuvieron conmigo en todo. Se les quiere demasiado "Amorosos".

**CARLOS ANDRÉS**

A mi nonita Dulcelina, mi madre Cristina, hermanos Lou y Chris, tías Melany y Gloria, primos y tíos, razón para mejorar día a día y esforzarme a seguir preparándome profesionalmente.

A mi nonito Misael y tío Jesús (juntos Q.E.P.D).

A mis amigas de años: las 11 de 11, Sandris, Pao, Mayra, Alejandra, Chili, Yiya, Dianis, Karito, Laurita, Lau.

A mi amiga de siempre Laura C. Neira, por su sincera amistad.

A mis amigos (as) de canas y experiencias: Ángela Consuelo Calderón, Jaime Otoniel Ayala, Marco A. Rivero, Matilde Hernández, por su apoyo incondicional y enseñanzas.

A mis grandes amigos Juan Felipe Rojas, Edwin A. Serrano, Cristian Sastoque, Jhon, F. Lizcano, Juan P. Rojas, por tan sincera amistad, por sus expresiones de cariño, y sus oraciones elevadas al cielo.

A mis amigos de Conucos y de la pastoral: Pau, Elbis, Mafe, CamiBu, Cami y Cathe de Alba, Andre, Angelica, Caro, Andrés, Silviago, Marce, Tefa, Chiqui, Alf, JuanK, Lala, Nubia, Natha Serrano, Natha Esteban, Pili, Pipe, Mary, Pao y Kathe, JuliVuu, Negro, Karen, Dianita Machuca, Slendy, Mayito, Clau, Cony, Mao y Jeffy, Nesticor, Camilito, y amigos sacerdotes: Juan C. Ramírez, Mao Jaimes, Harvey y demás. Agentes de pastoral parroquia Divino Niño, a todos y todas las personas que me aprecian y me hacen feliz.

A los niños del Sem: Juan Fe, Chus, Edse, Sas, Andrew, Edwin Me, Dani, Joan, DiegoLu, Pampas, Carlitos Julio.

A la familia Calderón Silva, por tantos momentos felices compartidos.

A la familia Méndez Bravo, por su aprecio y cariño.

A la gran familia GEMS S.A, Don Pedro Parra, Doña Pau Gómez, Don Cesar Mora, Juan; Monito, MagdaLu, William, MayTe, Javi, Leito, Silvia, Pipe, Laurita, (Adri Acela, Jenny Wande), Alvarito, Dimel, Oswaldito, Leidicita, Oma, Esneider, Leo, Leonor, Gustavito, Mary, P. Walter, Janela, Irina, Jorgito, Erika, Adri Grimaldos, Dñ Yolanda, Liliana, Nancy, Alcirita, Fer, Anyi, Lili, Yadira, Gema & Mona; compañeros Bogotá: Alex, Diego, Gérman, Natha, Bibi, Mari, Martica, Ivancho, a todos por su acompañamiento en mi formación como profesional, sus enseñanzas, el buen sentido del humor y gran compañerismo.

***ANYINETH PARRA***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia en general por brindarme todo su apoyo para la realización de este proyecto y por todas las cosas buenas que vendrán.

A Anyineth, mi "compa" de tesis, porque desde un principio aparte de ser compañeros nos convertimos en grandes amigos. A ella mis más grandes deseos y bendiciones de su vida.

A mis amigos de universidad, a los "pajareros" como son Tatis mi gran amiga y compañera de universidad y que quiero demasiado, Silvia la pajarerita mayor, gran amiga de universidad y a la cual le agradezco su colaboración en mi proyecto, Ginita "La Zulaii" que me levanto el ánimo muchas veces, a mi Alicia "Mi Alixxx" que siempre con su "mmm" hacíamos reír a muchos...a todas ellas las quiero demasiado y agradezco muchas cosas de ellas, mis grandes compañeras de estudio y recocha.

Al Profesor y director de proyecto Alberto Ortiz, por confiar en nosotros y brindarnos su colaboración hasta el final y su paciencia en todo este proceso.

A todos los profesores de la Escuela de Geología por su entrega en cada día formar nueva gente de futuro con ética y valores, a todos ellos muchas gracias.

A la empresa GEMS S.A por permitirnos realizar nuestros análisis de muestras en sus laboratorios.

**CARLOS ANDRÉS**

A Dios en primer lugar, por permitir a su tiempo poder realizar nuestra tesis de grado, por su sabia voluntad y sus bendiciones recibidas en cada instante de mi vida.

A mi nonita (motor de mi vida), mi madre, tías, hermanos y demás familiares, motivo para superarme profesionalmente.

A mi compañero de tesis y amigo de carrera Carlos Ballestas, por su paciencia durante mi convalecencia, dedicación, voluntad y ahínco para desarrollar la tesis.

A mis amigos (as) y consejeros: Ángela Consuelo Calderón, Jaime Otoniel Ayala, Marco A. Rivero, Matilde Hernández, por su apoyo incondicional, interés e inquietud para sacar adelante la tesis.

A mis amigos (as): Laura C. Neira, Slendy Rueda (y su querida madre Dñ Claudia Duarte), Stephy Salcedo, Angélica Serrano, Silviago, Cathe de Alba, Dñ Rous, Dianita Parra, Juan F. Rojas, Juan C. Neira, Mayito, Alfred Rojas, Jhon F. Lizcano, Edwin A. Serrano, Cristian Sastoque y Andrés Álvarez, por su preocupación, interés y oraciones elevadas durante el desarrollo de la tesis y culminación de la misma.

A mis amigos y compañeros de estudio universitario: Silvia García, Margarita Mosquera, Ana Martínez, Aura Traslaviña, Eliana “La Rola” y Camilo Díaz, por su gran amistad y cariño y por compartir conmigo espacios de entretenimiento y de estudio en las salidas al campo.

A los profesores Jairo Clavijo, Luis Eduardo y Carlos García por su gran profesionalismo y carisma.

Al profesor Alberto Ortiz, director de tesis, por su aceptación, apoyo económico y ayuda.

A la gran familia GEMS S.A, jefes y empleados en Piedecuesta y Bogotá, por su cálida acogida, dadivosidad, afabilidad y respaldo para conmigo y la realización de mi trabajo de grado.

A los laboratorios GEMS S.A, Don Pedro Parra y técnicos, para el análisis de las muestras (por Fluorescencia de RX).

A todas las personas que con su ayuda y colaboración contribuyeron al avance y mejora de nuestra tesis de grado.

***ANYINETH PARRA***

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	24
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
2. OBJETIVOS	28
2.1 OBJETIVO GENERAL	28
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
3. GENERALIDADES	29
3.1 LOCALIZACIÓN	29
3.2 FISIOGRAFÍA Y CLIMA	31
4. METODOLOGÍA	32
4.1 BÚSQUEDA Y CLASIFICACIÓN DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO	32
4.2 ETAPA DE CAMPO	32
4.3 ETAPA DE LABORATORIO	33
4.3.1 Descripción petrográfica de muestras	33
4.3.2 Espectrometría de fluorescencia de rayos X	34
4.4 ETAPA DE OFICINA	35
4.5 INTERPRETACIÓN Y ELABORACIÓN DEL INFORME DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	35
5. ANTECEDENTES	36
6. MARCO GEOLÓGICO	37
7. MARCO ESTRATIGRÁFICO	40
7.1 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL	40
7.2 ESTRATIGRAFÍA DETALLADA	50
7.2.1 Sección Quebrada La Sorda Formación La Luna	50
7.2.1.1 Miembro Salada	51

7.2.1.2 Miembro Pujamana	56
7.2.1.3 Miembro Galembo	58
7.2.2 Sección Quebrada Agua Buena Formación La Luna	62
7.2.2.1 Miembro Salada	64
7.2.2.2 Miembro Pujamana	64
8. ANÁLISIS DE FACIES	66
8.1 DESCRIPCIÓN DE FACIES	68
8.1.1 Sección Quebrada La Sorda	68
8.1.1.1 Miembro Salada	68
8.1.1.2 Miembro Pujamana	71
8.1.1.3 Miembro Galembo	73
8.1.2 Sección Quebrada Agua Buena	77
9. DISTRIBUCIÓN DE FACIES DE LA FORMACIÓN LA LUNA	80
10. QUIMIOESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN LA LUNA	83
11. RESULTADOS	86
11.1 DEFINICIÓN DE CICLOS ESTRATIGRÁFICOS	89
11.2 ANÁLISIS ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA	91
11.3 ANÁLISIS DEPOSITACIONAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA	95
11.4 FORMACIÓN LA LUNA COMO ROCA GENERADORA DE HIDROCARBUROS: SU IMPORTANCIA EN LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA (VMM) Y LAS PERSPECTIVAS A FUTURO	97
CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS	112

## LISTADO DE FOTOGRAFIAS

	Pag.
Fotografía 1. Equipos utilizados. a). Estéreo-microscopio marca <i>Nikon Inc.</i> NI-150 modelo C-PS. b). Microscopio de luz transmitida marca <i>Nikon Eclipse E200/50PO</i> con cámara y pantalla incorporada.	33
Fotografía 2. Equipo espectrómetro de fluorescencia de RX. <i>Thermo Scientific Niton XL 3t Gold</i> .	34
Fotografía 3a. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Salada de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	51
Fotografía 3b. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Salada de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	52
Fotografía 3c. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Salada de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	52
Fotografía 4 .Caliza tipo <i>wackstone</i> con intercalaciones de niveles de <i>shale</i> calcáreo (Sh). Miembro Salada de la Formación La Luna.	53
Fotografía 5. Lodolita no calcárea. Miembro Salada de la Formación La Luna.	54
Fotografía 6. Caliza intercalada con lodolita no calcárea (Lod). Miembro Salada de la Formación La Luna.	55
Fotografía 7a. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Pujamana de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	56
Fotografía 7b. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Pujamana de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	57
Fotografía 7c. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Pujamana de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	57

Fotografía 8. Vista de afloramiento del Miembro Pujamana. Nódulos calcáreos en capas de <i>shale</i> calcáreo.	58
Fotografía 9a. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Galembo sección Quebrada La Sorda Formación La Luna.	59
Fotografía 9b. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Galembo sección Quebrada La Sorda Formación La Luna.	60
Fotografía 10. Intercalación de caliza laminada, <i>shale</i> calcáreo y arenisca fosfática. Miembro Galembo de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	61
Fotografía 11. Nódulo calcáreo presente en el Miembro Galembo de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	62
Fotografía 12. Panorámica de afloramiento georeferenciado. Miembro Salada de la Formación La Luna sección Quebrada Agua Buena.	64
Fotografía 13. Panorámica de afloramiento georeferenciado. Miembro Pujamana de la Formación La Luna sección Quebrada Agua Buena.	65
Fotografía 14. Sección delgada de la muestra CAAP-039: <i>shale</i> y lodolitas calcáreas laminadas ligeramente fosfáticas. Sección Quebrada La Sorda.	69
Fotografía 15. Sección delgada de la muestra CAAP-037: <i>wackstone</i> de foraminíferos pobremente laminado. Sección Quebrada La Sorda.	70
Fotografía 16. Facies lodolita gris físil. Miembro Salada Formación la Luna.	71
Fotografía 17. Sección delgada de la muestra CAAP-024: <i>shale</i> y lodolita calcárea laminada fosfática. Sección Quebrada La Sorda.	72
Fotografía 18. Sección delgada de la muestra CAAP-031: <i>wackstone-packstone</i> de foraminíferos y restos fósiles. Sección Quebrada La Sorda.	73
Fotografía 19. Facies Chert. Miembro Galembo de la Formación La Luna.	74
Fotografía 20. Sección delgada de la muestra CAAP-017: <i>packstone</i> fosfático. Sección Quebrada La Sorda.	75
Fotografía 21. Sección delgada muestra CAAP-007: <i>wackstone-packstone</i> ricos en fosfatos. Sección Quebrada La Sorda.	76

Fotografía 22. Sección delgada de la muestra CAAP-050: <i>wackstone-packstone</i> de foraminíferos y restos fósiles. Sección Quebrada Agua Buena.	78
Fotografía 23. Sección delgada de la muestra CAAP-054: <i>wackstone</i> de foraminíferos pobremente laminado. Sección Quebrada Agua Buena.	79

## LISTADO DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Localización del área de estudio.	30
Figura 2. Modelo de la evolución tectono estratigráfica de la Cordillera Oriental, Valle Medio del Magdalena y Llanos Orientales. Tomado de Cooper et. al., 1995.	39
Figura 3: Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.	42
Figura 4: Columna estratigráfica de la Formación La Luna. Miembros: Salada, Pujamana y Galembo.	45
Figura 5. Localización de la sección Quebrada La Sorda.	50
Figura 6. Localización de la sección Quebrada Agua Buena.	63
Figura 7. Porcentaje de facies Miembro Galembo sección Quebrada La Sorda Formación la Luna.	80
Figura 8. Porcentaje de facies Miembro Pujamana sección Quebrada La Sorda Formación la Luna.	81
Figura 9. Porcentaje de facies Miembro Salada sección Quebrada La Sorda Formación la Luna.	81
Figura 10. Distribución facial de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.	82
Figura 11. Representación de un ciclo estratigráfico y su equivalencia con la terminología de Van Wagoner et al. (1988).	88
Figura 12. Proporción entre parámetros químicos Mn, Sr/Cr, secuencias estratigráficas y ciclos del nivel del mar. Modelo por Haq et al., (1988) en Mabrouk et al. (2007).	90

Figura 13. Modelo estratigráfico representativo del sistema de secuencias asociado a la Formación La Luna en la sección Quebrada La Sorda, integrando la información sedimentológica (textura y composición) y quimioestratigráfica (Mn, Sr/Ca, Si/Al y Ti/Al).

94

Figura 14. Ambiente de depositación de la Formación La Luna. Modificado de Handford (AAPG, 1993) en Esparza, E. & Pineda, E. (1999).

96

## LISTADO DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Litofacies de la Formación La Luna en la sección Quebrada La Sorda.	66
Tabla 2. Clasificación de rocas carbonáticas según Dunham (1962).	67
Tabla 3. Composición química y relación de elementos mayores de las muestras analizadas con fluorescencia de rayos X en las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena Formación La Luna.	84
Tabla 4. Elementos traza de uranio, torio y vanadio de las muestras analizadas con fluorescencia de rayos X en las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena Formación La Luna.	85
Tabla 5. Terminología, duración y jerarquía de ciclos o secuencias. Modificado de Kerans y Tinker (1997).	87

## LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Catálogo de muestras de la Formación La Luna en las secciones Quebrada la sorda y Quebrada Agua Buena.

Anexo B. Modelo estratigráfico secuencial de la Formación La Luna en la sección Quebrada La Sorda.

Anexo C. Modelo estratigráfico secuencial de la Formación La Luna en la sección Quebrada Agua Buena.

Anexo D. Poligonal sección Quebrada La Sorda de la Formación La Luna.

Anexo E. Poligonal sección Quebrada Agua Buena de la Formación La Luna.

Anexo F. Correlación Litoestratigráfica para las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena en la Formación La luna.

Anexo G. Datos químicos para las muestras de las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena en la Formación La Luna.

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL PARA LA FORMACIÓN LA LUNA EN EL COSTADO ORIENTAL DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA: UNA VISIÓN EXPLORATORIA DE HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES\*

**AUTORES:** BALLESTEROS CAMARO, Carlos Andrés  
PARRA MENDEZ, Joulin Anyineth\*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Este trabajo se centró en el estudio sedimentológico y estratigráfico de la Formación La Luna en las zonas de las Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena en el costado oriental de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), Colombia.

La Formación La Luna está conformada por facies litológicas ricas en carbonatos: calizas (tipo *wackstones* y *packstones*), *shales* y lodolitas calcáreas fosilíferas y arenas fosfáticas fosilíferas (en menor proporción al tope de la secuencia: Miembro Galembo).

La aplicación de la metodología de Análisis Secuencial para el Cretácico Superior en la Formación La Luna en la cuenca del VMM, permitió reconocer nueve secuencias y sus sistemas encadenados, correspondientes a los sedimentos depositados durante ascensos y descensos relativos del nivel del mar. La arquitectura secuencial de la Formación La Luna, se logró definir aplicando los conceptos de estratigrafía secuencial sobre datos quimioestratigráficos, para esto se tomaron en consideración principalmente el contenido de elementos mayores y trazas.

Estos conceptos fueron aplicados sobre una secuencia de carbonatos depositados en aguas estratificadas con fondos anóxicos como son los pertenecientes a la Formación La Luna, aflorante en la cuenca del VMM, para así lograr un modelo depositacional y un aporte en la identificación de zonas de interés petrolífero permitiendo generar nuevas oportunidades exploratorias para la búsqueda de hidrocarburos no convencionales en facies finas.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Físicoquímicas, Escuela de Geología, UIS. Director: Alberto Ortiz.

## ABSTRACT

**TITLE:** SEQUENTIAL STRATIGRAPHIC STUDY FOR LA LUNA FORMATION ON THE EASTERN SIDE OF THE MIDDLE MAGDALENA VALLEY BASIN: AN EXPLORATORY VIEW OF NON-CONVENTIONAL HYDROCARBONS\*

**AUTHORS:** BALLESTEROS CAMARO, Carlos Andrés  
PARRA MENDEZ, Joulin Anyineth\*\*

### KEYWORDS:

This document focused the sedimentological and stratigraphic study of the La Luna formation in areas of the La Sorda Creek and Agua Buena Creek on the eastern side of the Middle Magdalena valley basin (MMV), Colombia.

La Luna formation is composed of carbonate-rich lithological facies: limestones (a kind of wackstones and packstones), fossiliferous calcareous shale and mudstone and fossiliferous phosphatic sands (in smaller proportion at the top of the sequence: Galembo member).

The application of the methodology of sequential analysis to the Cretaceous, in the MMV basin on the La Luna Formation, allowed recognizing nine sequences and their systems tracks, which correspond to the sediments deposited during promotions and relative drops in the sea level. The sequential architecture of La Luna Formation was achieved by the application of the sequential stratigraphy concepts with chemostratigraphic data, whereby, they were taken into consideration the major and trace elements.

These concepts were applied to a sequence of carbonates deposited in laminated waters with anoxic bottom like those that belong to the La Luna Formation, which appear on the basin of the MMV, to achieve a depositional model and a contribution to the identification of interesting oil-bearing areas that allows to generate new exploratory opportunities for searching non-conventional hydrocarbons in fine facies.

---

\*Thesis of grade

\*\* Faculty of Physicochemical Engineerings, School of Geology, UIS. Director: Alberto Ortiz.

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los resultados de los estudios sedimentológicos realizados sobre la sucesión carbonática de la Formación La Luna, a la cual se le asigna una edad cretácica. El área de estudio se encuentra en las secciones de la Formación La Luna, Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena en el costado oriental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), Departamento de Santander.

La Formación La Luna es ampliamente reconocida como roca fuente por excelencia de hidrocarburos en Colombia. Su origen se encuentra asociado a condiciones ambientales deposicionales anóxicas que prevalecieron durante el Cretácico, y que pueden ser correlacionadas con otras regiones del mundo. Es el objetivo de este estudio, mediante la técnica de análisis de estratigrafía de secuencias y quimioestratigrafía (análisis de elementos mayores, menores y trazas), identificar las posibles variaciones del nivel del mar (y sus tractos sedimentarios) que pudieron haber incidido en la deposición de sedimentos anóxicos (*shales* y calizas oscuras) de la Formación La Luna.

Mediante el muestreo detallado realizado en las dos secciones, se elaboraron láminas delgadas de las litofacies principales para describirlas petrográficamente y correlacionar facialmente las secciones de estudio. Aplicando técnicas como microscopía de luz polarizada y parámetros quimioestratigráficos se evaluó los diferentes procesos diagenéticos asociados a los carbonatos de la Formación la Luna.

Para cumplir con estos objetivos se estudiarán dos secciones de la Formación La Luna (Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena), mejorando el conocimiento

acerca de las facies generadoras en la Cuenca del VMM para generar nuevas estrategias exploratorias y posibilidades de hallazgo de nuevas reservas.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los estudios de estratigrafía de secuencias aplicando técnicas de quimioestratigrafía realizados a la Formación La Luna en el sector de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) aunque limitados, pueden contribuir a la exploración de hidrocarburos no convencionales de tipo *gas-shale*. En los últimos años ha venido creciendo el interés y el aumento del uso de estos conceptos para resolver problemas de exploración y producción dentro de la industria petrolera. Dichos estudios han arrojado buenos resultados en cuanto a la evaluación de hidrocarburos en facies carbonáticas, permitiendo acceder a información que anteriormente no se obtenía sino a través de métodos convencionales. Se pretende con este proyecto de investigación utilizar la estratigrafía de secuencias a nivel del campo como herramienta para definir un modelo deposicional en detalle teniendo en cuenta un análisis facial, con el fin de definir la calidad y posibilidad de la Formación La Luna de generar hidrocarburos no convencionales en facies finas.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se pretende estudiar:

1. La estratigrafía y sedimentología detallada de la Formación La Luna elaborando columnas estratigráficas e identificando rasgos característicos como límites de secuencias, superficies de inundación y secciones condensadas.
2. La estratigrafía de secuencias de la Formación La Luna en las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena en el flanco oriental de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

3. Elaboración de un catálogo de muestras representativas de la Formación La Luna en el área de estudio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

El principal objetivo de este trabajo es efectuar un análisis de facies y sistemas depositacionales de las rocas sedimentarias de la Formación La Luna, para finalmente analizar su evolución dentro del contexto de estratigrafía secuencial, aplicado a la exploración de hidrocarburos no convencionales.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Levantar dos columnas estratigráficas de detalle, a escala 1:200 de las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena de la Formación La Luna.
- Correlacionar las secciones estratigráficas para determinar continuidad facial en la zona de estudio.
- Elaborar un catálogo de muestras de las secciones levantadas en campo.
- Realizar un análisis de facies mediante descripción macro y microscópica de muestras de la Formación La Luna con el fin de conocer los ambientes sedimentarios donde se depositaron tales sedimentos.
- Generar un modelo estratigráfico secuencial relacionando los datos obtenidos mediante el análisis de facies y composición química de elementos mayores, menores y trazas.

