DEFINICIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS PARA LA FORMACIÓN LA LUNA (VMM), BASADA EN EL ANÁLISIS DE AFLORAMIENTO Y SU CORRELACIÓN CON EL SUBSUELO

LUZ ELENA RUEDA ACEVEDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2016

DEFINICIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS PARA LA FORMACIÓN LA LUNA (VMM), BASADA EN EL ANÁLISIS DE AFLORAMIENTO Y SU CORRELACIÓN CON EL SUBSUELO

LUZ ELENA RUEDA ACEVEDO

Tesis de Grado para optar el título de Master en Geología

DIRECTOR
ALBERTO ORTIZ FERNÁNDEZ
Geólogo MSc.

CO-DIRECTOR
GERMAN DAVID MEZA CÁCERES
Geólogo MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2016

DEDICATORIA

A Dios, por haber puesto en mi camino amigos, situaciones y personas especiales que contribuyeron de alguna manera en la realización de este proyecto.

A mis Padres y hermanos, por su apoyo y motivación.

A mi esposo Carlos Andrés, por su acompañamiento, paciencia, dedicación e incondicional apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mi director Alberto Ortiz y codirector German Meza, por su colaboración durante la realización de este proyecto.

A Juan José Gómez, Daniel Rincón, Milton Rueda, Edwar Salazar, Claudia Santos y Roberto Terraza, por haber contribuido con su conocimiento al desarrollo de este trabajo de investigación.

Agradezco muy especialmente a mi amigo Ricardo Andrés Gómez M, quien con su conocimiento, motivación y apoyo incondicional me ayudo a emprender y culminar de manera exitosa este proyecto.

Además agradezco a todas aquellas personas que de alguna manera sirvieron de apoyo técnico y emocional, motivándome a seguir adelante en el desarrollo de esta investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	18
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	18
1.3 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	19
1.4 OBJETIVO PRINCIPAL	19
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. MARCO DE REFERENCIA	21
2.1 FLUJO DE TRABAJO PARA UN ANÁLISIS DE ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS	22
2.1.1 Contexto tectónico (tipo de cuenca sedimentaria)	23
2.1.2 Ambiente depositacional	25
2.1.3 Marco de estratigrafía de secuencias	28
3. LOCALIZACIÓN Y ANTECEDENTES	31
3.1 LOCALIZACIÓN	31
3.2 MARCO TECTONO - ESTRATIGRÁFICO	32
3.3 ESTUDIOS PREVIOS	35
4. METODOLOGÍA	40
5. RESULTADOS	43

5.1 TRABAJO DE CAMPO 43

5.2 DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA. 44

5.2 DEFINICIÓN DE FACIES 53

5.4 ANÁLISIS BIOESTRATIGRÁFICOS 69

5.5 ASOCIACIÓN DE FACIES Y AMBIENTE DE DEPÓSITO. 71

5.6 DEFINICIÓN DE CICLOS ESTRATIGRÁFICOS 77

5.7 RESPUESTA DE REGISTROS ELÉCTRICOS. 83

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS 86

6.1 INTERPRETACIÓN DEL MARCO CRONOESTRATIGRÁFICO 86

6.2. CONTROLES ESTRATIGRÁFICOS Y ANÁLISIS DEPOSITACIONAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA 90

6.3 ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE AFLORAMIENTO A SUBSUELO 94

7. DISCUSIÓN 101

8. CONCLUSIONES 106

9. RECOMENDACIONES 110

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 111

BIBLIOGRAFÍA 117

ANEXOS 122

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Contribución de diferentes sets de datos para la Interpretación de la estratigrafía de secuencias. 22

Figura 2. Modelo de la geometría estructural del Jurásico en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena..... 24

Figura 3. Esquema generalizado de la evolución de los andes Colombianos durante la época del CretácicoSuperior. 26

Figura 4. Ambientes depositacionales de Cretácico Superior en las cuencas de Colombia..... 28

Figura 5. Marco de Secuencia estratigráfica para una plataforma carbonatada . 30

Figura 6. Localización del Valle Medio del Magdalena, Colombia y área de estudio.. 32

Figura 7. Diagrama cronoestratigráfico para la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. 34

Figura 8. Metodología desarrollada en este estudio. 42

Figura 9. Ubicación de muestras analizadas para la caracterización petrográfica de las facies. 46

Figura 10. Levantamiento estratigráfico realizado en el sector de “La Azufrada” Quebrada La Sorda. 47