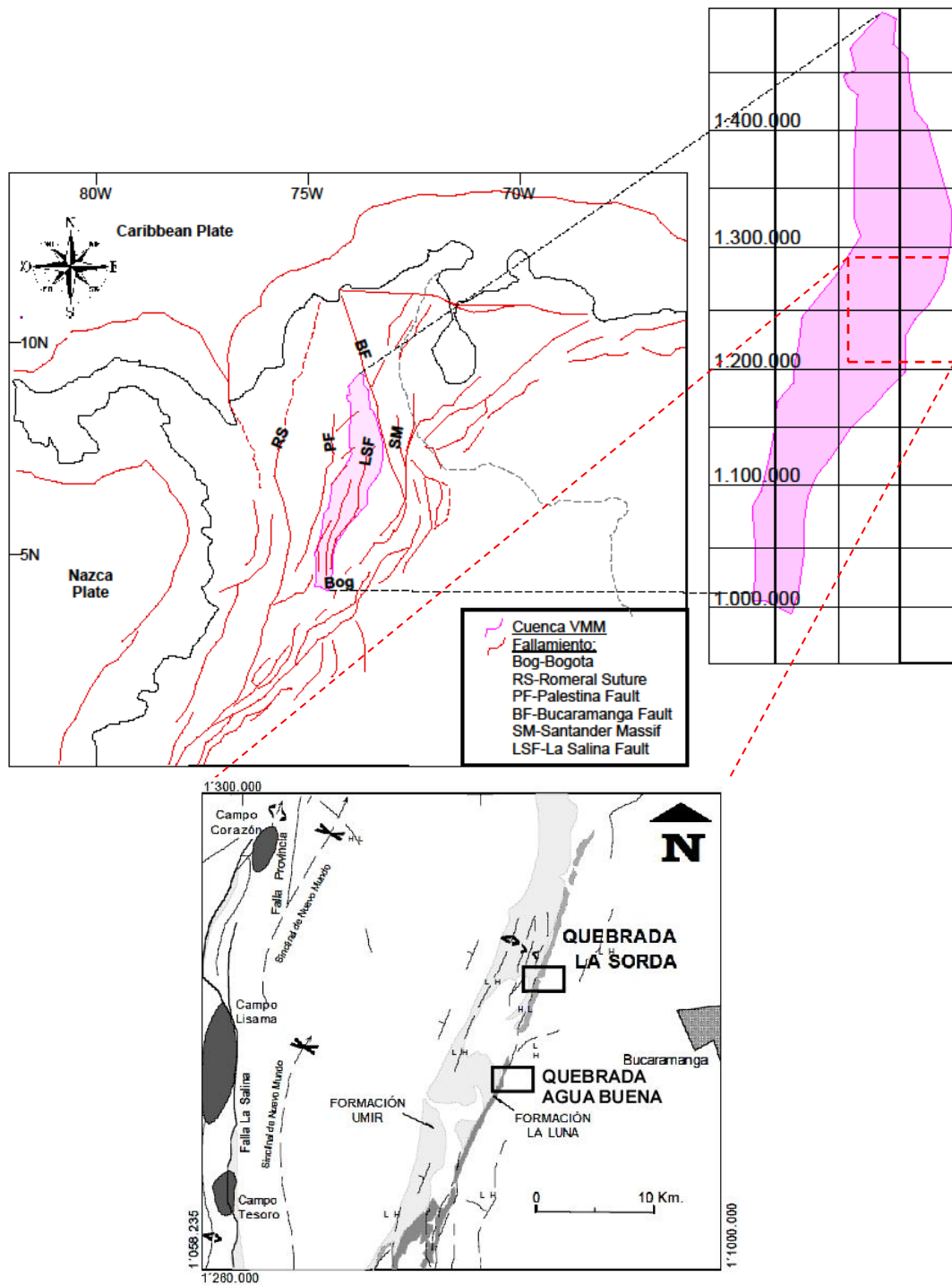
### **3. GENERALIDADES**

#### **3.1 LOCALIZACIÓN**

El área de estudio de este proyecto se encuentra ubicada en el municipio de Lebrija, Santander, comprendida entre la Quebrada La Sorda con punto de inicio X: 1.085.748; Y: 1.284.870 y Quebrada Agua Buena con punto de inicio X: 1.082.915; Y: 1.276.277. Los anteriores datos tienen su origen de coordenadas en Bogotá D.C. La figura 1 muestra la ubicación del área del estudio dentro de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

El acceso a la sección Quebrada la Sorda se hace por la vía principal Bucaramanga - Barrancabermeja, en el sitio denominado La Azufrada a 21 kilómetros (km) al occidente de la ciudad de Bucaramanga, se toma el desvío por la antigua carretera que conduce al municipio de Sabana de Torres la cual se intercepta con la Quebrada la Sorda a 2.1 km. del desvío antes mencionado a la altura de la Hacienda la Sorda. La sección Quebrada Agua Buena se encuentra en la vía que comunica a la ciudad de Bucaramanga con el municipio de San Vicente de Chucuri, aproximadamente a 8 km. del desvío en la Renta.

Figura 1. Localización del área de estudio.



Fuente: Rolon, L. 2004. Y Rangel, A. et al. 2000.

### **3.2 FISIOGRAFÍA Y CLIMA**

El área de estudio se encuentra fisiográficamente ubicada en el costado occidental de la Cordillera Oriental, entre el piedemonte y el Valle Medio del Magdalena, la cual presenta terrenos en el valle intermontano (aluvión y diluvial) y zonas de mesa, controlados principalmente por la variedad de fisiografías, litologías y sistemas hidrográficos. La mesa de Lebrija se divide en mesa y escarpe de Lebrija; además de una pequeña parte que se localiza en el piedemonte de la cordillera Oriental en límites con el valle del Magdalena Medio; la zona de estudio es montañosa y de pendientes suaves a moderadas, con una temperatura que varía entre 20 y 25 °C. (Centro de Estudios Regionales-UIS, 2009).

## 4. METODOLOGÍA

El procedimiento que se siguió para desarrollar este trabajo y cumplir los objetivos propuestos se divide en las siguientes etapas:

### 4.1 Búsqueda y clasificación de material bibliográfico

En la primera fase de este trabajo se procedió a revisar toda la información bibliográfica sobre el área de estudio: mapas geológicos y memoria explicativa del cuadrángulo H-12 Bucaramanga del Ingeominas, descripciones petrográficas de las rocas estudiadas (composición, diagénesis, procedencia) de trabajos previos de la región. Además se consultaron trabajos específicos sobre quimioestratigrafía y estratigrafía secuencial, dicho material se obtuvo de la biblioteca de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, biblioteca del ICP (Instituto Colombiano de Petróleo) y artículos descargados de internet, entre otras fuentes.

### 4.2 Etapa de campo

Se realizó un *scouting* de un día, seguido de una comisión de 14 días en diciembre de 2011, durante la cual se levantaron dos columnas detalladas a escala 1:200 dentro de la Formación La Luna en las dos secciones de estudio, haciendo particular énfasis en la litología aflorante, estructuras sedimentarias, contactos, espesores y geometría. Se tomaron un total de 56 muestras de roca, de las cuales se realizaron ocho secciones delgadas, fotografías, toma de datos estructurales y posición geográfica utilizando brújula y sistema de posicionamiento global (GPS por sus iniciales en inglés). Así mismo se realizó las respectivas poligonales de las secciones a escala 1: 1000 plasmando la información obtenida en el campo.

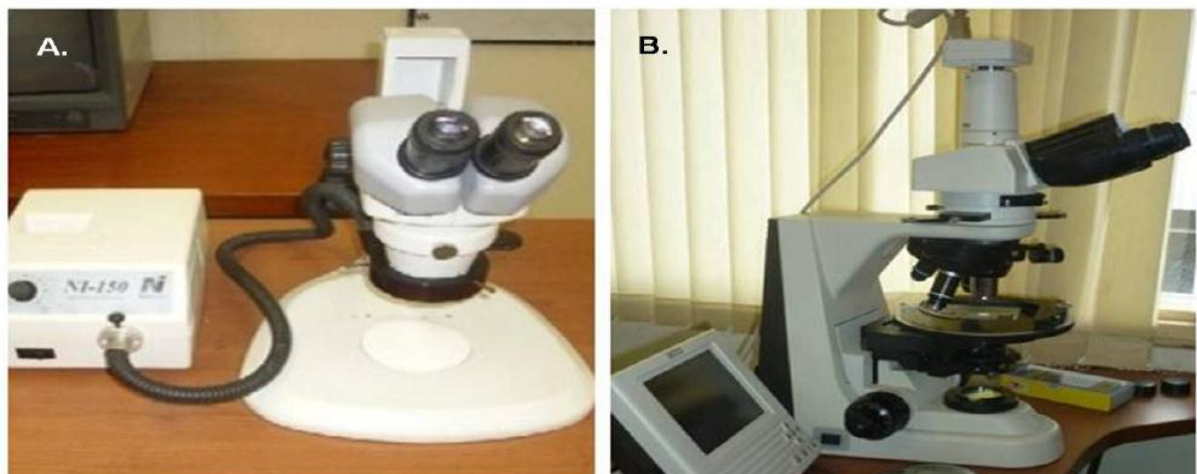
### 4.3 Etapa de Laboratorio

#### 4.3.1 Descripción petrográfica de muestras

Se realizaron descripciones macroscópicas en el laboratorio de lupas de la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander utilizando un estéreo-microscopio marca *Nikon Inc.* NI-150 modelo C-PS (Fotografía 2a). Así mismo se elaboraron 8 secciones delgadas para análisis petrográficos utilizando un microscopio de luz transmitida marca *Nikon Eclipse E200/50PO* con cámara y pantalla incorporada (Fotografía 2b).

La descripción y clasificación de muestras de mano y sección delgada se llevó a cabo siguiendo la metodología para la clasificación de rocas calcáreas de Dunham (1978). Los resultados son reportados en el anexo A. El análisis del registro fósil presente en las muestras se llevó a cabo con base en la metodología propuesta por Cruz (1991) con el fin de hacer una aproximación al ambiente en el cual pudo haberse depositado la materia orgánica de la Formación La Luna.

Fotografía 1. Equipos utilizados. a). Estéreo-microscopio marca *Nikon Inc.* NI-150 modelo C-PS. b). Microscopio de luz transmitida marca *Nikon Eclipse E200/50PO* con cámara y pantalla incorporada.



### 4.3.2 Espectrometría de fluorescencia de rayos X

Los análisis de rayos X se realizaron para conocer la composición química de los *shales* y calizas de la Formación La Luna. Estos análisis se se realizaron en un analizador XRF portátiles (*Thermo scientific Niton XL 3t gold*) (Fotografía 2), del Laboratorio de geoquímica de GEMS S.A.

Fotografía 2. Equipo Espectrómetro de Fluorescencia de RX. *Thermo Scientific Niton XL 3t Gold*.



Las lecturas de rayos X se realizaron en 45 muestras de la Formación La Luna en la sección Quebrada la Sorda y 9 muestras de la sección Quebrada Agua Buena, las cuales no se tomaron a distancias constantes desde del tope hasta la base de la formación sino en cada punto de control del levantamiento estratigráfico. Cada lectura se programó con una duración de 3 minutos, donde las unidades de medición están dadas en partes por millón (ppm).

#### **4.4 Etapa de oficina**

Se definieron todas las litofacies presentes en la zona de estudio. Las litofacies fueron diferenciadas sobre la base de su litología, rasgos texturales, estructuras y contactos entre capas. Todos estos datos fueron obtenidos del análisis en campo y luego complementados con las descripciones de los cortes petrográficos.

La interpretación de las litofacies se ha realizado sobre la base de los criterios genéticos propuestos por Gonzales, D. & Sánchez, C. (1999) y Rangel, A. et al. (2000), aunque se han realizado ajustes de acuerdo con las observaciones efectuadas en la zona de estudio.

#### **4.4 Interpretación y elaboración del informe de los resultados obtenidos**

Después de la etapa de campo, laboratorio y oficina se inició el desarrollo de la interpretación de los datos obtenidos de las muestras de la zona de estudio para la edición del informe final del trabajo de grado que incluye la elaboración del catálogo de muestras.

## 5. ANTECEDENTES

El pionero en publicaciones de información geológica sobre la Formación la Luna fue Garner (1926), el cual le dio este nombre para designar una secuencia de limolitas de colores negro y gris oscuro laminadas y *shales* calcáreos expuestos en la Quebrada la Luna en la Serranía de Perijá. Renz (1959), subdividió la formación en tres miembros que están expuestos en el Occidente y Sur-Occidente de la Cuenca de Maracaibo, estos son: El inferior, Miembro La Aguada (calizas densas de color gris oscuro con concreciones); el medio, Miembro Chejendé (*shales* negros y margas); y el Superior, Miembro Timbetes (calizas laminadas con concreciones). En Colombia Notestein et al. (1944) introdujo por primera vez el nombre de Formación La Luna de manera adecuada, por medio de los estudios realizados en la Concesión Barco, en la cuenca del Catatumbo. Posteriormente Morales (1958) amplió este término en la descripción de los depósitos de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, quien la dividió en tres miembros en orden ascendente: Salada, Pujamana y Galembo, en el área donde el Río Sogamoso corta la unidad. Zumberge (1984) determinó el espesor de la formación entre 150 y 600 metros, describiéndola litológicamente como *shale* calcáreo negro a gris oscuro, interestratificado con lodolitas y algunos niveles de chert con abundante presencia de foraminíferos calcáreos planctónicos y otros organismos pelágicos. Talukdar (1985) describe esta unidad como la mayor roca fuente de hidrocarburos en Venezuela, Colombia y posiblemente del mundo afirmando que es necesario tener un completo conocimiento sobre la misma que facilite su comprensión y posterior aprovechamiento en miras de mejorar las condiciones económicas, sociales y científicas del país.

## 6. MARCO GEOLOGICO

Las secciones estratigráficas están localizadas en el flanco oriental de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), a 21 kilómetros al occidente de la ciudad de Bucaramanga en las secciones Quebrada la Sorda y Quebrada Agua Buena en el Departamento de Santander, Colombia. La columna estratigráfica generalizada del VMM (Esparza, E. & Pineda, E., 1999) se puede apreciar en la figura 3, que consta esencialmente de areniscas fluviales de edad jurásica, calizas y *shales* de ambientes de plataforma somera a pantanos de edad cretácica y rocas sedimentarias de origen aluvial depositadas durante el terciario.

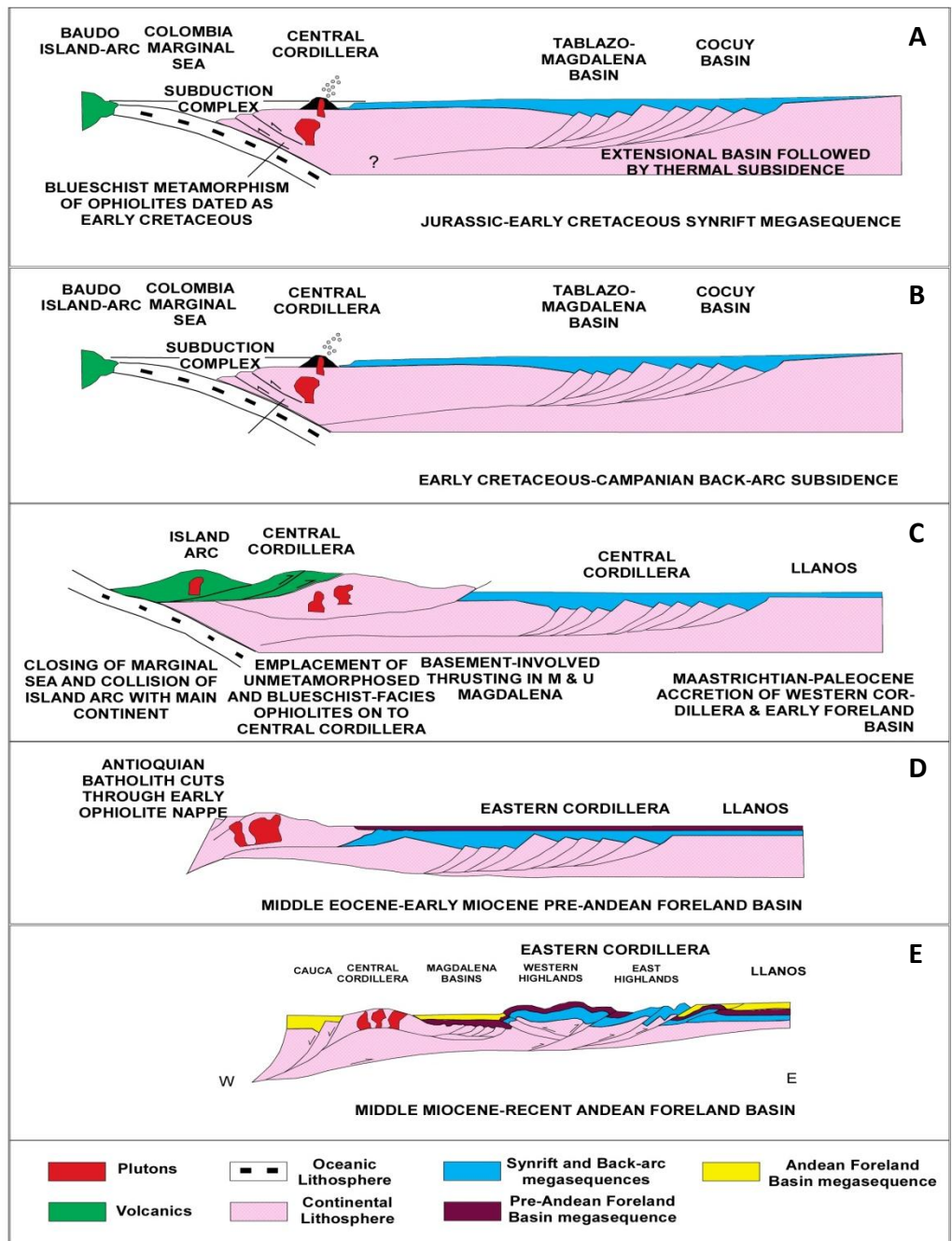
La Cuenca del Valle Medio del Magdalena es una depresión alargada, de geometría angosta en la parte sur, con dirección NE-SW. Separa las cordilleras Oriental y Central y tiene un ancho máximo aproximado de 80 Km. Y una longitud de unos 500 Km. Su área es de aprox. 28.500 Km<sup>2</sup>. Carvajal, H. (2004).

La evolución tectónica de la cuenca del Valle Medio del Magdalena durante el Mesozoico y Cenozoico involucra varios estadios que se caracterizan por un estilo propio de deformación y una correspondiente sucesión estratigráfica (Cooper et al., 1995). En la figura 2 se resume el modelo evolutivo regional de la Cordillera Oriental y las cuencas Valle Medio del Magdalena y Llanos Orientales. Estructuralmente la cuenca del VMM está limitada al este por un sistema de fallas imbricado de cabalgamiento (sistema de fallas Salinas) y al oeste se encuentra con la Cordillera Central por la falla Palestina (falla inversa), al norte con la falla de Bucaramanga-Santa Marta (falla de rumbo) y al sur con la falla de Cambao (falla inversa) (Triviño, J. A., 1982).

El desarrollo de la cuenca del VMM se inició en el Triásico – Cretácico temprano con una mega secuencia *sin-rift*, relacionada directamente con la separación entre norte y Suramérica, en el protocaribe, como ha sido resaltado por diferentes estudios (Montes, 2003; Taboada et al., 2000; Cooper et al., 1995; Dengo &

Covey, 1993). Durante el Cretácico temprano, una transgresión marina dio lugar al relleno de la cuenca de *backarc* con una cuña progradante. La máxima superficie de inundación se alcanzó para el Turoniano-Santoniano, estableciendo los depocentros a través de la Cordillera Oriental, cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM) y VMM, con cuencas marginales en los Llanos Orientales y el Putumayo. Fue durante este periodo que se depositó la Formación La Luna y sus equivalentes estratigráficas en las cuencas mencionadas anteriormente. Finalmente, La acreción de la Cordillera Occidental durante el Maastrichtiano-Eoceno temprano, dio lugar a la formación de una cuenca tipo *foreland* y a su asociada megasecuencia. Durante el Terciario tuvo lugar el levantamiento de la Cordillera Oriental, lo que se conoce como Orogenia Andina, aislando las cuencas del VMM y de los Llanos Orientales, la cual propició el desarrollo de secuencias continentales, (Carvajal, H., 2004).

Figura 2. Modelo de la evolución tectono estratigráfica de la Cordillera Oriental, Valle Medio del Magdalena y Llanos Orientales. Tomado de Cooper et. al., 1995.



Fuente: Cooper et. al., 1995.

## 7. MARCO ESTRATIGRÁFICO

### 7.1 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

Las rocas sedimentarias que afloran en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena presentan edades que van desde el Jurásico Tardío hasta el Cuaternario. La figura 3 muestra la columna estratigráfica generalizada de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. De base a tope se distinguen las siguientes unidades:

**Formación Arcabuco:** Unidad descrita inicialmente por Scheibe y Olsson (en Taborda, 1952) y redefinida por Hubach (1957). La sección tipo está en la angostura del Río Pómeza, Boyacá. En Santander aflora en el sector de Gámbita, Charalá, Coromoro y en la Serranía de Los Cobardes. La unidad está constituida por cuarzoareniscas amarillo blancuzcas, de grano grueso a fino y lodolitas rojizas. Galvis y Rubiano (1985) la subdividen en cinco miembros o segmentos litológicos. Según los anteriores autores, la unidad se depositó en un ambiente netamente continental. El espesor varía entre 300 y 600 m. La Formación Arcabuco infrayace concordantemente la Formación Cumbre y suprayace concordantemente la Formación Girón. La edad está entre el Jurásico superior y Cretácico inferior. Es correlacionable con la Formación Los Santos (Tambor).

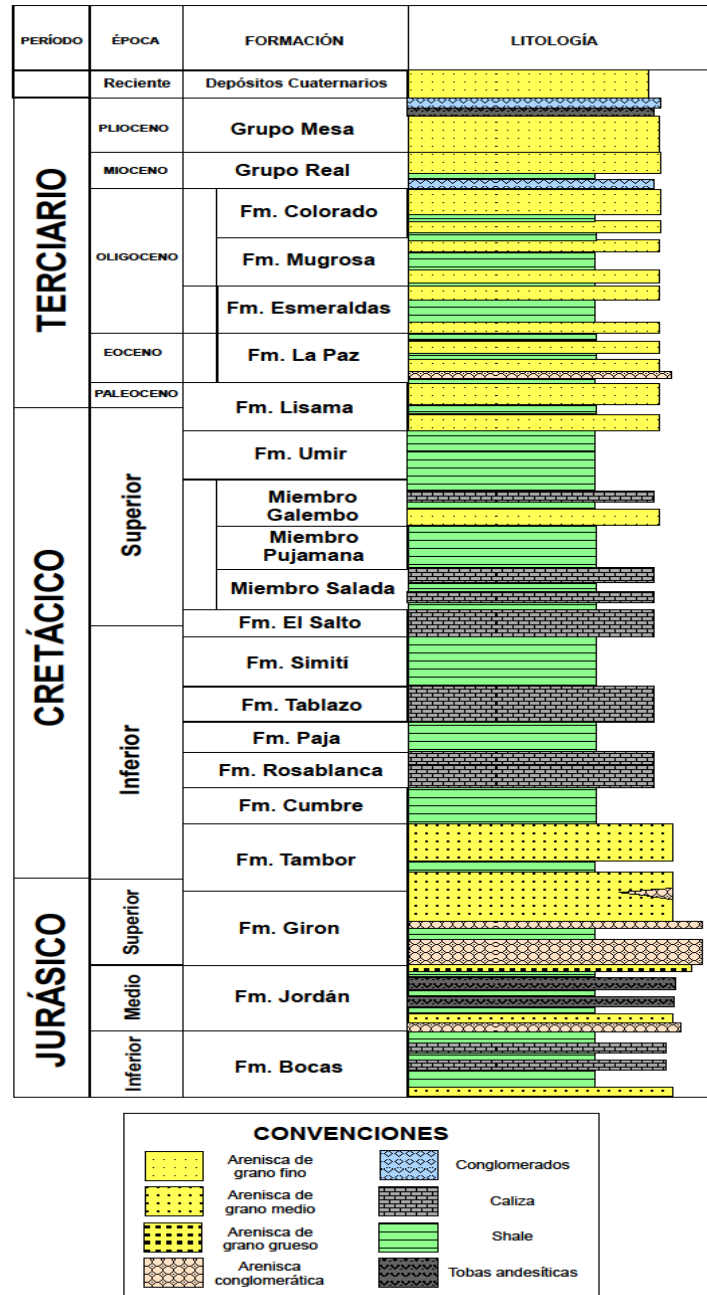
**Formación Tambor:** Fue definida por primera vez por Cediell (1968) y redefinida por Laverde (1985). Está constituida por areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo grisáceas y cuarzoareniscas gris amarillentas, con estratificación cruzada, en capas tabulares de espesores variables. En la localidad tipo, el espesor es de 218 m. Estas facies han sido interpretadas como depósitos fluviales acumulados por corrientes trenzadas (Clavijo, 1985; Laverde y Clavijo, 1985; Laverde, 1985). El contacto inferior de esta unidad es una discontinuidad estratigráfica con la Formación Girón, mientras que el contacto superior es concordante con la

suprayacente Formación Cumbre. La Formación Los Santos es considerada de edad Berriasiano (Cediel, 1968; Etayo y Rodríguez, 1985). Litológicamente es comparable con la Formación Río Negro de la cuenca de Catatumbo-Maracaibo.

**Formación Cumbre:** Esta unidad fue estudiada inicialmente por Renzoni (1969) quien le asignó el nombre. Posteriormente fue redescrita por Mendoza (1985). La sección tipo se localiza en el alto de Cumbre en la carretera entre Arcabuco y Moniquirá, Boyacá. Está constituida por areniscas color gris oliva, cuarzosas, de grano fino, con cemento silíceo; limolitas y arcillolitas blancas y negras y limolitas rojas. El depósito se asume en un ambiente de dominio marino marginal sobre una llanura costera aluvial. El espesor es de 137 m en la sección tipo y entre 25 y 53 m en Santander. El contacto superior de la Formación Cumbre es gradual o transicional con la suprayacente Formación Rosa Blanca. Etayo y Rodríguez (1985) le asignan una edad berriasiana.

**Formación Rosablanca:** Descrita originalmente por Wheeler (1929) y estudiada en detalle por Cardozo y Ramírez (1985) en la región de Villa de Leiva (Boyacá) y Gámbita (Santander). Se encuentra ampliamente distribuida en el Departamento de Santander. Está compuesta en su parte inferior por capas de caliza y yeso, con oolitos, ostrácodos y dolomías; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas. En la parte inferior presenta depósitos evaporíticos como yeso y polihalita que indican una hipersalinidad y tranquilidad en las condiciones de depositación; el resto de la secuencia se depositó en un medio marino somero en condiciones neríticas. El espesor varía de 150 a 425 m. Las relaciones estratigráficas de esta unidad con la infrayacente Formación Cumbre y la suprayacente Formación Paja son concordantes. La edad comprende el intervalo Valanginiano - Hauteriviano inferior (Etayo, 1968; Etayo y Rodríguez, 1985). Litológicamente es comparable con la Formación Tibú-Mercedes del Catatumbo-Maracaibo.

Figura 3: Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.



Fuente: Esparza, E. & Pineda, E. (1999).

**Formación Paja:** Inicialmente descrita por Wheeler (en Morales, et al., 1958); su localidad tipo es el Cerro Rosablanca al oriente del puente sobre el Río Sogamoso. Esta unidad está constituida por lutitas y *shales* gris oscuros a azulosos, fosilíferos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, con algunas intercalaciones de *shales* grises, localmente arenosos, calcáreos, fosilíferos, localmente limosos a arenosos, con intercalaciones de areniscas gris amarillentas, de grano fino, también pequeñas intercalaciones de calizas grises, localmente arenosas, fosilíferas. Se estima que su depósito tuvo lugar en un ambiente epicontinental. El espesor varía entre 125 y 625 m. El límite estratigráfico de esta unidad con la suprayacente Formación Tablazo es concordante. La edad ha sido determinada del Barremiano inferior al Aptiano inferior. Se compara en parte con la Formación Tibú-Mercedes.

**Formación Tablazo:** Descrita por Wheeler (en Morales, et al., 1958); la localidad tipo está en el sitio Tablazo, en el puente del cruce del Río Sogamoso de la vía Bucaramanga-San Vicente. La secuencia de esta unidad consiste en calizas gris a negras, fosilíferas, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, con niveles intercalados de arcillolitas grises a gris azulado, calcáreas, fosilíferas, en capas medianas a gruesas, con intercalaciones de areniscas grises, grano fino a medio, arcillosas, levemente calcáreas, en capas delgadas. El ambiente de depósito parece corresponder a condiciones neríticas, poco profundas. El espesor varía entre 150 y 325 m. La Formación Tablazo se encuentra en contactos concordantes con la infrayacente Formación Paja y la suprayacente Formación Simití. Su edad es considerada del Aptiano superior- Albiano inferior. Esta unidad en parte es cronoestratigráficamente correlacionable con las formaciones Tibú-Mercedes y Aguardiante.

**Formación Simití:** Fue descrita por geólogos de Intercol (en Morales, et al., 1958) y su localidad tipo está en la orilla sur de la Ciénaga de Simití, Bolívar. La unidad

consta de *shales* grises a negros, carbonosos, levemente calcáreos, con concreciones calcáreas hasta de 3 m y con intercalaciones de areniscas y calizas grises, localmente arcillosas y fosilíferas, en capas delgadas. Las condiciones paleoambientales fueron neríticas de aguas intermedias a profundas. Su espesor varía entre 250 y 650 m. Los contactos de la Formación Simití son concordantes con la infrayacente Formación Tablazo y suprayacente Formación La Luna. Su edad se ha establecido como Albiano superior - Cenomaniano. Se correlaciona con la Formación Capacho.

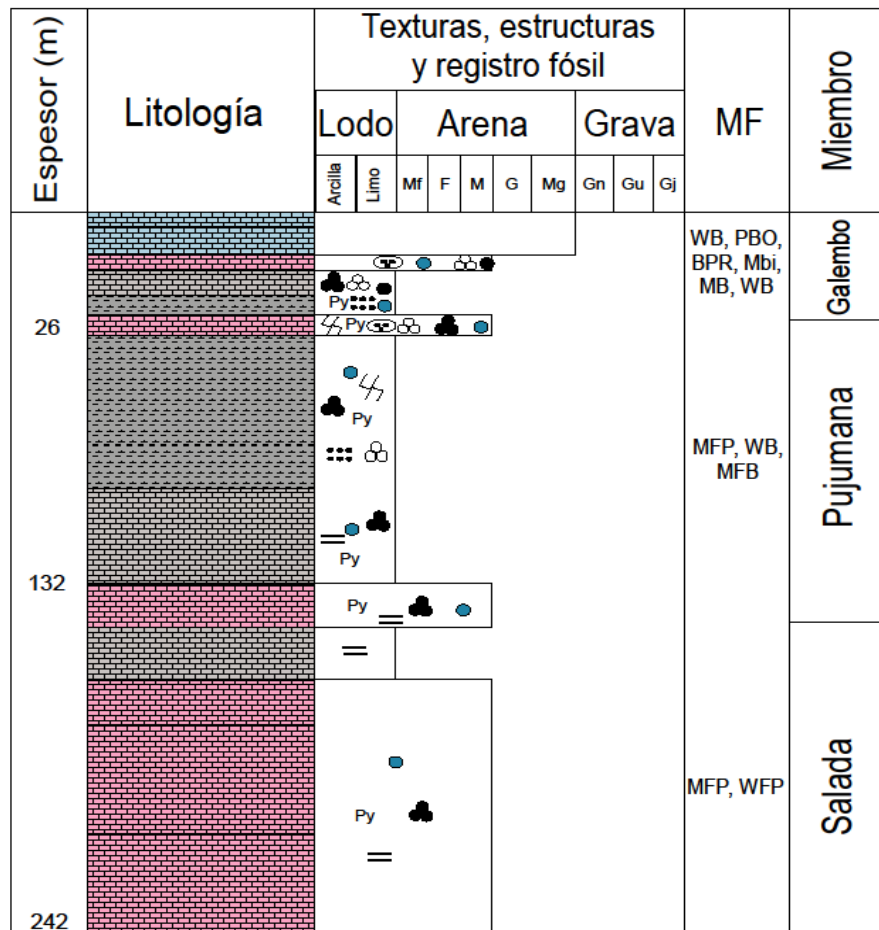
En la cuenca de Valle Medio del Magdalena se encuentra la Formación La Luna, la cual de base a tope se encuentra dividida en tres miembros: miembro Salada, Pujamana y Galembo (Figura 4).

**Miembro Salada:** Este miembro suprayace la Formación Simití, de edad Albiano-Cenomaniano. Fue definido por Morales et al. (1958). Está constituido por shale negros laminados, a menudo silíceos y algunos niveles de calizas negras. Espesor aproximado de 50 a 100 m. Su edad se ubica en el Turoniano inferior.

**Miembro Pujamana:** Fue descrito por Morales et al. (1958). Esta constituido principalmente por Shale calcáreos de color gris a negro. En algunos sectores aparece intercalado con arenisca hacia la base de este miembro. Su espesor aproximado es 50 a 225 m (Allen et al., 1994). Su edad se sitúa en el Turoniano Superior y Coniaciano Inferior.

**Miembro Galembo:** Es una secuencia de lodolitas calcáreas, intercaladas con delgadas capas de caliza, capas de arenisca fosfática y niveles delgados de chert colores azul y negro. Su espesor varía entre 180 – 350m. Su edad fue definida por Morales et al (1958) entre el Coniaciano y Santoniano.

Figura 4: Columna estratigráfica de la Formación La Luna. Miembros: Salada, Pujumana y Galemo.



CONVENCIONES		
LITOLÓGICAS	FOSILES	ICHOLOGICAS
Packstone	Foraminiferos bentónicos	Bioturbación no diferenciada
Mudstone	Foraminiferos plantónicos	Borings
Wackstone		
Shale calcáreo		
	LAMINACIÓN	OTROS
	Plana paralela	Ooides
	Plana discontinua	Peloides
		Pírita

Fuente: Garcia, M., 2010.

**Formación Umir:** Descrita por Huntley (en Julivert, et al., 1968); la localidad tipo se encuentra en la Quebrada Umir al oriente del cerro del mismo nombre en Santander. Consta de *shales* grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas, lutitas grises a gris oscuras, carbonosas, con nódulos ferruginosos, intercalaciones de areniscas y limolitas, grises, carbonosas y micáceas. También es común la presencia de capas explotables de carbón de 0,60 a 5,00 m de espesor. El ambiente es nerítico. El espesor se ha calculado entre 1.000 y 1.400 m. La Formación Umir descansa en discontinuidad estratigráfica sobre el miembro Galembó de la Formación La Luna. El contacto superior con la suprayacente Formación Lisama es concordante. Los foraminíferos estudiados por varios autores, determinan una edad del Campaniano - Maastrichtiano. Esta unidad se correlaciona con la Formación Colón-Mito Juan de la Cuenca de Catatumbo-Maracaibo.

**Formación Lisama:** Fue descrita originalmente por Link (en Morales, et al., 1958) y publicada por primera vez por Wheeler (en De Porta, et al., 1974). Esta unidad aflora al occidente de Santander y su sección de referencia está en la Quebrada Lisama, afluente del Río Sogamoso. La unidad se encuentra constituida por una secuencia de lutitas abigarradas, alternadas con areniscas grises, verdosas y pardas, de grano fino a medio y algunas capas delgadas de carbón. El depósito de estos sedimentos ocurrió en un ambiente bajo condiciones lagunares deltáicas. El espesor alcanza hasta 1.225 m. Esta unidad presenta un contacto normal y transicional con la infrayacente Formación Umir. El contacto superior con la Formación La Paz, está determinado por una discordancia regional bien marcada. La edad es Paleoceno (Van Der Hammen, 1958). Se le ha correlacionado con las formaciones Barco y Los Cuervos de la cuenca de Catatumbo-Maracaibo.

**Grupo Chorro:** Está constituido en su parte inferior por la Formación La Paz y en la superior por la Formación Esmeraldas (Morales, et al., 1958). Este grupo aflora en el sector occidental de Santander y ocupa parte del Valle Medio del Magdalena.

**Formación La Paz:** Los autores son los geólogos de la Tropical Oil Company (en Morales, et al., 1958) y su sección tipo está en la angostura del Río Lebrija, por la vía férrea, abajo de Vanegas. La secuencia estratigráfica está compuesta por areniscas grises, conglomeráticas, conglomerados, limolitas y grandes paquetes de lutitas grises. El depósito de los sedimentos de esta unidad se desarrolló en un ambiente de corrientes trenzadas. El espesor en la sección tipo es de 1.000 m, pero generalmente presenta variaciones locales. La Formación La Paz descansa discordantemente sobre la Formación Lisama. Su contacto superior con la Formación Esmeraldas es concordante y transicional. Conforme a su posición estratigráfica, la unidad se considera del Eoceno superior. Es correlacionable con la parte inferior de la Formación Mirador.

**Formación Esmeraldas:** Término utilizado por primera vez por los geólogos de la Gulf Oil Company (Morales, et al., 1958) y su sección tipo está cerca del caserío Esmeraldas, junto al Río Sogamoso. Esta unidad se compone de areniscas grises y verdosas, de grano fino, con intercalaciones de limolitas y lutitas moteadas de rojo, púrpura y pardo; contiene algunas capas delgadas de carbón. El ambiente deposicional fue bajo condiciones lagunares deltáicas. El espesor se ha calculado en unos 1.200 m. El contacto inferior con la Formación La Paz es concordante, mientras que el contacto superior está determinado por una posible discordancia con la Formación Mugrosa. La unidad es del Oligoceno. Es correlacionable con la parte superior de la Formación Mirador y parte inferior de la Formación Carbonera.

**Grupo Chuspas:** Esta unidad litoestratigráfica de rango mayor, incluye las formaciones Mugrosa y Colorado (Morales, et al., 1958). El intervalo cronoestratigráfico Eoceno superior - Oligoceno inferior (Teo) está representado por la Formación Mugrosa, que corresponde a la parte inferior del Grupo Chuspas, la cual aflora en pequeñas áreas en el costado occidental de Santander.

**Formación Mugrosa.** El nombre fue introducido por Gill (en Morales, et al., 1958) y corresponde a la parte inferior del Grupo Chuspas; su sección tipo se encuentra en la Quebrada Mugrosa. La unidad está compuesta en su parte inferior por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. La parte media consta de *shales* moteados con algunas intercalaciones de arenisca. Hacia la parte superior hay lodolitas moteadas, fosilíferas. Es una de las unidades más productivas de petróleo en la Concesión de Mares. El ambiente de depósito se considera como continental fluvial. El espesor varía entre 500 y 800 m. El contacto inferior de la Formación Mugrosa es aparentemente discordante con la Formación Esmeraldas, en tanto que el superior con la Formación Colorado es concordante. La unidad es considerada del Eoceno superior-Oligoceno inferior. La Formación Mugrosa se correlaciona con la Formación Mugrosa definida por los geólogos de Ecopetrol y de la Shell y con la parte inferior del Grupo Chuspas de las compañías Socomy y Richmond.

**Grupo Real:** Fue descrito por Wheeler (en De Porta, et al., 1974) y su sección tipo se ubica en el sitio Bandera Real, cerca del Río Opón, donde fue subdividido en cinco formaciones que de base a techo son: Formación Lluvia, compuesta por conglomerados polimícticos; Formación Chontorales, areniscas conglomeráticas y arcillolitas; Formación Hiel, arcillolitas grises y gris rojizas con areniscas; Formación Enrejado, consistente en arcillolitas con alternancia de areniscas, y Formación Bagre, areniscas conglomeráticas. El ambiente de depósito de estos sedimentos es interpretado como fluvial. Su espesor total es de 3.600 m. Regionalmente existen inconformidades estratigráficas bien definidas entre el Grupo Real con la infrayacente Formación Colorado y el suprayacente Grupo Mesa. La edad es considerada del Mioceno medio al Plioceno. El Grupo Real es equivalente al Real de las compañías Intercol y Shell.

**Grupo Mesa:** Está constituido hacia la base por tobas andesíticas con intercalaciones y lentes de conglomerados, arcillas y rocas piroclásticas; y hacia el techo por brechas y conglomerados con cantos y guijarros de areniscas y limolitas. Su espesor varía entre 350 y 575 m. Su edad se considera como Plioceno – Pleistoceno (Julivert, 1961; en Badillo, R., 1996).

Además de las unidades anteriormente descritas, en el área de estudio se encuentran unidades cuaternarias representadas por depósitos no consolidados de aluvión, coluvión, abanicos y terrazas consideradas del Holoceno. Esparza, E. y Pineda, E. (1999).

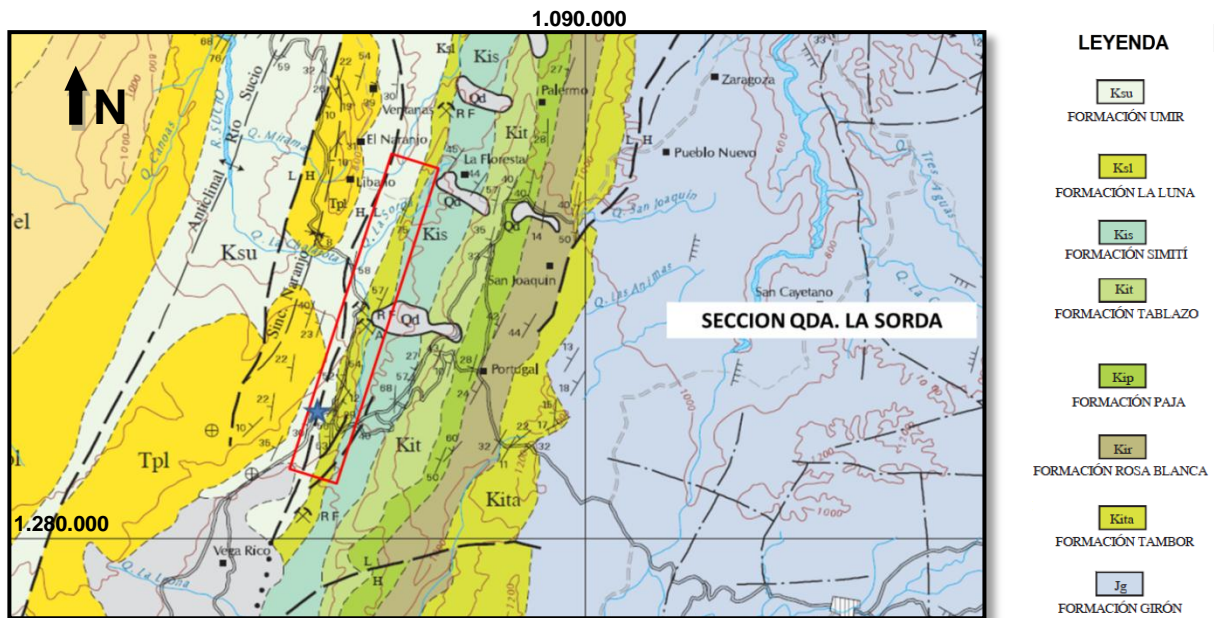
## 7.2 ESTRATIGRAFÍA DETALLADA

Para la finalidad de este trabajo, se levantaron dos columnas estratigráficas para las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena en el Valle Medio del Magdalena. Estas columnas fueron levantadas a escala 1:200, complementadas con muestreos y análisis tanto micro como macroscópicos detallados. En los anexos B y C se encuentran las columnas estratigráficas de cada sección estudiada en este trabajo.

### 7.2.1 SECCIÓN QUEBRADA LA SORDA FORMACIÓN LA LUNA

Esta sección se encuentra localizada en la cuenca del Valle Medio del Magdalena al NW del municipio de Lebrija, Departamento de Santander; la figura 5 ilustra la localización del área a escala de 1:25.000.

Figura 5. Localización de la Sección Quebrada La Sorda.



Fuente: Mapa geológico del cuadrángulo H12, Bucaramanga. Tomado parcialmente de Ward et al. (1977).

Los espesores se midieron mediante poligonal abierta por el método de geometría descriptiva, teniendo en cuenta un control cartográfico – estructural del área corregidos posteriormente.

Se obtuvo una poligonal con 60 puntos de control y un espesor total levantado de 319.5 metros corregido. (Anexo D).

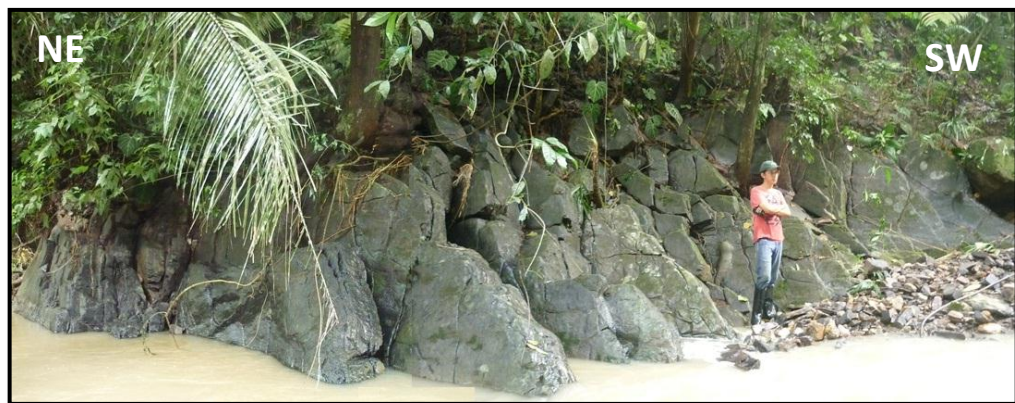
En la sección de la Quebrada La Sorda, la Formación la Luna se ha dividido en los tres miembros: Salada, Pujamana y Galembo, describiéndose a continuación.

### 7.2.1.1 MIEMBRO SALADA

Se encuentra ubicado entre los 0 y 125 metros hacia la base de la sección, suprayaciendo la Formación Simití de manera concordante sobre los *shales* arcillosos color gris oscuro de esta formación. La fotografía 3 muestra los principales afloramientos del Miembro Salada, donde las capas de caliza alcanzan espesores hasta de 90 centímetros y un alto diaclasamiento.

Fotografía 3. a-b-c. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Salada de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.

a. X: 1.085.763 Y: 1.284.375.



Fotografía 3a. Afloramiento con presencia de calizas tipo *wackstone*.

b. X: 1.085.648 Y: 1.284.100



Fotografía 3b. Afloramiento de calizas tipo *wackstone* con capas que alcanzan 80 centímetros de espesor.

c. X= 1.085.763 Y= 1.284.375

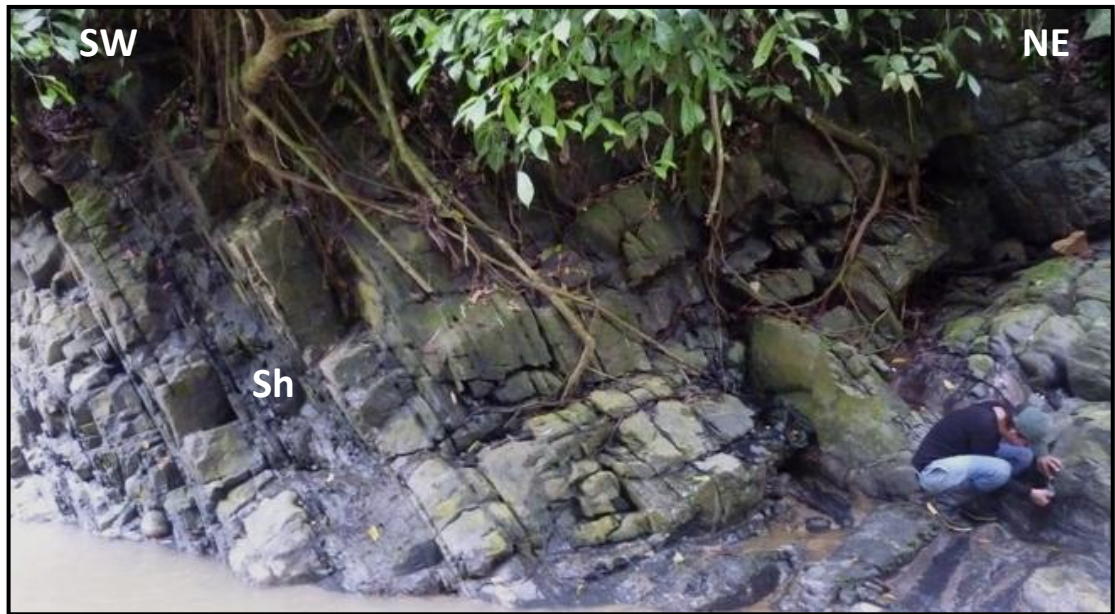


Fotografía 3c. Detalle de calizas tipo *wackstone* mostrando contacto neto entre capas.

Este miembro está conformado principalmente por calizas tipo *wackstone* con capas de *shale* calcáreo (Fotografía 3). Hacia la parte media del miembro aparecen niveles de lodolitas color gris, fósiles, no calcáreas que se intercala con los *wackstone* como lo muestra las Fotografías 4 y 5. Los espesores de las capas van de delgadas a gruesas, con geometría plana paralela. Los contactos entre

capas son netos y ondulosos. Estas rocas carbonatadas presentan fragmentos de foraminíferos planctónicos y restos de bivalvos. Los niveles de lodolitas y *shale* calcáreo se encuentran finamente laminados con espesores de aproximadamente 10 centímetros. Este miembro se caracteriza por presentar mayor abundancia de concreciones calcáreas fosilíferas y piritosas y de mayor tamaño con diámetros hasta de 1 metro con respecto a los miembros Pujamana y Galembo.

Fotografía 4 .Caliza tipo *wackstone* con intercalaciones de niveles de *shale* calcáreo (Sh). Miembro Salada de la Formación La Luna.



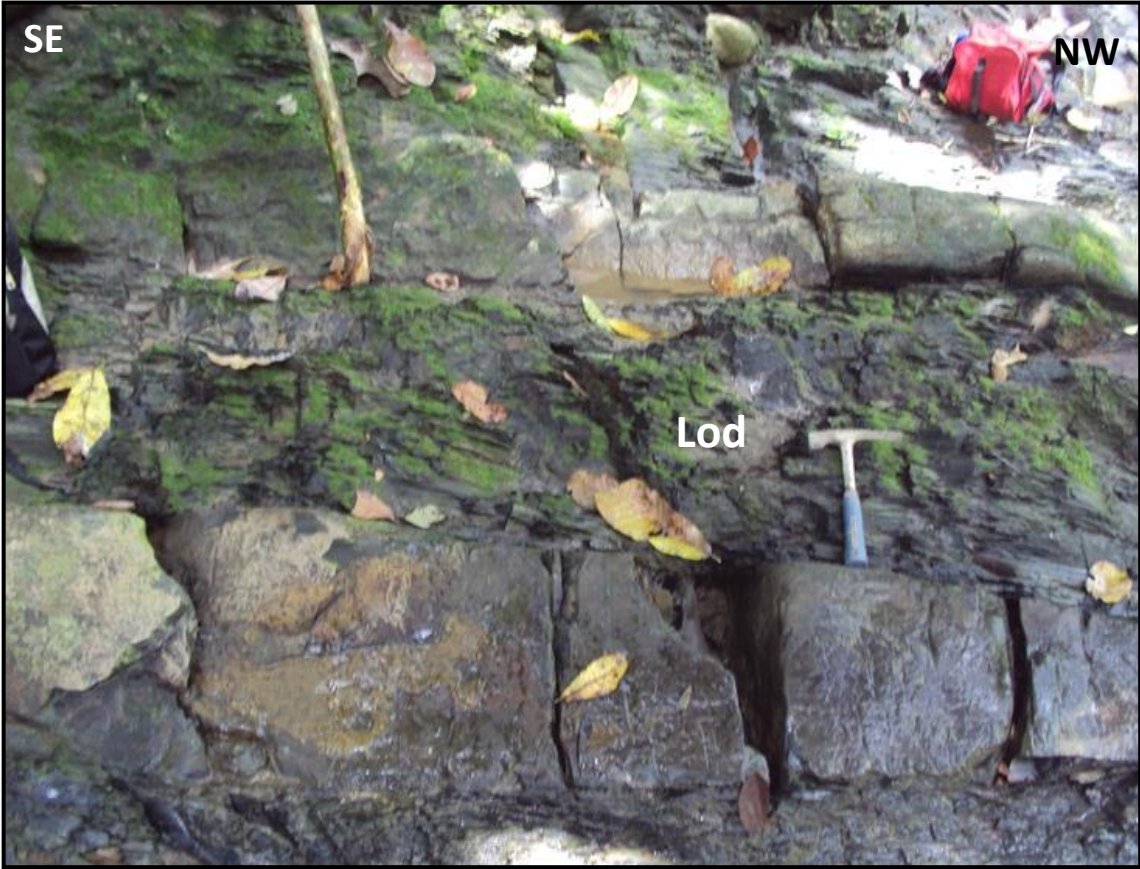
Fotografía 5. Lodolita no calcárea. Miembro Salada de la Formación La Luna. En detalle se observa los colores naranja y la fisilidad característica de estos niveles de lodolita no calcárea.

X: 1.085.771, Y: 1.284.288



Fotografía 6. Caliza intercalada con lodolita no calcárea (Lod). Miembro Salada de la Formación La Luna.

X: 1.085.771, Y: 1.284.288



### 7.2.1.2 MIEMBRO PUJAMANA.

Se encuentra ubicado entre los 125 y 281.5 metros en la sección levantada, con un espesor medido de 156.5 metros. Está unidad suprayace sobre el Miembro Salada de manera concordante. Está representado por un intervalo de transición caracterizado por intercalación de *shale* calcáreo fosfático de color gris oscuro, con foraminíferos, presenta laminación plana paralela y está intercalado con calizas, predominando las capas de *shale* que pueden alcanzar un espesor máximo de 2 metros. La parte superior del miembro consta de una secuencia monótona de *shale* y lodolita calcárea con laminación plana paralela, su color varia de gris claro a oscuro. La fotografía 7 presenta un detalle del Miembro Pujamana en la sección Quebrada La Sorda, donde se puede observar una sucesión de *shales* calcáreos.

Fotografía 7. a-b-c, Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Pujamana de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.

a. X= 1.085.760 Y= 1.284.349



Fotografía 7a. Afloramiento del miembro Pujamana mostrando predominancia de *shale* calcáreo con laminación plana paralela.

b. X= 1.085.566 Y= 1.283.862



Fotografía 7b. *Shale* calcáreos ligeramente fosfáticos con niveles de caliza tipo *wackstone-packstone*.

c. X= 1.085.768 Y= 1.284.517



Fotografía 7c. Afloramiento de *shale* calcáreo con espesor de capas que alcanzan los 1.50 metros.

Se observa en este miembro niveles piritosos y nodulaciones calcáreas con un diámetro que alcanza los 60 centímetros aprox. Los contactos entre capas están bien definidos y sus espesores varían entre gruesos y muy gruesos. La fotografía 8 permite observar uno de esos nódulos embebido en una capa de *shale* calcáreo.

Fotografía 8. Vista de afloramiento del Miembro Pujamana. Nódulos calcáreos en capas de *shale* calcáreo.

X: 1.085.768, Y: 1.284.472



### 7.2.1.3 MIEMBRO GALEMBO.

Se encuentra ubicado entre los 281.5 y 319.5 metros de la sección, con espesor acumulado de 38 metros (Fotografía 9) y suprayaciendo el Miembro Pujamana. Este miembro se caracteriza por la presencia de una secuencia intercalada de *shale* y lodolita calcárea con laminación plana paralela de color gris claro, intercalado con calizas laminadas, pequeños niveles de chert de 10 a 20

centímetros y un intervalo importante de arenisca fosfórica (*packstone fosfático*) de color pardo- amarillo hacia la base donde se observan moldes y conchas de bivalvos y restos fósiles en general.

Fotografía 9.a-b. Panorámicas de afloramientos georeferenciados. Miembro Galembo de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda. Se observan paquetes de caliza laminada con estratificación plano paralela intercalado con niveles de *shale* calcáreo.

a. X= 1.085.748 Y= 1.284.870



Fotografía 9a. Afloramiento del miembro Galembo que permite ver intercalación de caliza laminada y *shale* calcáreo.

b. X= 1.085.725 Y= 1.284.765



Fotografía 9b. Vista de afloramiento del miembro Galembó mostrando niveles de caliza laminada y *shale* calcáreo con contacto neto entre capas y laminación plana paralela.

Los contactos entre las capas son netos como lo muestra la fotografía 9. Las capas son tabulares con un rango de espesor que varía entre 10 y 40 centímetros. Las fracturas están rellenas de calcita y se presentan nódulos calcáreos alineados y algunos ubicados de manera dispersa (Fotografía 10) con diámetros de hasta 30 centímetros hacia la base de la secuencia. Las lodolitas calcáreas y *shales* muestran enriquecimiento silíceo variando hacia cherts en algunos sectores.

Fotografía 10. Intercalación de caliza laminada, *shale* calcáreo y arenisca fosfática. Miembro Galembo de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.

X: 1.085.726, Y: 1.284.765



Fotografía 11. Nódulo calcáreo presente en el miembro Galembo de la Formación La Luna sección Quebrada La Sorda.

X: 1.085.728, Y: 1.284.770



### 7.2.2 SECCIÓN QUEBRADA AGUA BUENA FORMACIÓN LA LUNA

La segunda sección levantada por medio de columna estratigráfica, está localizada hacia el margen izquierdo de la Quebrada Agua Buena en sentido sur-norte. El espesor del afloramiento es de 24.45 metros. y el dato estructural principal  $N25^{\circ}E/36^{\circ}NW$ . El contacto inferior está sumergido en las aguas de la quebrada y el superior cubierto por vegetación. La figura 6 muestra la localización de la sección Quebrada Agua Buena a escala de 1:25.000.

Figura 6. Localización de la sección Quebrada Agua Buena.



Fuente: Mapa geológico del cuadrángulo H12, Bucaramanga. Tomado parcialmente de Ward et al (1977).

Los espesores se tomaron con poligonal abierta por el método de geometría descriptiva obteniendo una poligonal con 14 deltas de control y un espesor total levantado de 24.45 metros. (Anexo E). La Quebrada Agua Buena, la cual va a desembocar al Río Sogamoso, hace parte del flanco oriental de la cuenca del VMM, en donde se expone parte de la Formación La Luna. En esta sección, se encuentra la parte superior del Miembro Salada y base del Miembro Pujamana, mostrando en sus capas una dirección preferencial de N25E.

### 7.2.2.1 MIEMBRO SALADA

Se encuentra ubicado entre los 0 y 17 metros hacia la base de la sección. Este miembro presente en el sector de El Tablazo y está compuesto por una sucesión homogénea de calizas tipo *wackstone* de color gris oscuro con abundantes foraminíferos, intercalado con pequeñas capas de *shale* calcáreo; las capas de caliza muestran una geometría tabular en capas que varían en tamaño de medias a gruesas. Hay presencia de concreciones calcáreas de diámetros variantes que van hasta 80 centímetros. En la fotografía 12 podemos observar los paquetes de caliza intercalado con capas de *shale* calcáreo.

Fotografía 12. Panorámica de afloramiento georeferenciado. Miembro Salada de la Formación La Luna sección Quebrada Agua Buena.

X: 1.083.065, Y: 1.276.677



### 7.2.2.2 MIEMBRO PUJAMANA

Se encuentra ubicado entre los 17 y 24.5 metros en la sección levantada, con un espesor medido de 7.5 metros. Este miembro se encuentra representado en la sección Quebrada Agua Buena principalmente por *shales* calcáreos de color gris a negro en capas de 1 metro de espesor, intercalados con calizas tipo *wackstone*-

*packstone* de foraminíferos, presentes en capas con espesor aproximado de 1 metro. El *shale* presenta una laminación plano paralela y nódulos calcáreos de diámetros hasta 40 centímetros. La fotografía 13 muestra el afloramiento presente del Miembro Pujamana en la sección Quebrada Agua Buena, donde se puede observar principalmente *shales* calcáreos y pequeñas capas de caliza tipo *wackstone-packstone* de foraminíferos.

Fotografía 13. Panorámica de afloramiento georeferenciado. Miembro Pujamana de la Formación La Luna sección Quebrada Agua Buena.

X: 1.082.935, Y: 1.276.327



## 8. ANÁLISIS DE FACIES

Se realizó el análisis de facies de las Formación La Luna con el objetivo de conocer el ambiente y subambientes de sedimentación. Las litofacies (Tabla 1) representan cuerpos de roca con características particulares, las cuales los hacen diferenciables de los cuerpos de roca que están por debajo, por arriba y/o los lados (Walker y James 1992) y que corresponden a un proceso sedimentario característico. La asociación de facies es un concepto definido por Potter (1967) como "una agrupación de atributos sedimentarios que se asocian, incluyendo la geometría (espesores y extensión areal), continuidad y secuencia de unidades litológicas, tipos de rocas, estructuras sedimentarias y fauna (tipos y abundancia)" (Miall, 1990). Miall (1990) citado por Bermúdez *et al.* (2003) indica que cada litofacies por separado puede representar un evento depositacional individual, y estas pueden ser agrupadas en asociaciones de litofacies que son la base para definir modelos de facies, que tienden a ser comúnmente cíclicos.

Tabla 1. Litofacies de la Formación La Luna en la sección Quebrada La Sorda.


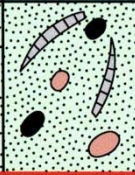
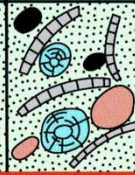


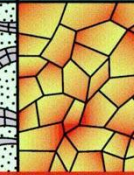
Espesor (m)	Miembro	% Total Fm. Luna	Litofacie	Espesor Facie	Espesor Acom.	% Facie Miembro	% Facie Fm. Luna
38,0	Galembó	11,9	<i>Packstone</i> Fosfático	5,0	5,0	13,16	1,56
			<i>Wackstone - Packstone</i> e ricos en fosfatos	19,0	24,0	50,0	5,95
			Shale y <i>Lodolita</i> calcareas laminada ligeramente fosfática	13,0	37,0	34,21	4,07
			Chert	1,0	38,0	2,63	0,32
156,5	Pujumana	48,99	Shale y <i>Lodolita</i> calcarea laminada fosfática	126,67	164,67	80,94	39,65
			<i>Wackstone - Packstone</i> de foraminíferos y restos fósiles	29,73	193,8	19,6	9,31
125,0	Salada	39,11	<i>Wackstone</i> pobremente laminados	107,5	301,3	86,0	33,65
			Shale y <i>Lodolita</i> calcareas laminadas ligeramente fosfáticas	10,0	311,3	8,0	3,13
			<i>Lodolita</i> gris fisil	7,5	319,5	6,0	2,36

Las características que se tuvieron en cuenta para el reconocimiento de las litofacies son: tamaño de grano, estructuras sedimentarias, trazas fósiles, contenido fosilífero, geometría y relaciones espaciales de todos los cuerpos sedimentarios

Para el estudio petrográfico de las láminas delgadas de las muestras obtenidas fueron examinadas con técnicas estándar (Lindholm y Finkelman, 1972). Las clasificaciones microscópicas y de campo se realizaron siguiendo las terminologías de Dunham (1962). (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de rocas carbonáticas según Dunham (1962).

Clasificación de Dunham, 1962

Textura deposicional reconocible				Componentes originales unidos durante el desarrollo de una bioconstrucción	Textura deposicional no reconocible
Componentes originales no unidos durante la sedimentación			Esqueleto clasto-soportado sin barro micrítico		
Con barro micrítico		Esqueleto grano-soportado			
Esqueleto matriz-soportado	Esqueleto grano-soportado				
< 10 % granos	> 10 % granos				
<b>Mudstone</b>	<b>Wackestone</b>	<b>Packstone</b>	<b>Grainstone</b>	<b>Boundstone</b>	<b>Cristalina</b>
					

Dunham, 1962  
Modificado de Moore, 2001  
© Atlas de Petrología Sedimentaria

Fuente: Atlas de Petrología Sedimentaria. Disponible en Internet: <http://www.ucm.es/info/petrosed/rc/cla/index.html>

Con el estudio se pudieron determinar los constituyentes que componen las distintas litofacies como microesparita y bioclastos. Los cambios de facies fueron reconocidos a través de cambios en tamaño de grano, selección y cambios en el patrón de apilamiento y el perfil de acomodación.

## **8.1 DESCRIPCIÓN DE FACIES**

El intervalo estratigráfico estudiado en las secciones de la Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena está representado por una sucesión carbonática, la cual están comprendida dentro del área de estudio conformando un espesor de 319.50 metros. Se han podido identificar 9 facies litológicas sedimentarias principales cuyos rasgos fundamentales y distribución estratigráfica se describen a continuación.

### **8.1.1 SECCIÓN QUEBRADA LA SORDA.**

En esta sección estratigráfica de la Formación La Luna se reconocieron 9 litofacies, identificadas como *shale* y lodolitas calcárea laminada ligeramente fosfática, *wackstone* pobremente laminados, lodolita gris físil, *wackstone-packstone* de foraminíferos y restos fósiles, facies chert, *packstone* fosfático y *wackstone-packstone* rico en fosfatos.

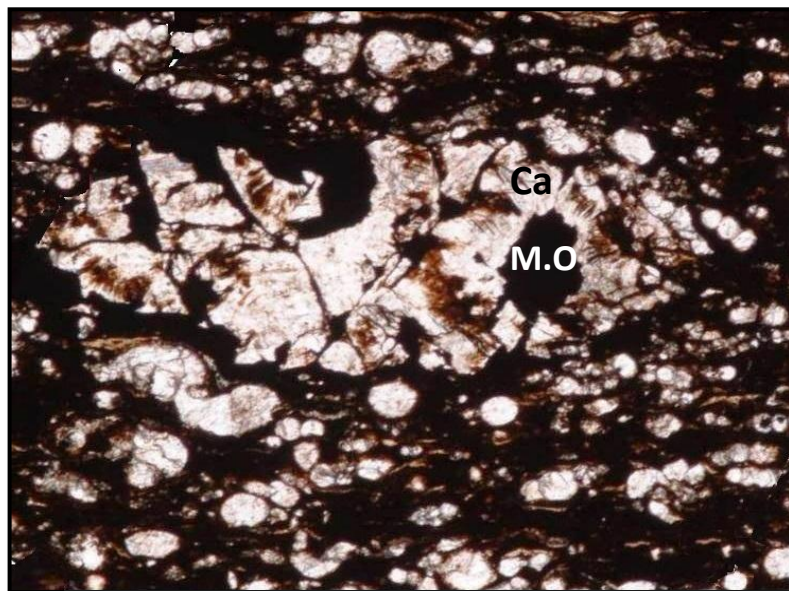
#### **8.1.1.1 MIEMBRO SALADA**

Las litologías que se encuentran en este miembro se han agrupado en 3 litofacies. Son rocas carbonatadas presentes en una secuencia de rocas tipo *wackestone* de foraminíferos y capas de *shale* y lodolitas calcáreos intercalados.

## **FACIES DE SHALES Y LODOLITAS CALCÁREAS LAMINADAS LIGERAMENTE FOSFÁTICAS:**

Esta litofacies constituye el 8.0% del Miembro Salada y el 3.13% de la Formación La Luna. Está constituida principalmente por *shales* gris oscuro con algunos fragmentos de conchillas, vértebras y presencia de foraminíferos planctónicos. En la sección delgada de la muestra CAAP-039 se observa presencia de foraminíferos planctónicos con fragmentos de conchillas. Se caracteriza por presentar laminación de color oscuro formadas por materia orgánica y en menos cantidad matriz de fosfatos de color naranja a marrón y pequeñas nodulaciones con núcleos de materia orgánica y cristales de calcita perpendiculares a las paredes del núcleo. (Fotografía 14).

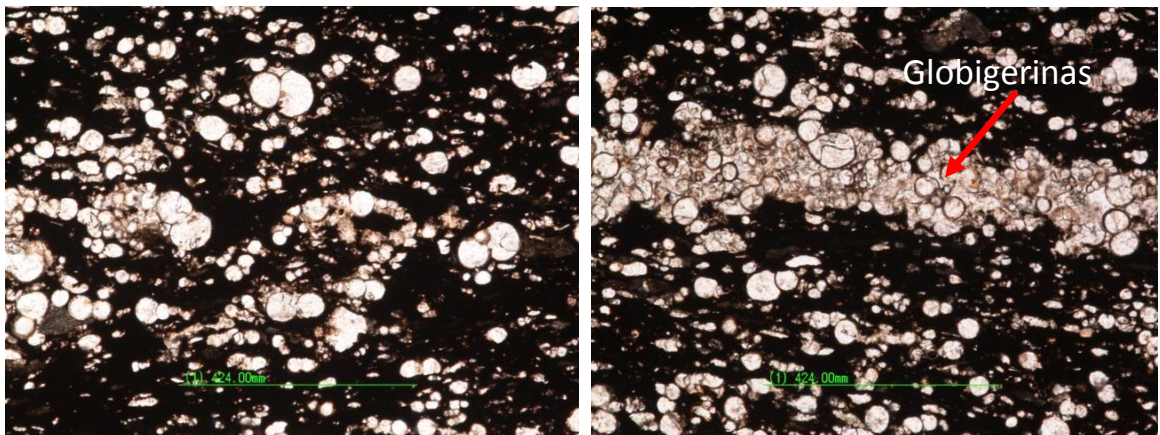
Fotografía 14. Sección delgada de la muestra CAAP-039. *Shale* y lodolitas calcáreas laminadas ligeramente fosfáticas, sección Quebrada La Sorda. Mostrando una estructura de un nódulo en el que se observa el núcleo con materia orgánica (M.O) y los cristales de calcita que lo rodean. Nicoles paralelos, aumento: 5x.



## **FACIES DE WACKSTONE POBREMENTE LAMINADOS:**

Esta litofacies constituye el 86% del Miembro Salada y el 33.65% de la Formación La Luna. Se constituye de *wackstones* con foraminíferos planctónicos y bentónicos. En sección delgada de la muestra CAAP-037 (Fotografía 15) se puede observar la presencia de una laminación irregular y lodos de Globigerina, característico de los foraminíferos planctónicos con recristalización a calcita baja en magnesio (Mg) y una matriz con materia orgánica.

Fotografía 15. Sección delgada de la muestra CAAP-037. *Wackstone* de foraminíferos pobremente laminado. Sección Quebrada La Sorda. Se observan foraminíferos planctónicos de Globigerinas y matriz de materia orgánica. Nicóles paralelos, aumento: 5x.



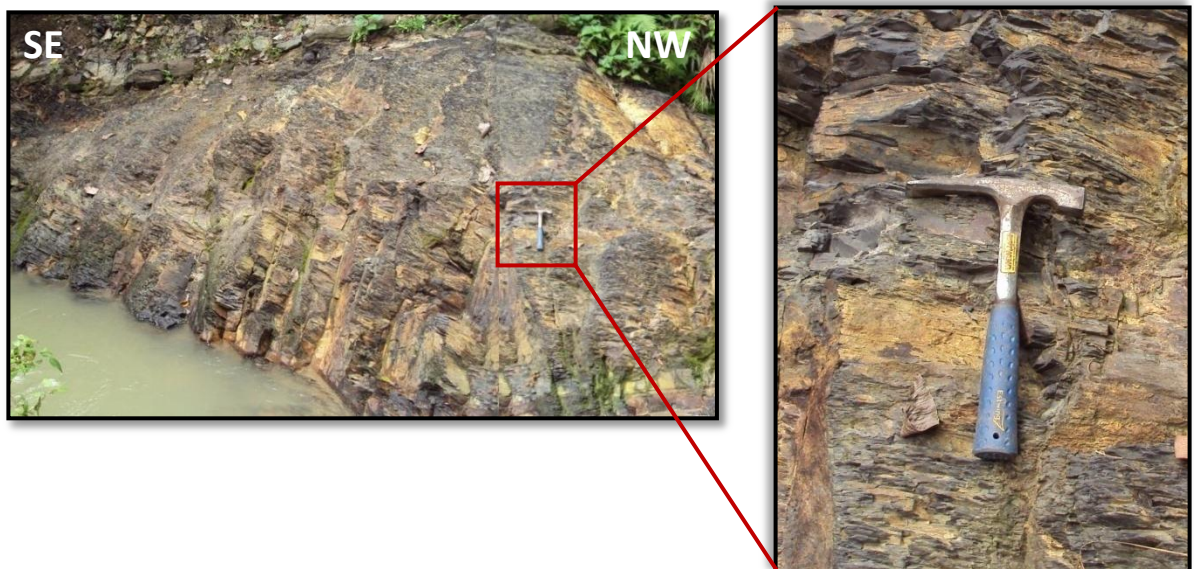
## **FACIES DE LODOLITA GRIS FÍSIL:**

Constituye el 6,0% del Miembro Salada, y solo el 2,36% de la Formación La Luna. Corresponde a niveles de lodolita físil de color gris verdoso en roca fresca y amarillo en roca meteorizada como se puede apreciar en la fotografía 16. El color

amarillo se presenta por alteración de Jarosita  $KF_3 (SO_4)_2 (OH)_6$ . Hacia la parte superior se presenta intercalada con caliza tipo *wackstone* del Miembro Salada en contactos netos.

Fotografía 16. Facies lodolita gris fósil. Miembro Salada Formación la Luna. Se observa los colores naranja y la fisilidad característica de esta facies.

X: 1.085.771, Y: 1.284.288



### 8.1.1.2 MIEMBRO PUJAMANA

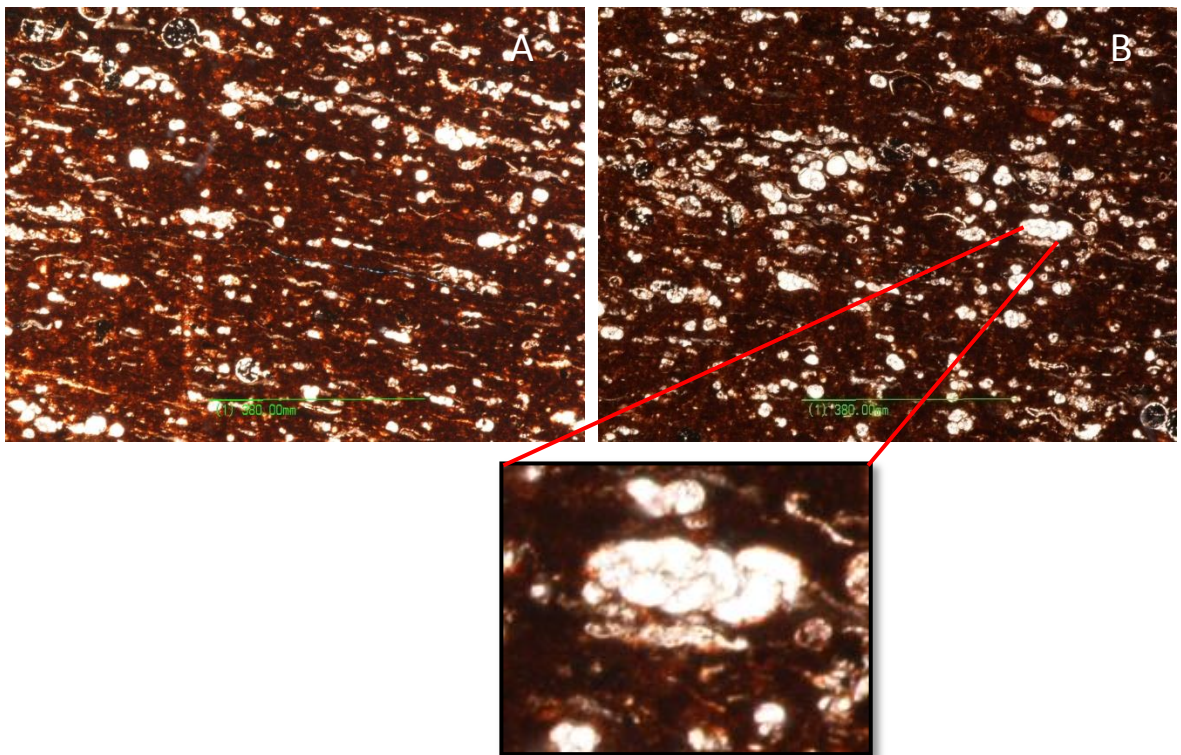
Las litologías presentes en este miembro se han agrupado en 2 litofacies:

#### **FACIES DE SHALE Y LODOLITA CALCAREA LAMINADA FOSFATICA:**

Esta litofacies constituye el 80.94% del Miembro Pujamana y el 39.65% de la Formación La Luna. Se conforma de *shales* y lodolitas calcáreas fosfáticas de

laminación plano paralela muy fina. En sección delgada de la muestra CAAP-024 se puede observar que esta facies está conformada por una alternancia de laminillas blancas de foraminíferos planctónicos y bentónicos en matriz de color rojo rica en fosfatos y materia orgánica, así como la presencia de vértebras de peces (Fotografía 17).

Fotografía 17. Sección delgada de la muestra CAAP-024. *Shale* y lodolita calcárea laminada fosfática. Sección Quebrada La Sorda. A) Se observan cámaras de foraminíferos bentónicos y planctónicos. B) Laminación de foraminíferos y fragmentos fósiles (conchillas de bivalvos) en matriz rica en fosfatos. Nicoles paralelos. Aumento: 5x.

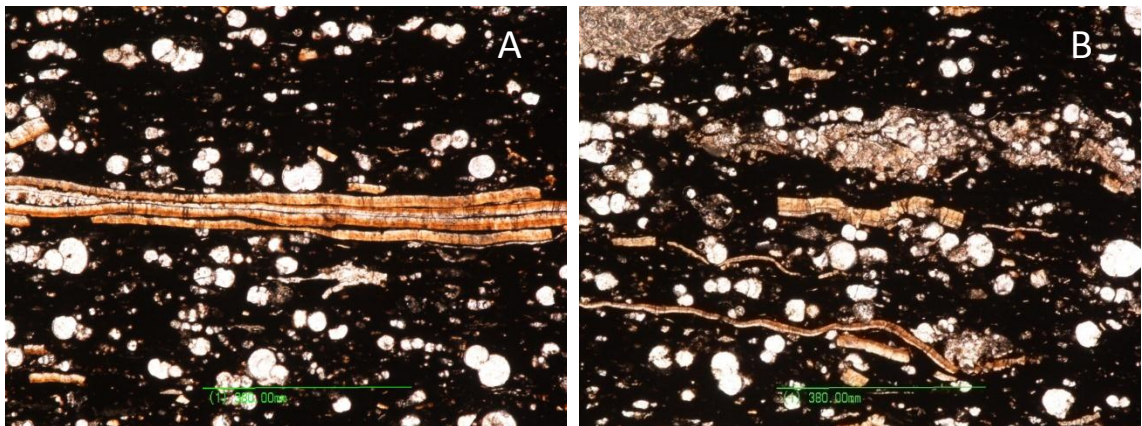


Cámaras de foraminíferos

## **FACIES DE WACKSTONES PACKSTONE DE FORAMINIFEROS Y RESTOS FÓSILES:**

Constituye el 19.6% del miembro y el 9.31% de la Formación La Luna. Está presente principalmente en el Miembro Pujamana de la sección La Sorda. Está constituido por calizas tipo *wackstone-packstone* de foraminíferos y restos fósiles (Fotografía 18). Esta litofacies presenta abundante registro fósil, principalmente de fósiles traza, como conchas y fragmentos óseos. También se encuentran foraminíferos bentónicos.

Fotografía 18. Sección delgada de la muestra CAAP-031. *Wackstone-packstone* de foraminíferos y restos fósiles. Sección Quebrada La Sorda. A) y B) Se observan fragmentos de conchas de bivalvos y fragmentos óseos. Nícoles paralelos aumento: 5x.



### **8.1.1.3 MIEMBRO GALEMBO**

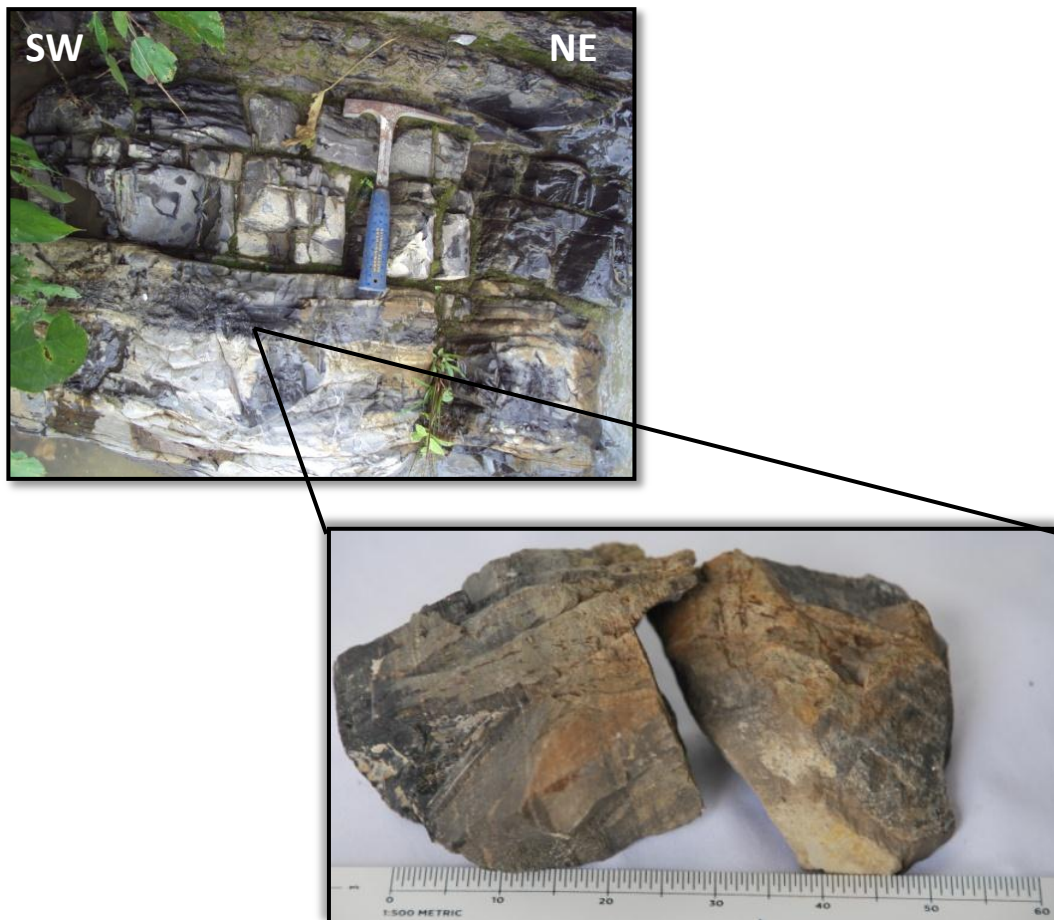
Se determinaron 4 litofacies distribuidas de la siguiente manera:

## FACIES DE CHERT:

Constituye el 2.63% del Miembro Galembo y el 0.32% de la Formación La Luna. Corresponde a un chert de color oscuro a negro que se presenta en delgadas capas de aproximadamente 10 centímetros de espesor. Esta facies se encuentra intercalada con capas de *shales* calcáreos (facies *shale* y lodolita calcárea laminada ligeramente fosfática) y calizas (facies *wackstone-packstone* ricos en fosfatos). Fotografía 19.

Fotografía 19. Facies Chert. Miembro Galembo de la Formación la Luna.

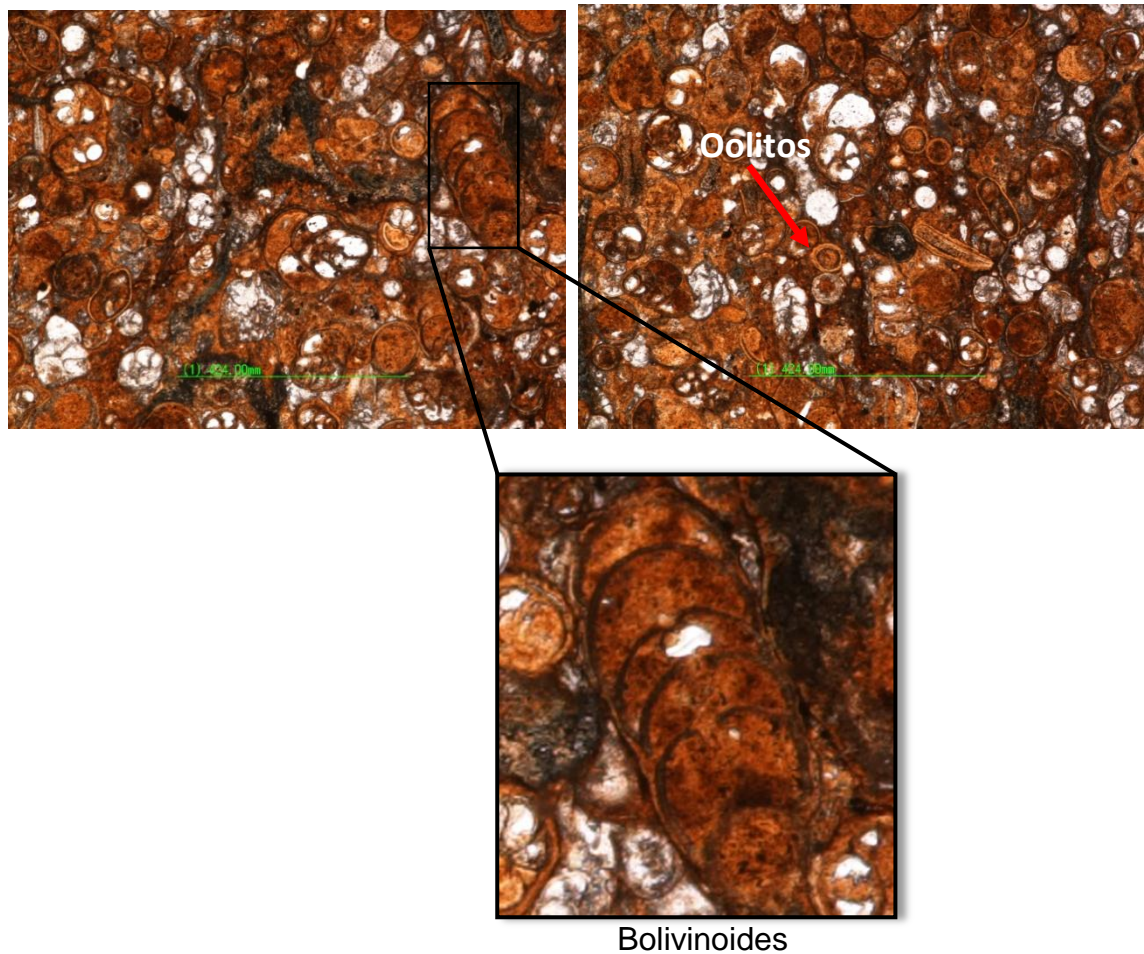
X: 1.085.726, Y: 1.284.765



## FACIES DE PACKSTONE FOSFÁTICO (arenisca calcárea fosfática fosilífera):

Esta litofacies constituye el 13.16% del miembro y el 1.56% de la Formación La Luna. Se encuentra solo en este miembro y consiste en *packstone* fosfáticos con abundantes foraminíferos bentónicos del género *Bolivinoide*, oolitos, pellets, fragmentos óseos de peces en una matriz de color naranja a marrón por la alta cantidad de fosfatos (Fotografía 20).

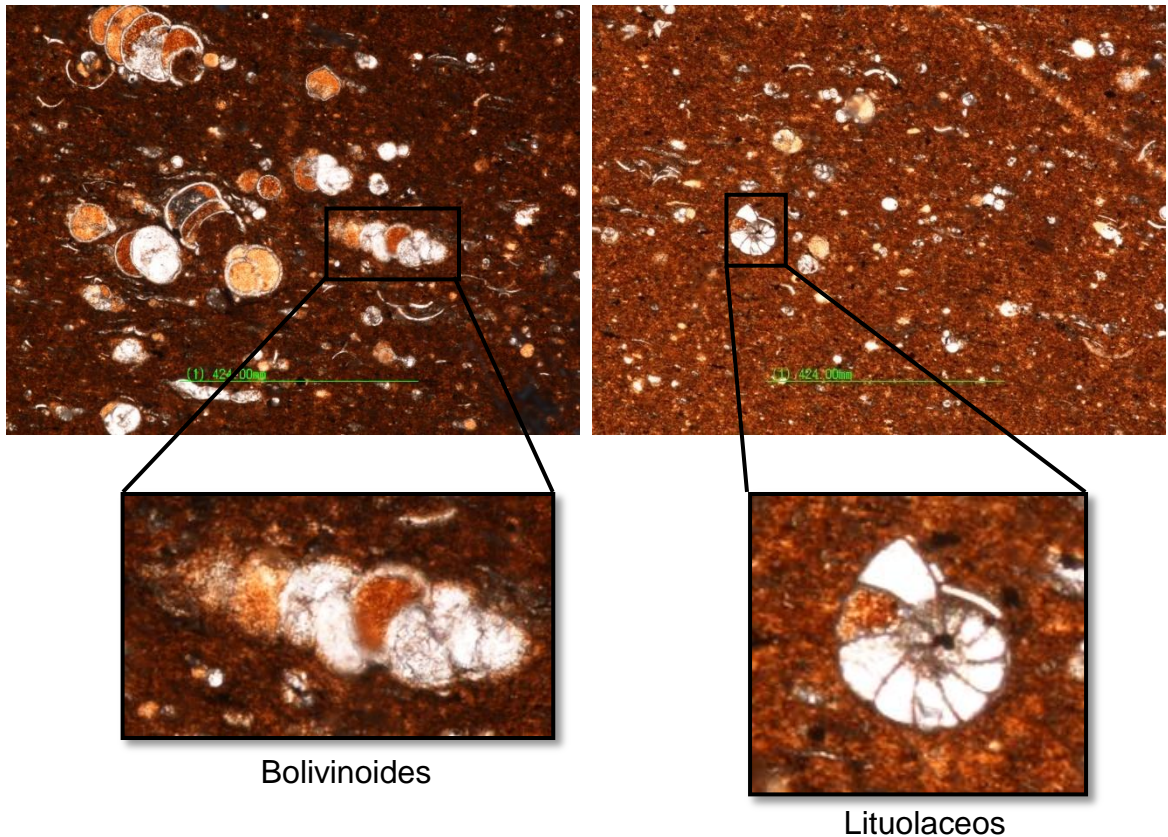
Fotografía 20. Sección delgada de la muestra CAAP-017. *Packstone* fosfático. Sección Quebrada La Sorda. Se distinguen *Bolivinoides*, pellets y fragmentos de peces en una matriz fosfática. Nicoles paralelos aumento: 5x.



## FACIES DE WACKSTONE-PACKSTONE RICOS EN FOSFATOS:

Esta litofacies comprende el 50.0% del miembro y el 5.95% de la Formación La Luna. Es exclusiva de este miembro y se encuentra hacia el tope del mismo. Consiste en capas *wackstone-packstone* de foraminíferos principalmente bentónicos en una matriz de color naranja a marrón compuesta por fosfatos y materia orgánica con laminación. La fotografía 21 muestra la sección delgada de la muestra CAAP-007, donde se observan pellets y foraminíferos bentónicos del género Lituolaceos y Bolivinoideos.

Fotografía 21 Sección delgada muestra CAAP-007: *wackstone-packstone* ricos en fosfatos. Sección Quebrada La Sorda. Nícoles paralelos, aumento: 5x.



## **FACIES DE SHALE Y LODOLITA CALCÁREA LAMINADA LIGERAMENTE FOSFÁTICA:**

Esta litofacies constituye el 34.21% del miembro y el 4.07% de la Formación La Luna. Compuesta por capas de *shales* y lodolitas calcáreas levemente fosfáticas con espesor de aproximadamente 40 centímetros, de iguales características a las del Miembro Pujamana y se intercala con fosforita *packstone* (arenisca calcárea) y *wackstone-packstone* rico en fosfatos.

### **8.1.2 SECCION QUEBRADA AGUA BUENA**

Las litologías que se encuentran en esta sección se han agrupado en 2 litofacies, y se presentan en una secuencia de rocas tipo *wackstone* de foraminíferos y capas de *shale* y lodolitas calcáreas intercaladas, las cuales fueron correlacionadas litoestratigráficamente con las facies en la sección Quebrada La Sorda (Anexo F).

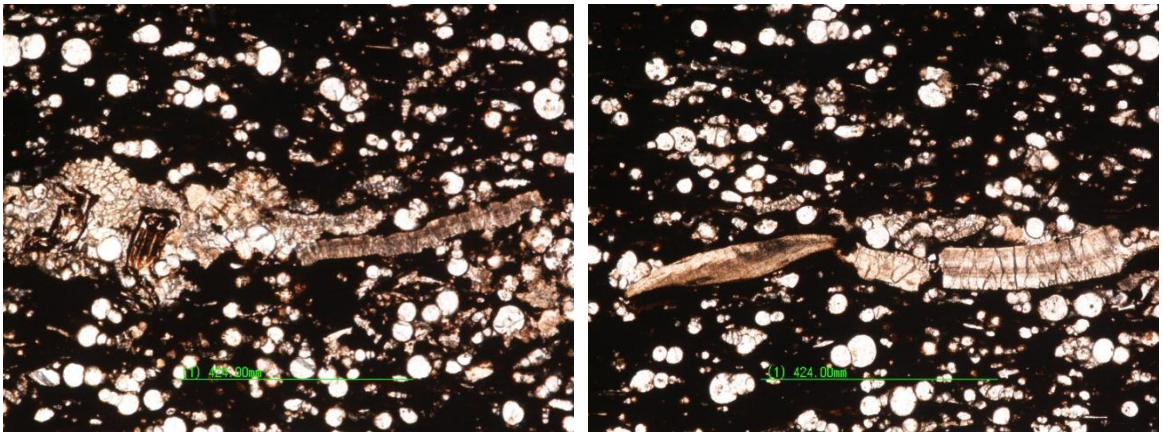
## **FACIES DE WACKSTONE - PACKSTONE DE FORAMINÍFEROS Y RESTOS FÓSILES:**

Esta facies constituye la parte basal del Miembro Pujamana; compuesta por calizas tipo *wackstone-packstone* (Fotografía 22) con presencia de restos fósiles como conchas de bivalvos, fragmentos óseos y foraminíferos planctónicos.

Esta facies se caracteriza por presentar una matriz de color negro debido al alto contenido de materia orgánica. Las rocas que se presentan en esta facies se encuentran laminadas debido a la acumulación de fósiles, en su mayoría por

foraminíferos planctónicos y fragmentos de conchas dispuestos en forma paralela a la estratificación.

Fotografía 22. Sección delgada de la muestra CAAP-050: *wackstone- packstone* de foraminíferos y restos fósiles. Sección Quebrada Agua Buena. A) y B) Se observan fragmentos de conchas de bivalvos y fragmentos óseos. Nicóles paralelos, aumento: 5x



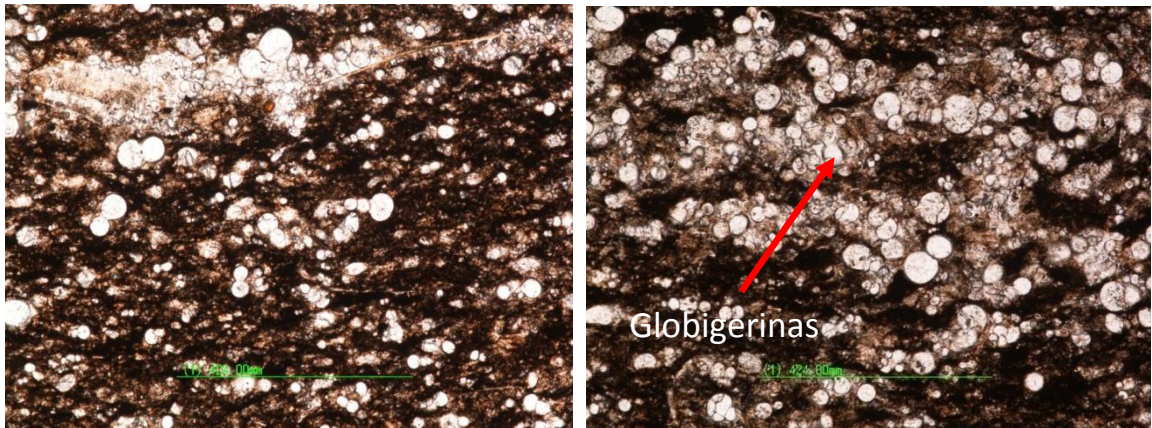
### **FACIES DE WACKSTONE POBREMENTE LAMINADOS:**

Esta facies corresponde al Miembro Salada en correlación con la sección Quebrada La Sorda. Está constituida por calizas tipo *wackstone* de color gris oscuro con presencia de foraminíferos planctónicos y bentónicos al igual que en la sección Quebrada La Sorda. En la fotografía 23 se observa vestigio de laminación no muy marcada y presencia de cámaras globosas.

Esta facies presenta en su matriz colores marrón y naranja, esta última debido a la presencia de fosfatos, en ciertas ocasiones la muestra presenta color negro debido a la presencia de materia orgánica. Las rocas observadas en esta facies

exhiben cierta laminación de color claro formado por acumulación de foraminíferos planctónicos de globigerinas.

Fotografía 23. Sección delgada de la muestra CAAP-054: *wackstone* de foraminíferos pobremente laminado. Sección Quebrada Agua Buena. Se observan foraminíferos planctónicos de Globigerinas y matriz de materia orgánica y microesparita. Nicoles paralelos, aumento: 5x.



## 9. DISTRIBUCIÓN DE FACIES DE LA FORMACIÓN LA LUNA

Se esquematizó por medio de histogramas (Figuras 7, 8, 9) la distribución de las facies litológicas en cada uno de los miembros y en la toda la Formación La Luna en las secciones estudiadas. La figura 10 muestra la abundancia de facies de La Formación La Luna.

En la sección Quebrada La Sorda (Tabla 1), se observa un mayor porcentaje de facies compuesta por *shale* y lodolitas calcáreas laminadas fosfáticas con un 46.85%, seguido de *wackstone* pobremente laminados con 33.65%, *wackstone - packstone* de foraminíferos y restos fósiles 9.31%, *wackstone - packstone* ricos en fosfatos 5.95%, lodolita gris físil 2.36%, arenisca calcárea fosfática fosilífera 1.56% y facies chert 0.39%. Estos porcentajes se estimaron teniendo en cuenta los espesores de las facies levantadas.

Figura 7. Porcentaje de facies Miembro Galembó Formación la Luna sección Quebrada La Sorda.

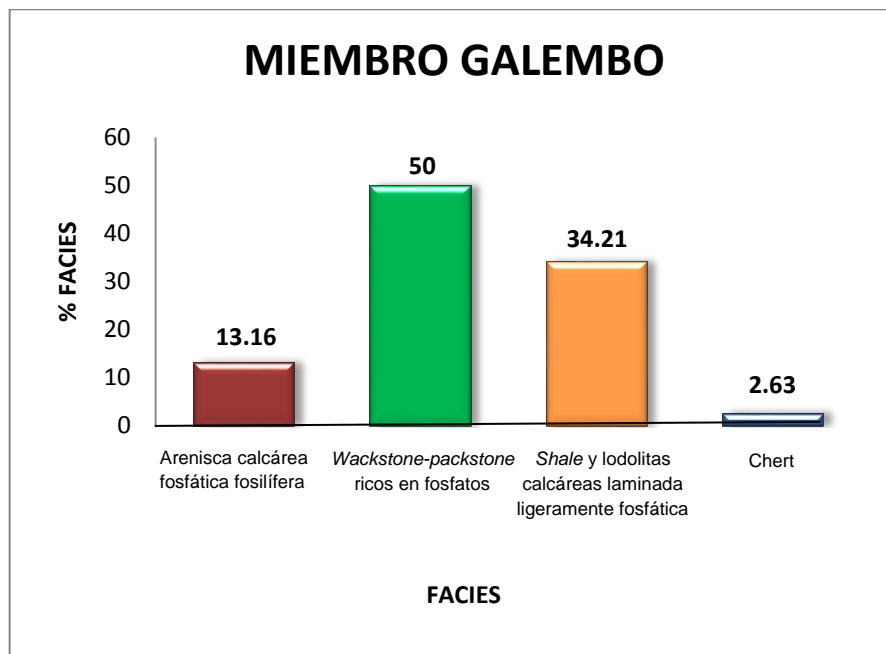


Figura 8. Porcentaje de facies Miembro Pujamana sección Quebrada La Sorda Formación La Luna.

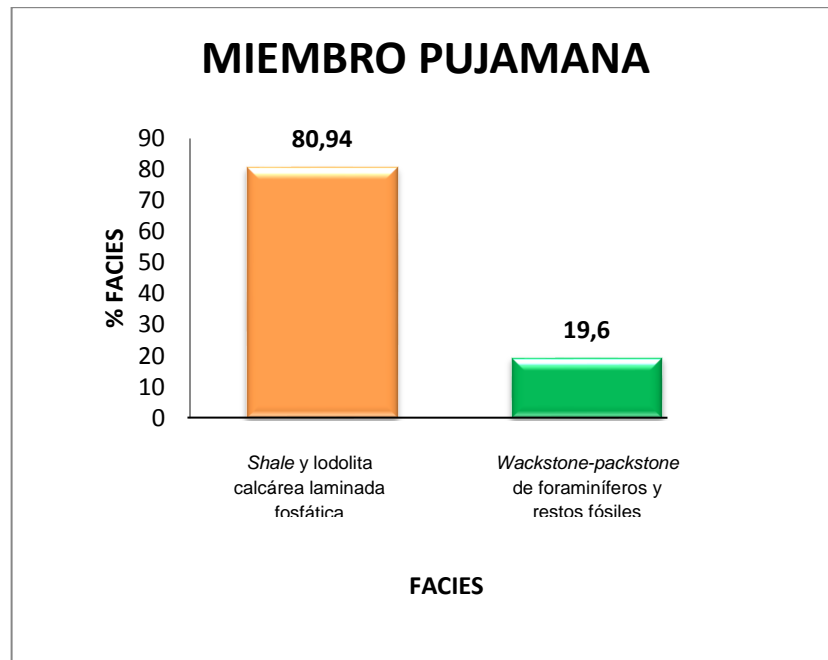


Figura 9. Porcentaje de facies Miembro Salada sección Quebrada La Sorda Formación la Luna.

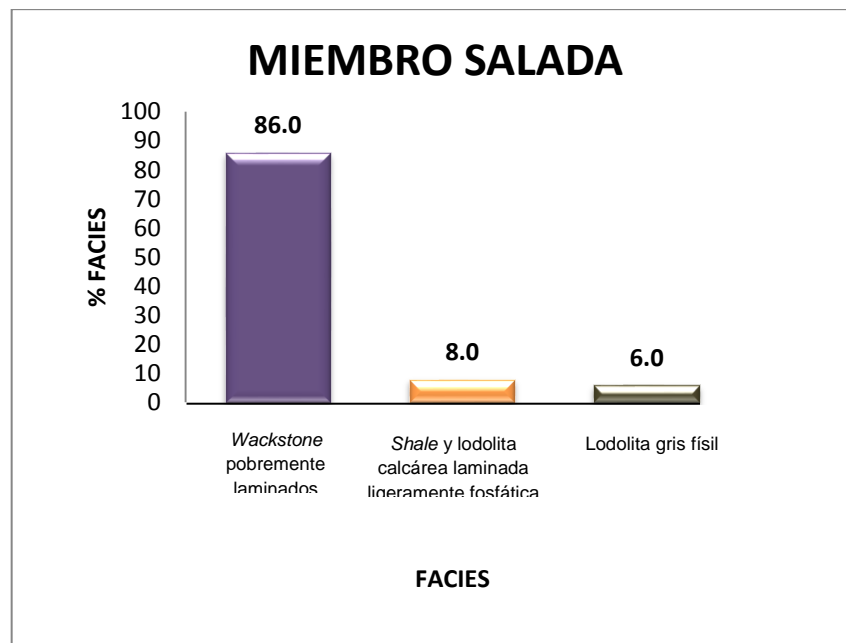
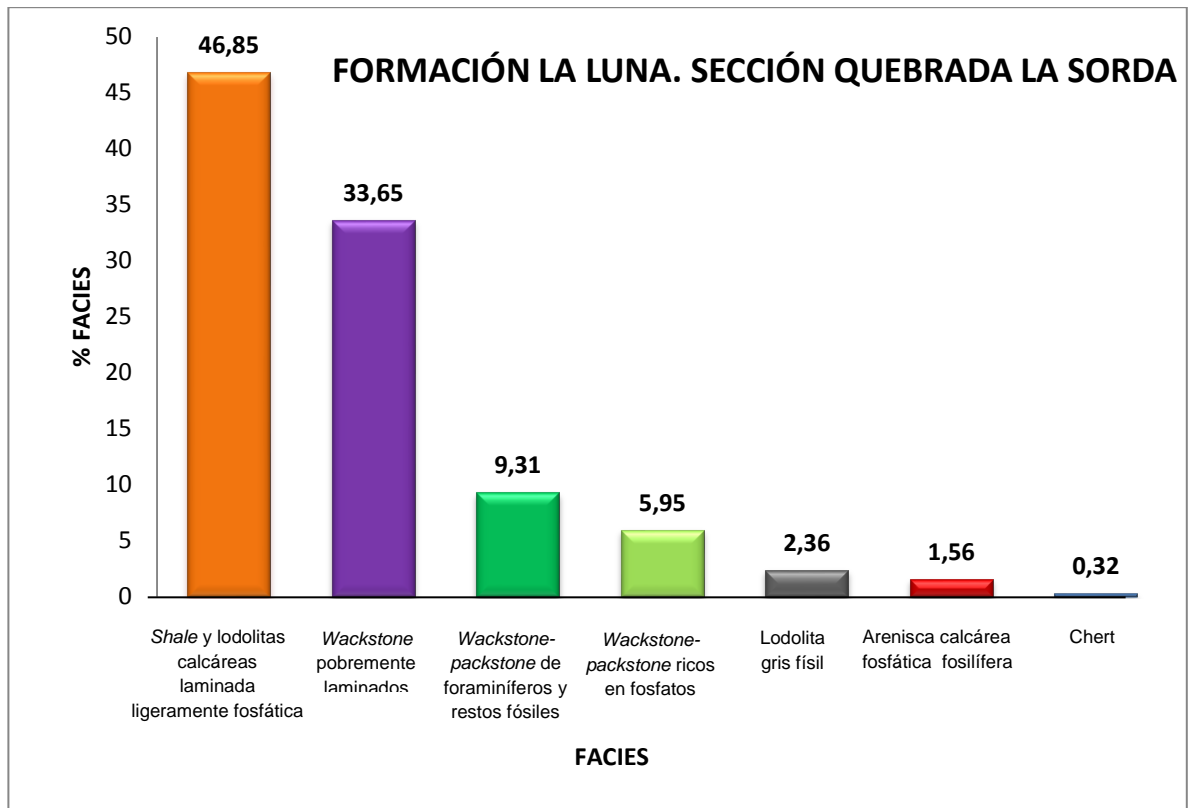


Figura 10. Distribución facial de la Formación La Luna en la sección Quebrada La Sorda.



## 10. QUIMIOESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN LA LUNA

La quimioestratigrafía es la rama de la estratigrafía que se ocupa del estudio e interpretación de la composición química de las rocas sedimentarias representadas en las secciones estratigráficas (Vera, 1994). Se basa en las cualidades químicas de las rocas; es decir, se ocupa del estudio e interpretación de la composición química de las rocas sedimentarias mediante las variaciones en el contenido de los elementos mayoritarios y elementos traza (Alberdi y Martínez, 1999). La determinación de estos elementos se hace a partir de espectrofotometría de absorción atómica, espectrofotometría de llama, fluorescencia de rayos X, y espectrometrías de plasma, cuyos resultados se expresan en partes por millón (ppm).

La evaluación química de las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena para los miembros Galembó, Pujamana y Salada de la Formación La Luna, comprende el análisis de parámetros de compuestos carbonáticos, elementos mayoritarios, y elementos traza como Uranio y Torio, los cuales están asociados a la materia orgánica. Para el análisis químico se seleccionaron 45 muestras de la sección Quebrada La Sorda y 9 muestras para la Quebrada Agua Buena. El análisis de las muestras se realizó mediante el método de fluorescencia de rayos X. En las tablas 3 y 4 se presentan los valores obtenidos y sus relaciones elementales utilizados en este estudio.

La difracción de rayos X (DRX) es una de las técnicas más poderosas para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases sólidas cristalinas, tanto orgánicas como inorgánicas, en muestras de polvo, capas finas o cristales de una amplia gama de materiales (minerales, rocas, sedimentos, suelos, etc.). El análisis químico de los componentes mayores Si, Al, Fe, Ca, Mg, K y Ti de las rocas, los cuales se plasman en el anexo G, puede efectuarse con una precisión superior a una desviación estándar de la concentración real del componente por fluorescencia de rayos X sobre muestras sólidas, Soto et al. (2006).

Tabla 3. Composición química y relación de elementos mayores de las muestras analizadas con fluorescencia de rayos X en las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena en la Formación La Luna.

MUESTRA	SECCION	MIEMBRO	Mn	Ti/Al	Si/Al	Sr/Ca
CAAP-001	Formación La Luna Sección Quebrada La Sorda	Galembó	<	0,03962674	19,3826819	1,55806231
CAAP-002			<	0,03022935	4,46916248	0,15012682
CAAP-003			<	0,03003532	27,3772962	1,24064233
CAAP-004			98,38	0,02715229	29,7523105	2,05681761
CAAP-005			54,14	0,06341094	26,2679279	0,25669876
CAAP-006			156,93	0,03687013	4,58099729	2,24862466
CAAP-007			<			5,94413995
CAAP-008			90,1	0,03138299	11,9503659	1,47892028
CAAP-009			271,26	0,04334396	9,18196358	1,52736496
CAAP-010			<	0,04301356	29,3332404	1,52372031
CAAP-011			153,51	0,06714374	2,21650488	5,29802356
CAAP-012			210,36	0,02361959	9,46741026	2,02954453
CAAP-013			156,58	0,03440339	4,27705086	4,01422391
CAAP-014			275,11	0,02130558	18,5966728	1,45742961
CAAP-015			289,24	0,04177798	13,8940203	6,48796926
CAAP-016			<	0,02590358	6,43937373	0,56100129
CAAP-017			155			0,03147076
CAAP-018			214,45	0,0368848	22,4373416	2,02451838
CAAP-019		<	0,03521173	26,1423197	2,40840463	
CAAP-020		292,19	0,02382441	8,18149972	1,6035962	
CAAP-021		150,05	0,00895413	5,71796238	1,93634068	
CAAP-022		<	0,02048528	12,2411402	5,20289723	
CAAP-023		<	0,02055296	4,46777896	0,76219096	
CAAP-024		114	0,04256678		1,32372819	
CAAP-025		290,53	0,0261354	5,70426102	2,10217305	
CAAP-026		123,5	0,01205272	16,625844	1,60857079	
CAAP-027		78,29	0,02445867	11,5284878	3,00711768	
CAAP-028		120,98	0,0100481	26,1628746	1,72071615	
CAAP-029		<	0,027736	7,82153713	4,21154636	
CAAP-031		89,1			1,55047723	
CAAP-032		<	0,00607151	18,4359072	0,91300685	
CAAP-033		106,36	0,03287437	3,63952855	1,21014006	
CAAP-034		<			5,59178329	
CAAP-035	<	0,00765953	2,33493449	0,61514199		
CAAP-036	240,2	0,03429211	1,8869473	0,27661001		
CAAP-037	156			3,4121349		
CAAP-038	<	0,00944438	5,50977968	0,67331388		
CAAP-039	134			1,73820341		
CAAP-040	79,57	0,0209381	11,1592169	1,95066477		
CAAP-041	454,58	0,03915614	13,1323282	2,7852596		
CAAP-042	<	0,02184032	6,47331489	1,37857186		
CAAP-043	136,27	0,02378097	10,1002817	2,04565298		
CAAP-044	196,15	0,01953684	7,68766382	1,61519344		
CAAP-045	88,9	0,02771806	9,35288269	2,43989978		
CAAP-046	193			2,8284754		
CAAP-048	Formación La Luna Sección Quebrada Agua Buena	Pujamana	129	0,01546859	13,5685854	2,61284681
CAAP-049			75,6	0,03485111	5,50070231	1,45786958
CAAP-050			296,54	0,02340114	10,4146696	2,09372748
CAAP-051			131,17	0,01153599	20,3603598	0,90259806
CAAP-052			105,23	0,01462384	5,71725926	0,47807057
CAAP-053		57,86	0,04437429	6,26795109	3,54596651	
CAAP-054		112,4	0,01155075	27,4040911	1,82503964	
CAAP-055		200	0,02157605	9,76059333	2,84959608	
CAAP-056		118,36	0,02158102	3,33589458	0,99063341	

Tabla 4. Elementos traza de uranio, torio y vanadio de las muestras analizadas con fluorescencia de rayos X en las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena Formación La Luna.

MUESTRA	SECCION	MIEMBRO	U	Th	V
CAAP-001	Formación La Luna Sección Quebrada La Sorda	Galembo	6,85	<	31,24
CAAP-002			<	<	28,42
CAAP-003			7,42	<	101,32
CAAP-004			13,4	<	245,47
CAAP-005			<	<	96,52
CAAP-006			12,9	7,82	361,65
CAAP-007			14,6	8,88	2547,98
CAAP-008			8,37	<	36,37
CAAP-009			11,6	3,64	1474,57
CAAP-010			<	<	306,28
CAAP-011			14	3,88	610,54
CAAP-012			18,5	<	98,91
CAAP-013			54,6	10,38	344,25
CAAP-014			24	<	179,83
CAAP-015			22,7	5,28	1624,91
CAAP-016			11,1	9,04	50,64
CAAP-017			63,7	<	933,76
CAAP-018			8,21	4,33	205,09
CAAP-019			<	<	<
CAAP-020		13,8	7,02	101,7	
CAAP-021		19,5	3,29	167,52	
CAAP-022		11,3	<	94,88	
CAAP-023		<	<	112,25	
CAAP-024		10,5	5,95	132,4	
CAAP-025		14,9	7,94	46,05	
CAAP-026		13,5	10,75	238,05	
CAAP-027		20,1	10,84	24,82	
CAAP-028		20,4	5,33	14,52	
CAAP-029		29,6	14,26	<	
CAAP-031		19,4	<	71,05	
CAAP-032		8,11	<	70,54	
CAAP-033		16,3	8,75	57,47	
CAAP-034		9,95	10,44	131,7	
CAAP-035		<	9,45	56,06	
CAAP-036		8,54	7,05	326,47	
CAAP-037		21,5	6,13	375,2	
CAAP-038		6,42	<	84,57	
CAAP-039		17,5	8,27	136,85	
CAAP-040		16,8	3,9	777,17	
CAAP-041		8,1	7,72	593,81	
CAAP-042		16	13,88	578,7	
CAAP-043		21,6	14,33	117,46	
CAAP-044		16,8	11,83	134,83	
CAAP-045		24	7,48	590,42	
CAAP-046		34	8,42	68,74	
CAAP-048		Formación La Luna Sección Quebrada Agua Buena	Pujamana	24,1	<
CAAP-049	17,7			<	665,29
CAAP-050	19,9			10,25	416,52
CAAP-051	6,45			<	113,68
CAAP-052	6,4			<	58,02
CAAP-053	19		<	574,11	
CAAP-054	17		<	126,56	
CAAP-055	22,3		15,85	328,16	
CAAP-056	<		13,14	97,84	

## 11. RESULTADOS

La estratigrafía secuencial, constituye una subdivisión de la estratigrafía, y tiene una gran variedad de definiciones, siendo la más simple la que la define como: “la subdivisión del relleno sedimentario de las cuencas en paquetes relacionados genéticamente, limitados por disconformidades y/o sus conformidades correlativas” (Galloway, 1989).

Un modelo estratigráfico secuencial se encuentra separado por diferentes órdenes de secuencias estratigráficas basadas en su importancia (Tabla 5). La más importante secuencia es reconocida como de “primer orden” y ésta puede ser subdividido en 2 ó más secuencias de “segundo orden”, y así una secuencia de “segundo orden”, puede ser subdividida en 2 o más secuencias de “tercer orden”. Los ciclos de avance o empotramiento continental, o ciclos de primer orden, están definidos por la mayor escala de todas. Su duración supera los 50 m.a y son controlados por la tectono-eustacia. Resultan de un ascenso general del nivel eustático asociado a la ruptura de los supercontinentes, aparición de dorsales oceánicas y desplazamiento de las aguas hacia los continentes; están distribuidos regionalmente y relacionados a la formación de cuencas sedimentarias. Los ciclos de segundo orden tienen una duración de 3 a 50 m.a. y representan etapas particulares en la evolución de las cuencas, resultan del agrupamiento de varios ciclos de tercer orden y pueden ser causados por cambios en la tasa de subsidencia tectónica en la cuenca o por levantamientos en la fuente de aporte de sedimentos. Los ciclos de tercer orden o secuencias, representan la base de la estratigrafía secuencial. Tienen una duración comprendida entre 0.5 y 3 m.a. y son identificados por el reconocimiento de ciclos individuales de creación y/o destrucción del espacio de acomodación. Se considera que estos ciclos son controlados principalmente por la glacio-eustacia, aunque otros mecanismos tectónicos son posibles. Los ciclos de Cuarto Orden, representan ciclos de somerización hacia arriba de las facies sedimentarias. Su duración es de 0.08 a

0.5 m.a. Están limitados por superficies que indican abrupta profundización. Se asocian a procesos autocíclicos dentro del sistema sedimentario. Los ciclos de Quinto Orden, o ciclos de alta frecuencia, tienen una duración de 0.03 a 0.08 m.a. Son explicados como el resultado de procesos climáticos y orbitales. (Emery y Myers et al.,1996; Krause, 1996).

Tabla 5. Terminología, duración y jerarquía de ciclos o secuencias. Modificado de Kerans y Tinker (1997).

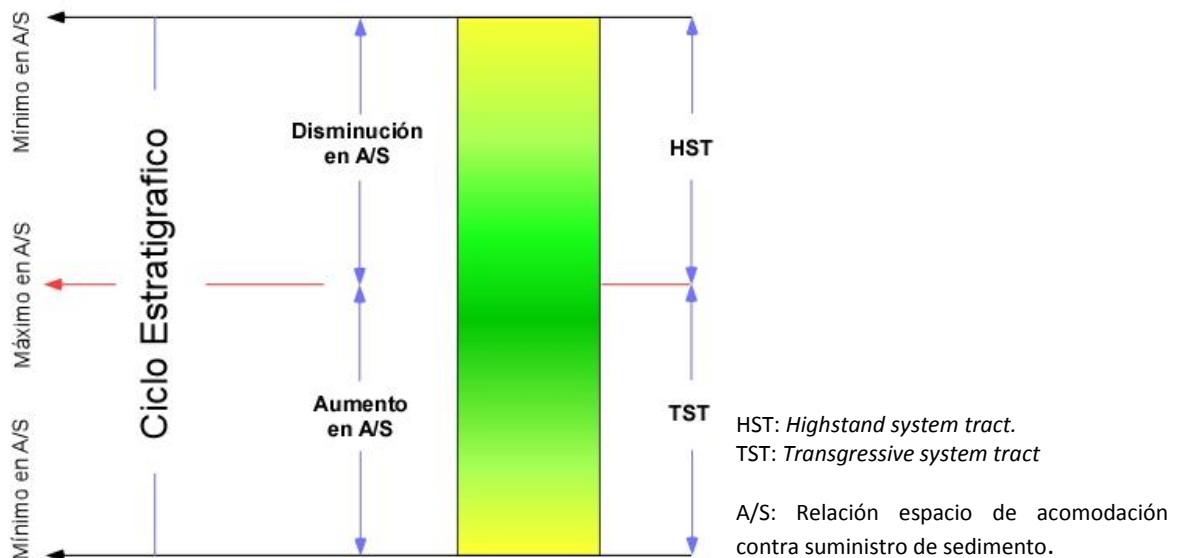
Orden de Ciclo Eustático o Tectono-eustático	Unidad estratigráfica secuencial	Duración (ma)
I ORDEN	Megasecuencia	> 100
II ORDEN	Supersecuencia	10-100
III ORDEN	Secuencia depositacional Secuencia compuesta	1-10
IV ORDEN	Parasecuencias Set de parasecuencias Secuencia de alta energía	0,1-1
V ORDEN	Parasecuencia Ciclo de alta frecuencia	0.01-0,1

Fuente: Porras, J.S. (2003).

El principio utilizado en este estudio es reconocer tendencias unidireccionales de aumento o disminución en la relación espacio de acomodación (A) contra suministro de sedimento (S). Entender que un ciclo estratigráfico completo cualquiera que sea la frecuencia, registra tanto el tiempo de incremento como el de disminución en A/S y que el ciclo puede estar representado solo por intervalos

de roca más superficies o solo por superficies (Figura 11). Una equivalencia de estos ciclos con la terminología de Van Wagoner *et al.* (1988) propuesta por Reyes *et al.* (1998) y Fajardo *et al.*, (2000), sugiere que las rocas depositadas durante una disminución en A/S correspondan al *highstand system tract* (HST) y las rocas depositadas durante el aumento en A/S correspondan al *transgressive system tract* (TST).

Figura 11. Representación de un ciclo estratigráfico y su equivalencia con la terminología de Van Wagoner *et al.* (1988). Los máximos en A/S pueden coincidir con superficies de máxima inundación, los mínimos en A/S con superficies de inconformidad o también pueden marcar el punto de mayor progradación o somerización de la cuenca.



Fuente: Reyes *et al.* 1998.

## 11.1 DEFINICIÓN DE CICLOS ESTRATIGRÁFICOS

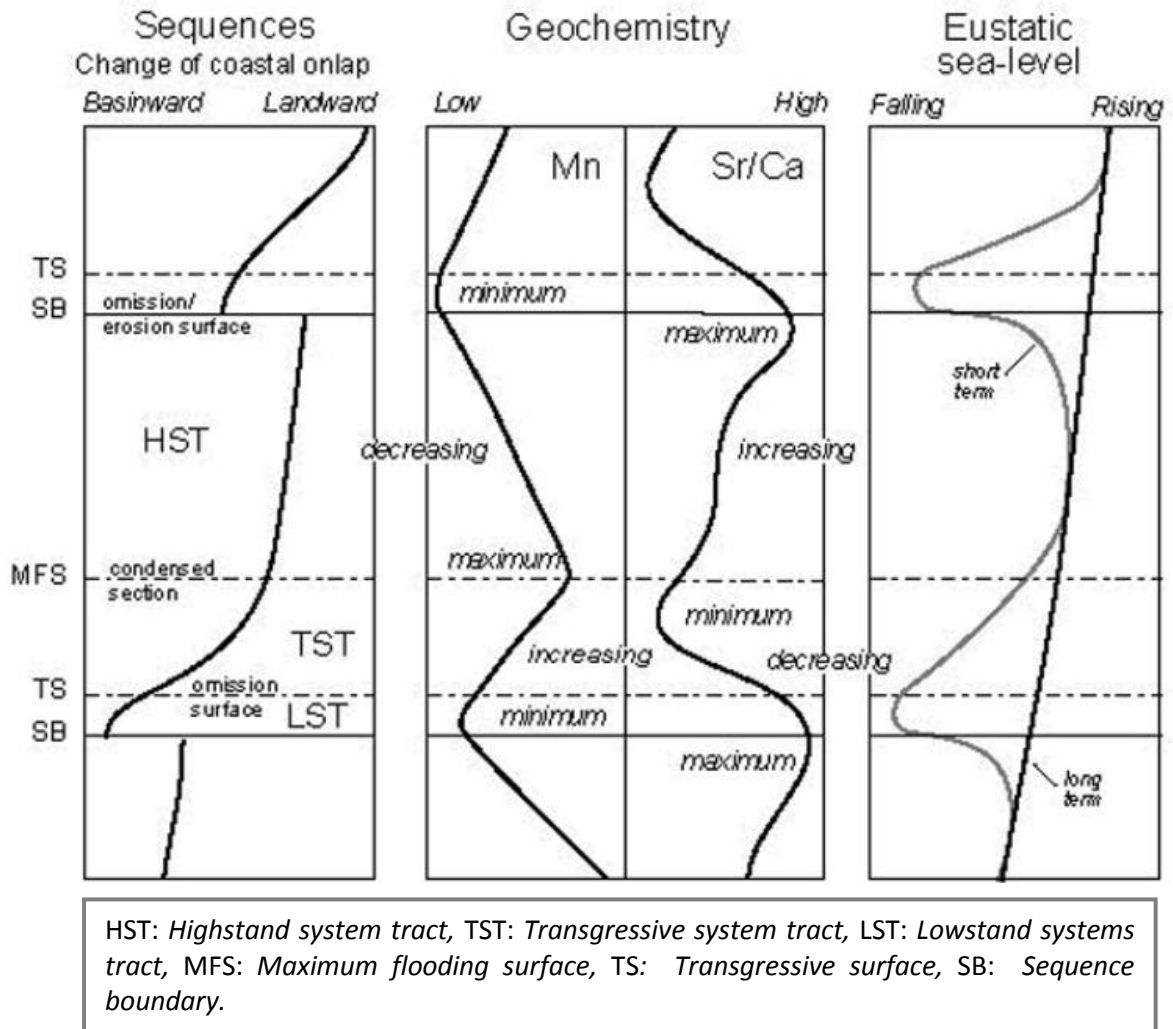
El concepto de ciclo estratigráfico utilizado en este estudio se define entre dos eventos de mínima relación A/S, de esta manera el ciclo estratigráfico registra el tiempo de aumento y luego de disminución en A/S (Figura 11). Una razón para definir los ciclos estratigráficos entre eventos de mínima relación A/S o mínima profundización, es que los límites entre las diferentes edades en la mayor parte de los casos coinciden casi siempre con estos eventos. Rangel, A. et al. (2000).

En conjunto con la relación A/S en determinación de ciclos estratigráficos, en este estudio se utilizaron parámetros químicos para determinar secuencias estratigráficas según lo establecido por Jarvis et al. (2001) donde establecen un modelo para identificar conjunto de sistemas depositacionales y cambios del nivel del mar a través de la quimioestratigrafía de carbonatos principalmente con la combinación de datos de los elementos Si, Ti, Sr, Mn, Ca y Al.

Según este modelo el conjunto de sistemas transgresivos (TST por sus iniciales en inglés) poseen los mayores valores Mn en contraste con los conjuntos de sistemas de ascenso del nivel del mar (HST por sus iniciales en inglés) que poseen disminución de Mn. Las máximas superficies inundación (MFS por sus iniciales en inglés) se caracterizan por un alto contenido de Mn, Sr/Ca y Ti (Ti/Al), y las superficies transgresivas (TS por sus iniciales en inglés): bajo Mn y alto Ti (Ti/Al)

Las relaciones estratigráficas entre Mn y Sr/Ca en los carbonatos, unidades estratigráficas y cambios eustáticos del nivel del mar se ilustran en la figura 12.

Figura 12. Proporción entre parámetros químicos Mn, Sr/Cr, secuencias estratigráficas y ciclos del nivel del mar. Modelo por Haq et al., (1988) en Mabrouk et al. (2007).



Fuente: Mabrouk et al., (2007).

## **11.2 ANALISIS ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA**

Para describir la estratigrafía general se tomaron en cuenta ciclos estratigráficos de alta frecuencia (3er orden). Dichos ciclos se determinaron con criterios sedimentológicos y químicos (Figura 13).

A partir del estudio estratigráfico de las secciones de estudio se obtuvo la sucesión calibrada de la Formación La Luna comprendida entre el Cenomaniano y el Santoniano. La interpretación propuesta está basada en análisis de facies (carácter litológico, contenido de carbonatos, fosfatos, presencia de minerales y patrones de acomodación, etc.) y facies litológicas petrográficas (contrastes de color, textura, etc.) así como criterios paleoecológicos, correlacionados con datos de químicos de elementos mayores, menores y trazas para la identificación de superficies estratigráficas claves y cambios relativos del nivel del mar.

La aplicación de estas metodologías de análisis secuencial ha permitido identificar nueve secuencias deposicionales en la Formación La Luna y sus conjuntos de sistemas depositacionales asociados. En las secciones estudiadas (Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena) el contenido de silicio, aluminio, titanio, estroncio y calcio han permitido proponer siete límites de secuencia (SB por sus iniciales en inglés) y sus respectivas superficies de máxima inundación (MFS por sus iniciales en inglés). El anexo B permite observar los ciclos estratigráficos y secuencias estratigráficas identificadas en la Formación La Luna.

Los conjuntos de sistemas de ascenso del nivel del mar (HST por sus iniciales en inglés) se caracterizan por presentar una disminución de Manganeseo (Mn) y un aumento progresivo para la relación de Estroncio-Calcio (Sr/Ca). Durante condiciones relativamente estables del nivel mar, la producción de carbonatos es mínima por procesos de somerización. Mejoras en la circulación de las aguas

contribuyen a condiciones menos anóxicas generando una disminución en la conservación de materia orgánica. Tomado textualmente de Soto et al, (2006).

El Miembro Galembo refleja pequeños cambios del nivel del mar, pero caracterizado principalmente por la aparición de niveles fosfáticos (facies *packstone* fosfático y *wackstone-packstone* ricos en fosfatos), representado por mínimos de A/S, los cuales están relacionados con un HST en condiciones relativamente estables del nivel del mar y evidenciado por la poca producción de carbonatos la cual es restringida al formarse mejores condiciones ambientales durante el proceso de la somerización. Valores altos en elementos traza de Vanadio (V), característico para determinar secciones fosfáticas confirman la alta presencia de fosfatos en el Miembro Galembo (Ver Tabla 4).

Los conjuntos de sistemas transgresivos (TST) se caracterizan por tener valores mínimos de Manganeso (Mn) y valores de Silicio-Aluminio (Si/ Al) y Titanio-Aluminio (Ti/Al) que aumentan hasta lograr máximos durante las máximas superficies de inundación (MFS). Cuando se presenta un aumento relativo del nivel del mar esto produce una disminución de la productividad de los carbonatos y a la formación de condiciones ideales para la preservación de materia orgánica (condiciones de fondo agotadas en oxígeno y/o mayor productividad orgánica. Estos representan los eventos de mayor anoxia durante la deposición de la Formación La Luna, (Soto et al, 2006).

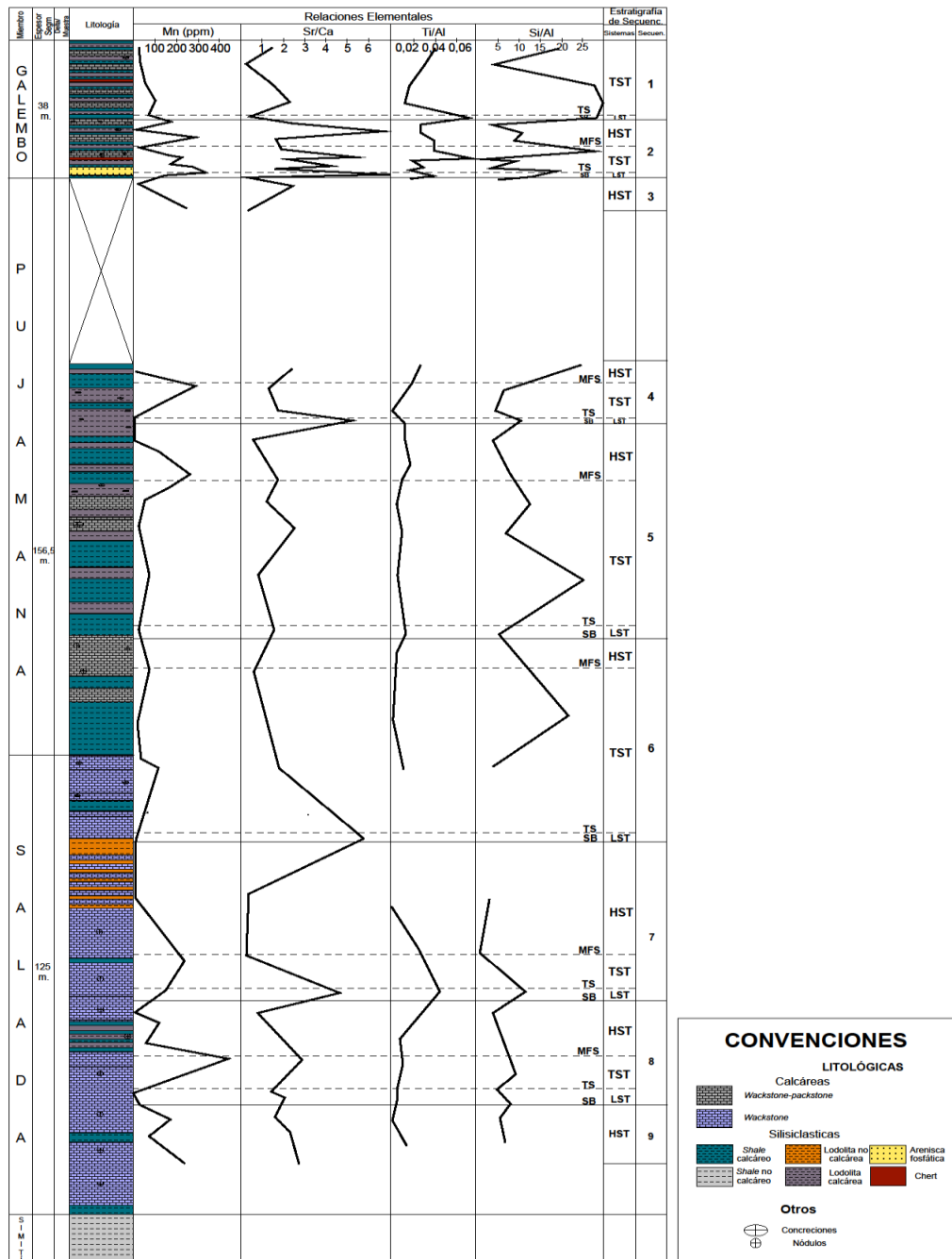
El miembro Pujamana se caracteriza en este estudio por presentar una zona con incremento en la relación A/S, donde las capas de *shale* alcanzan espesores hasta de 2 metros, y quimioestratigráficamente está representado por un aumento del nivel del mar (TST) característico en toda la sección y el cual se puede apreciar en las facies *shale* y lodolita calcárea laminada fosfática y *wackstone-packstone* de foraminíferos y restos fósiles, donde se encuentra alto contenido y preservación de materia orgánica; dicho contenido de materia orgánica se puede

apreciar en un aumento de los valores de elementos traza (U y Th) en la sección Pujamana con relación a los miembros Salada y Galembo.

Los conjuntos de sistemas transgresivos (TST), culminan con la superficie de máxima inundación (MFS), que corresponde a una sección condensada hacia la cuenca, que contiene el máximo de organismos y diversidad planctónica.

La transición de los *shale* no calcáreos de la Formación Simití a las calizas tipo *wackstone* pobremente laminados intercalados con *shale* calcáreos, los cuales presentan disminución de A/S y caracterizado por pequeños cambios del nivel del mar están relacionados con la existencia de condiciones restringidas con alta productividad de materia orgánica, el cual se aprecia en las facies de este miembro por la abundante presencia de foraminíferos planctónicos.

Figura 13. Modelo estratigráfico representativo del sistema de secuencias asociado a la Formación La Luna en la sección Quebrada La Sorda, integrando la información sedimentológica (textura y composición) y quimioestratigráfica (Mn, Sr/Ca, Si/Al y Ti/Al).



Fuente: Autores

### 11.3 ANÁLISIS DEPOSITACIONAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA

El intervalo de tiempo geológico comprendido entre el Cenomaniano y el Santoniano representado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena, Colombia por la Formación La Luna y que ha sido correlacionado con los eventos oceánicos anóxicos globales, OAE2 y OAE3 (oceanic anoxic event, Jenkins, 1980, en Villamil, 1998) identificados a escala mundial.

El siguiente análisis pretende explicar las condiciones bajo las cuales se depositaron los sedimentos ricos en materia orgánica y fosfatos encontrados en la Formación La Luna, la cual difiere de parámetros sedimentológicos:

El miembro Salada, el cual comprende los últimos 125 metros del levantamiento estratigráfico en la sección Quebrada La Sorda y que también aflora en la sección Quebrada Agua Buena, está representado texturalmente por una secuencia calcárea con laminación fina y una fauna casi en su totalidad de foraminíferos planctónicos (facies *shale* y lodolitas calcáreas laminadas ligeramente fosfáticas) indicadores de un ambiente de sedimentación de baja energía. La laminación de foraminíferos planctónicos principalmente con láminas de materia orgánica es el resultado de una sedimentación por suspensión generado por diferencia de densidades. En general, la depositación de los *wackstone* de foraminíferos identificados en las facies del Miembro Salada ocurrió en una plataforma carbonatada de tipo rampa poco profunda. Durante este periodo prevalecieron condiciones disóxicas a subóxicas producto de la circulación restringida, que favorecieron la acumulación y preservación de la materia orgánica.

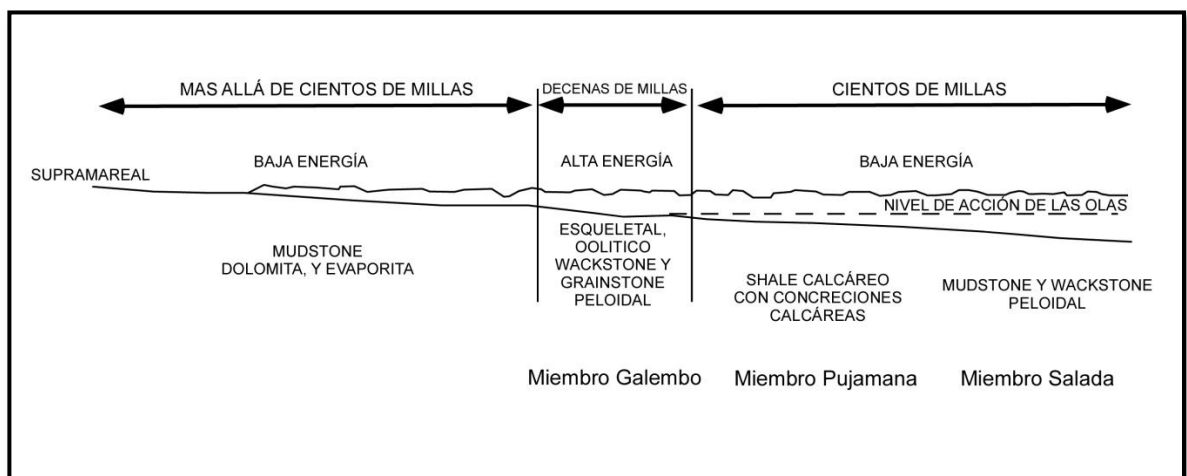
El miembro Pujamana, que va desde los 125.0 metros hasta los 281,50 metros en el intervalo estratigráfico de la sección Quebrada La Sorda. La textura de los sedimentos, el menor carácter calcáreo, así como la laminación presente en la totalidad de las muestras analizadas del miembro, son evidencia de condiciones más profundas en la plataforma carbonatada. Las litofacies (*shale* y lodolita

calcárea laminada fosfática), ratifican este análisis. El alto contenido de materia orgánica así como la presencia de pirita en los sedimentos, evidencian una alta productividad y condiciones subóxicas a anóxicas las cuales favorecieron la acumulación y preservación de materia orgánica.

El miembro Galembó, que representa los últimos 38 metros del levantamiento en la sección Quebrada La Sorda, de una textura gruesa representada por las litofacies *packstone* fosfático y *wackstone-packstone* ricos en fosfatos. Estas litofacies corresponden al nivel más somero dentro de la plataforma de carbonatos en las cuales tuvo lugar la sedimentación de la Formación La Luna, en donde el incremento de fosfatos indica corrientes de surgencia y alta productividad primaria en un ambiente subóxico. Rangel, A. et al. (2000).

El cambio textural evidenciado en toda la secuencia, desde las facies más finas del Miembro Salada a más gruesas en Galembó, muestran el cambio de un sistema de baja a media energía a uno de alta energía. (Figura 14).

Figura 14. Ambiente de depositación de la Formación La Luna. Modificado de Handford (AAPG, 1993) en Esparza, E. & Pineda, E. (1999).



Fuente: Esparza, E. & Pineda, E. (1999).

#### **11.4 FORMACIÓN LA LUNA COMO ROCA GENERADORA DE HIDROCARBUROS: SU IMPORTANCIA EN LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA (VMM) Y LAS PERSPECTIVAS A FUTURO.**

La importancia de la Formación La Luna en el desarrollo hidrocarburífero de la Cuenca del VMM ha sido reconocida tiempo atrás por diversos autores. Esta unidad forma parte del sistema petrolífero que es el mejor documentado de la cuenca y el que ha aportado mayor cantidad de hidrocarburos.

Las propiedades como roca fuente de hidrocarburos de la Formación La Luna observadas en este trabajo son comparables con consideraciones previas realizadas por Rangel, A. et al. (2000) en esta formación. Los espesores, la litología y parámetros químicos documentados por estos autores se ajustan a los reconocidos para las secciones estudiadas (Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena).

Hasta el momento, todos los enfoques con respecto a la Formación La Luna desde el punto de vista del petróleo han sido considerados en esta unidad como roca fuente de hidrocarburos, sin embargo el gran desarrollo a nivel mundial de los yacimientos no convencionales de “*oil-shale*” y “*gas-shale*” impulsan a estudiar secuencias sedimentarias que antes pasaban desapercibidas como roca reservorio. Los yacimientos petroleros asociados a *shales* no representan un descubrimiento reciente, sino que dada la demanda de combustibles por el aumento del consumo, los crecientes precios internacionales de los hidrocarburos y el avance de los métodos de extracción permitieron difundirlos a regiones en donde no eran considerados. En los Estados Unidos este tipo de yacimientos generó un aumento de las reservas de gas natural probadas cercano al 50% en un año, pasando de 1.342 trillones de pies cúbicos (TPC) a 2.011 TCP entre 2007 y 2008 (Palacios, 2011). Se estima que para el año 2035 el *gas-shale* aportará un 20 a 23 % de la producción de gas natural de ese país (Palacios, 2011).

Uno de los más importantes yacimientos de *gas-shale* a nivel mundial es el que se registra en la Formación Barnett Shale en la Cuenca de Fort Worth en Texas (EEUU), con una producción acumulada en el año 2003 cercana a los 0,8 TPC de gas (Montgomery *et al.*, 2005; Hill *et al.*, 2007) y reservas probadas por más de 2,5 TCP de gas (Pollastro *et al.*, 2004). Esta formación posee un espesor variable que va de los 3 a 9 metros en su parte menos espesa hasta los 300 metros, y se compone de lutitas calcáreas que alternan con niveles de caliza (Montgomery *et al.*, 2005; Rodríguez, 2011). Se habría depositado en ambientes en condiciones anóxicas a disóxicas (Ruppel y Loucks, 2006).

En comparación, la Formación La Luna posee todos los atributos necesarios para incorporarse a esta nueva visión exploratoria, ya que está probada su capacidad como roca fuente de hidrocarburos. Por otro lado, posee buenas características litológicas y geoquímicas que de manera similar a otros yacimientos se registran en los *shales* de este tipo y como complemento tiene espesores importantes en una gran superficie areal en zonas de la cuenca. Además, en la sección media de la formación (Miembro Pujamana) se registró la presencia de más de 100 metros continuos de *shales* ricos en materia orgánica que poseen un comportamiento frágil, lo que amplía la expectativa de búsqueda en estos depósitos, ya que el método de extracción de hidrocarburos no convencionales se basa en la fracturación de las rocas (Cartwright, 2011). En este sentido, estudios recientes se han enfocado en modelar “*target shales*” a partir de datos de campo con análogos o modelos teóricos para evaluar la posibilidad de predecir la distribución de fracturas.

## CONCLUSIONES

- La Formación La Luna, presente en el costado oriental del Valle Medio del Magdalena se estudió en las secciones Quebrada La Sorda y Quebrada Agua Buena. Se levantó para la sección Quebrada La Sorda un espesor total de 319.50 metros, mostrando sus tres miembros de base a tope: El Miembro Salada con 125 metros, Miembro Pujamana con 156.50 metros y Miembro Galembó con 38 metros; mientras para la sección Quebrada Agua Buena se levantó 24.45 metros en los que están expuestos parte de los miembros Salada y Pujamana.

- En las secciones Quebrada la Sorda y Quebrada Agua Buena se definieron un total de nueve facies litológicas características de la Formación La Luna de acuerdo con evidencias petrográficas: *Packstone* fosfático, *wackstone - packstone* ricos en fosfatos, *shale* y lodolita calcárea laminada ligeramente fosfática, *wackstone - packstone* de foraminíferos y restos fósiles, *shale* y lodolita calcárea laminada fosfática, *wackstone* pobremente laminado, lodolita gris físil y facies chert.

- Se ha planteado una posible hipótesis acerca del ambiente de depositación para la Formación La Luna, de acuerdo a evidencias petrográficas que indican que en la en esta zona de la cuenca del Valle Medio del Magdalena existió una plataforma carbonatada restringida, como se aprecia en la figura 14.

- Por medio del análisis microscópico de secciones delgadas, se correlacionaron las facies litológicas de las dos secciones estudiadas, determinando para la sección Quebrada Agua Buena litologías correspondientes a la base del Miembro Pujamana y el tope del Miembro Salada. Resultado de esto, muestra que los

afloramientos de la sección Quebrada Agua Buena pudieron haber estado expuestos a procesos subaéreos generados durante la formación de las rocas carbonáticas de la Formación La Luna, ya que presentan características texturales un poco variables a las de la sección Quebrada La Sorda, principalmente por la presencia de microesparita.

- Mediante el análisis químico de elementos mayores (Mn, Sr, Si, Ti y Al) y sus relaciones (Sr/Ca, Si/Al y Ti/Al) se identificaron para la Formación La Luna ciclos estratigráficos de tercer orden (alta frecuencia) con siete secuencias deposicionales y sus conjuntos de sistemas depositacionales asociados.

- Se encontró para el Miembro Salada y Miembro Pujamana de la Formación La Luna valores mayores de elementos traza como Uranio (U) y Torio (Th) indicando contenidos de carbonatos, presencia y conservación de materia orgánica, en comparación con el Miembro Galembó que presenta concentraciones altas de Vanadio (V) confirmando la alta presencia de fosfatos característico de este miembro.

- El presente proyecto permitió la integración de áreas distantes, tratadas individualmente hasta la fecha. Como herramienta útil aplicada en este trabajo, está la quimioestratigrafía, que basada en la aplicación de conceptos de estratigrafía de secuencias permite establecer modelos estratigráficos y sedimentológicos más consistentes, así como predecir en una forma más acertada la distribución de las facies principalmente en rocas generadoras de hidrocarburos, ya que favorecen la evaluación del potencial petrolero, tendiendo a reducir los factores de riesgo en la exploración petrolera, y también servirá de base para la delimitación y evaluación de reservas.

- La Formación La Luna posee atributos litológicos y composicionales como presencia de *shales* calcáreos y Calizas ricos en materia orgánica y fosfatos para incorporarse al nuevo horizonte exploratorio: Yacimientos de hidrocarburos no convencionales. Las características litológicas, texturales, químicas, los importantes espesores y la gran distribución areal hacen que esta unidad sea muy propicia para la búsqueda de nuevas reservas hidrocarburíferas en la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

## RECOMENDACIONES

- Comparar e incorporar la interpretación realizada en el presente estudio con modelos estratigráficos–secuenciales regionales existentes a fin de proveer un modelo crono-estratigráfico integrado para la cuenca o para dominios estratigráficos similares.
- Utilizar las superficies claves, secuencias y conjuntos de sistemas depositacionales como base para la elaboración de correlaciones, subdivisión en paquetes o unidades estratigráficas e interpretación estratigráfica en el área.
- Realizar estudios que ayuden a generar zonas de distribución de fracturas para facilitar la exploración de hidrocarburos no convencionales (shale-oil y shale-gas) en esta zona de la cuenca.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Alberdi, M. Y Martínez, M.** (1999). Introducción a la quimioestratigrafía y la geoquímica de yacimientos. Facultad de ciencias, Escuela de Geoquímica. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

**Allen, R. B. et al. (1994).** Geology and hydrocarbon potential of the Cordillera Oriental, Colombia. Earth sciences and resources Institute, University of South Carolina, University of Utah. Vol. 2, regional stratigraphy, 180 p.

**Bentor, Y. K.** (1980). Phosphorites, the unsolved problems. Society for economic, paleontologist and mineralogist. Special publication, 29. pp. 3–18.

**Bermúdez, E., López, M. Y Troconis, E.** (2003). Estudio de litofacies, diagénesis, procedencia y quimioestratigrafía de la Formación Cerro Pelado, cuenca de Falcón como una herramienta para determinar su potencial generadora y almacenadora de hidrocarburos, Caracas. Facultad de ingeniería, escuela de geología, minas y geofísica. Universidad Central de Venezuela.

**Bernal, L. A.** (2009). Caracterización estratigráfica y petrográfica de la Formación La Luna en el Sector de El Tablazo, Valle Medio del Magdalena. Universidad Nacional de Colombia.

**Boggs, S. JR.** (1992). Petrology of sedimentary rocks. Maxwell Macmillan, 707 p.

**Calvert, S. And Pedersen, T.** (1996). Sedimentary geochemistry of manganese: implications for the environment of formation of manganiferous black shales. Economic geology 91, pp. 36-47.

**Cardozo, E. Y Ramírez, C.** (1985). Ambientes de depósitos de la Formación Rosa Blanca, áreas de Villa de Leiva. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo XIII,: 1-13. Bogotá.

**Carvajal, H.** (2004). Nuevas consideraciones acerca del estado de madurez termal de la Formación La Luna en el Valle Medio del Magdalena, Colombia.

**Cartwright, J.** (2011). Diagenetically induced shear failure of fine-grained sediments and the development of polygonal fault systems. *Marine and petroleum geology* 28, pp.1593 – 1610.

**Cediel, F.** (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional. Boletín Geológico, 16 (1-3) : 5-96. Bogotá.

**Centro de estudios regionales UIS.** (2000-2009). Plan de Ordenamiento Territorial de San Juan de Girón 2000-2009. Diagnóstico.

**Clavijo, J.** (1985). Secuencia facial de la Formación Los Santos por la Quebrada Piedra Azul: Registro de una hoya fluvial evanescente. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas (16) Capítulo IV, : 1-18. Bogotá.

**Cooper, M.A. et al.** (1995) Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bull*, Vol. 79 No. 10, pp. 1421-1443.

**Cruz, L. E.** (1991). Cartografía de rocas sedimentarias, guías de campo I. Escuela de geología, Universidad Industrial de Santander.

**Dengo, C. And Covey, M.** (1993) Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for trap styles and regional tectonics. AAPG Bulletin, Vol. 77 No. 8, pp. 1315-1317.

**De Porta, J.** et al., (1974). Lexique Stratigraphique International. Centre National Recherche Scientifique. Volume V. Amerique Latine, fascicule 4b, Colombie, 692 p. París.

**Dos Santos, et al.** (2003). Caracterización diagenética de la Formación La Luna, en la sección de la Quebrada Chiriría, estado de Táchira, Venezuela. Revista Geogaceta 33.

**Dunham, R. J.** (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. AAPG Memoirs.

**Emery D. And Myers K.J.** (1996). Sequence Stratigraphy, Blackwell Science Ltd., p. 134-177.

**Esparza, E. Y Pineda, E.** (1999). Calidad de roca fuente de petróleo y facies orgánicas del Cretácico superior: Formación La Luna (Cuenca del Valle Medio del Magdalena), Formación Conejo y Grupo Guadalupe (Cordillera Oriental). Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

**Etayo, F.** (1968). El Sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. Universidad Nacional de Colombia. Geología Colombiana, (5) : 3-74. Bogotá.

**Etayo, F. Y Rodríguez, G.I.** (1985). Edad de la Formación Los Santos. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo XXVI, : 1-12. Bogotá.

**Fajardo A., Rojas L. Y Cristancho J.** (2000). Definición del modelo estratigráfico en el intervalo cretáceo tardío a mioceno medio en la Cuenca Llanos Orientales y Piedemonte Llanero. Informe inédito Ecopetrol.

**Galloway, W.E.** (1989). Genetic stratigraphic sequences in basin analysis; II, Application to Northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin: AAPG Bulletin, v. 73-2,

**Galvis, N. Y Rubiano, J.** (1985). Redefinición estratigráfica de la Formación Arcabuco, con base en el análisis facial. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo VII, : 1-16. Bogotá.

**Garcia, M.** (2010). Shale gas potential in the Eastern Cordillera of Colombia. Search and Discovery article, No.10286.

**Garner, A. H.** (1926). Suggested nomenclature and correlation of geological formations in Venezuela. *Amer. Inst. Min. Metall. Eng.*, pp. 677-684.

**González, A. Y Sánchez C.A.** (1999). Potencial de generación de hidrocarburos de las formaciones La Luna y Umir en el Flanco Oriental del Valle Medio del Magdalena. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

**Hubach, E.** (1957a) (escrito en 1951). Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. *Bol. Geol., Inst. Geol., Nal.*, vol. 5, nº 2, pp. 93-112, 2 lám., Bogotá.

**Hubach, E.** (1957b). Contribución a las Unidades Estratigráficas de Colombia. *Inst. Geol. Nal.*, informe nº 1212 (inédito), 166 pp., Bogotá.

**Jarvis, I., Murphy, A. and GALE, A.** (2001). Geochemistry of pelagic and hemipelagic carbonates: criteria for identifying systems tracts and sea-level change. *Journal of the Geological Society* 158, pp. 685-696, London.

**Julivert, M.** (1961). Las estructuras del Valle Medio del Magdalena y su significación. Universidad Industrial de Santander. *Boletín de Geología*, (6) : 33-52. Bucaramanga.

**Julivert, M.** (1968). *Lexique stratigraphique international Amérique Latine*. Colombie. Centre National de la Recherche Scientifique Vol. Fascicule 4<sup>a</sup>. Paris.

**Krause F.** (1996). Caracterización Geológica de la Estratigrafía por Secuencias. II AAPG/SVG Curso No. 4, 133 p.

**Laverde, F.** (1985). La Formación Los Santos: Un depósito continental anterior al ingreso marino del Cretácico. Proyecto Cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas*, (16) Capítulo XX, : 1-22. Bogotá.

**Laverde, F. Y Clavijo, J.** (1985). Análisis facial de la Formación Los Santos, según el corte de «Tu y Yo» (Zapatoca). Proyecto Cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas*, (16) Capítulo VI, : 1-9. Bogotá.

**Lindholm, R. C. and Finkelman, R. B.** (1972). Calcite staining: semiquantitative determination of ferrous iron. *J. Sed. Petrol.*, 42: 239-245.

**Mabrouk, A., Jarvis, I., Belayouni, H., Murphy, A. and Moody, R. T.** (2007). Sequence Stratigraphy, Sea Level Change and Palaeoenvironments via Chemostratigraphy: Regional to Global Correlations. *Search and Discovery Article*.

**Mendoza, H.** (1985). La Formación Cumbre. Modelo de transgresión marina rítmica, de comienzos del Cretácico. Proyecto Cretácico. Publicaciones Geológicas Especiales Ingeominas, (16) Capítulo IX,: 1-17. Bogotá.

**Miall, A.D.** (1990). Principles of sedimentary basin analysis: Nueva York, Springer-Verlag, 668 p.

**Montes, C.** (2003). La Evolución Tectónica Meso-Cenozoica de la Cordillera Oriental: Una Hipótesis Alternativa. Convocatoria Docente UIS.

**Montgomery, S.L., Jarvie, D., Bowker, K., And Pollastro, R.** (2005). Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multitrillion cubic foot potential: AAPG Bulletin, v. 89, p. 155-175.

**Morales, L.** (1958). General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia. In: Habitat of Oil Symposium. American Association of Petroleum Geologists, pp. 641-695.

**Notestein, F. B., Hubman, C. W. and Bowler J. W.** (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America, Geol. Soc. Am., Bull., 55(10): 1165-1216.

**Palacios, A. L.** (2011) Shale gas transforma la matriz energética de Norteamérica. Revista Energía y Debate Nº 42, 6 - 9. México.

**Pollastro, R., et al.** (2004). Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Bend Arch-Fort Worth Basin Province of North-Central Texas and southwestern Oklahoma: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2004-3022, 2 p.

**Potter, P. E.** (1967). Sand bodies and sedimentary environments: A review. AAPG Bull, 51, 337-365.

**Porras, J.S.** (2003). Estratigrafía secuencial del Oligo-mioceno, bloques oritupano-leona y mata-acema, área mayor de oficina, cuenca oriental de Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.

**Rangel, A., Parra, P. And Niño, C.** (2000). The La Luna formation: Chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. Organic Geochemistry, 31, 1267-1284.

**Renzone, G.** (1962). Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al Este y Sureste de Bogotá. *Bol. Geol.*, vol. 10, nº 1-3, pp. 59-79, 1 map., Bogotá.

**Reyes, J., Fajardo, A. and Rubiano, J.** (1998). Evaluación Regional del Cretáceo de Plataforma en el Valle Medio del Magdalena. Unpublished Ecopetrol Report, 1-138.

**Rodríguez, N.** (2011). Estudio del origen y madurez de gases generados por el Barnett Shale, cuenca Fort Worth, Texas. Revista Energía y Debate Nº 44: 46 -50. México.

**Rolon, L.** (2004). Structural Geometry of the Jura-Cretaceous rift of the middle Magdalena Vally Basin – Colombia. 2004. Tesis Grado Maestria Ciencias en Geologia. Morgantown, WV.

**Ruppel, S., and Loucks, R.** (2006). Stratigraphy and depositional history of the Barnett Formation and equivalent Mississippian rocks in the Ft. Worth Basin (abs.): Geological Society of America, South-Central Section, Abstracts with Programs, v. 38, no. 1, p. 3. 2006.

**Soto, G; Zapata, E; Kertzus, V.** (2006). Identificación de Tractos Sedimentarios en sedimentos pelágicos mediante métodos geoquímicos. Formación La Luna, Occidente de Venezuela. Geogaceta, 39, 7-10.

**Taboada, A., et al.** (2000) Geodynamics of the Northern Andes: Subductions and Intracontinental Deformation, Colombia. Tectonics, vol 19(5), pag.787-813.

**Taborda, B.** (1952). Geología del área Confines-Charalá, Dpto de Santander. Informe Empr. Col. Petr. (inédito).

**Talukdar, S. C., Gallango, O. And Ruggiero, A.** (1985): La Luna and Querecual formations of Venezuela; petroleum reservoir rocks. Sociedad Venezolana de Geólogos, Caracas. VI Congreso Geológico Venezolano, 6, p.3606-3642.

**Triviño, J. A.** (1982). Evolucion de la depresión del rio magdalena. Compliacion geologica bibliográfica. Ciaf.

**Tucker, M. And Wright, V. P.** (1990). Carbonate Sedimentology. p. 284-312.

**Van Der Hammen, T.** (1958). Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continental y tectogénesis de los Andes Colombianos. Inventario Geológico Nacional. Boletín Geológico, 6 (1-3) : 67-128. Bogotá.

**Van Wagoner J. et al.** (1988). An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions special publications – Society of economic paleontologists and minerologist, 42 pp. 39-45.

**Vera, J.A.** (1994). Estratigrafía Principios y Métodos. Rueda, Madrid, 806 p.

**Walker, R. G. And James, N. P.** (1992). Facies Models: Response to sea level change.

**Ward et al.** (1977). Mapa geológico del cuadrángulo H12, Bucaramanga. Ingeominas.

**West, J.** (1996). International Petroleum Encyclopedia. Pennwell Publishing Co., Tulsa, p. 110, 186–187.

**Wheeler, O.** (1929). Report on the Palmira Series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama and la Paz Formation near the Eastern part of the Mares Concession. Int. Emp. Col. Petr. (inédito).

**Zumberge, J.** (1984). Source Rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley, Colombia. In Palacas J. (Ed.). Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology No.18, pp. 127-133.

## **ANEXOS**

**(SE ENTREGAN DE MANERA DIGITAL)**