Figura 11. Caliza tipo packstone sin estructuras intercaladas con lodolitas calcáreas laminadas con alto contenido de materia orgánica, expuestas hacia la base de la sección (Delta 71). 49

Figura 12. Vista panorámica entre los deltas 60-61. Contacto entre los miembros Galembo el Pujamana, el cual se marca por el cambio litológico y morfológico observado en la sección. 50

Figura 13. Detalle de contacto definido entre el Miembro Pujamana y Galembo. Delta 60. 51

Figura 14. Niveles de fosforitas observados al tope del Miembro Galembo. 52

Figura 15. Capas de Chert de 5 a 7 cms observadas al tope del Miembro Galembo. 53

Figura 16. Capas de bentonitas observadas en el Miembro Galembo. 53

Figura 17. Facies definidas en la secuencia descrita en la Sección Quebrada La Sorda. 55

Figura 18. Facies Lodolita fisil (Lf) 56

Figura 19. Facies Lms: Lodolita masiva con siderita. 58

Figura 20. Facies Lfmo: Lodolita fosilífera con alto contenido de materia orgánica. 59

Figura 21. Facies Lb: Lodolita fosilífera con alto contenido de materia orgánica. 60

Figura 22. Facies WPm: Packstone/Wackestone de foraminíferos, masiva. 62

Figura 23. Facies Wl/Ml: Wackestone laminado/Mudstone laminado de foraminíferos, masiva a debilemente laminada. 63

Figura 24. Facies Grp: Grainstone de ooides fosfáticos.Los bioclastos son el núcleo de un ooide, los cuales se presentan de forma ovalada a elipsoidal con la estructura interna del núcleo concéntrica. 65

Figura 25. Facies WPpLb: Wackestone, Packstone /Lodolita bioclástica ligeramente laminada con alto contenido de fosfatos. 66

Figura 26. Facies (B). Capas de arcilla de color armarillo grisáceo a verdoso, naranja caracterizadas como bentonitas. 68

Figura 27. Capas de chert de 4 a máximo 15 centímetros de espesor. Se encuentran distribuidas a lo largo de la columna. 69

Figura 28. Mapa de localización con ubicación de las muestras analizadas para dataciones bioestratigráficas. 70

Figura 29. Porcentaje de facies descrito en los diferentes miembros de la Formación La Luna. 72

Figura 30. Secuencias estratigráficas analizadas dentro del modelo depositacional para la Formación La Luna definidas en relación al cambio del nivel base y las curvas transgresivas-regresivas. 80

Figura 31. Integración de diferentes conjuntos de datos analizados para soportar el modelo secuencial propuesto para la Formación La Luna en la sección ubicada en el borde oriental del Valle Medio del Magdalena. 83

Figura 32. Sección estratigráfica entre los pozos Infantas -1613 y Llanito, cuenca del Valle Medio del Magdalena. 85

Figura 33. Principales componentes de facies caracterizados por Galvis-Portilla et al., 2014 para la Formación La Luna en un pozo ubicado en el VMM. 96

Figura 34. Secuencias estratigráficas de baja resolución interpretadas para la Formación la Luna en un pozo ubicado en el VMM. 97

Figura 35. Análisis de secuencias estratigráficas de baja frecuencia analizadas a nivel regional en el Valle Medio del Magdalena. 98

Figura 36. Modelo secuencial para la Formación La Luna depositada en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. 100

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Muestras analizadas para dataciones bioestratigráficas en la sección Quebrada La Sorda. 71

LISTA DE ANEXOS*

Anexo – A. Catálogo de muestras de mano.

Anexo – B. Informe Micropaleontológico.

Anexo – C. Columna estratigráfica, Sección Quebrada la Sorda (Lebrija-Santander).

Anexo – D. Modelo estratigráfico secuencial para la Formación La Luna (Sección Quebrad la Sorda).

Anexo – E. Correlación estratigráfica Formación La Luna (VMM).

* Los anexos se encuentran en CD ROOM

RESUMEN

TITULO: DEFINICIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS PARA LA FORMACIÓN LA LUNA (VMM), BASADA EN EL ANÁLISIS DE AFLORAMIENTO Y SU CORRELACIÓN CON EL SUBSUELO[*]

AUTOR: LUZ ELENA RUEDA ACEVEDO[**]

PALABRAS CLAVES: FORMACIÓN LA LUNA, VALLE MEDIO DEL MAGDALENA, ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS, AFLORAMIENTO QUEBRADA LA SORDA, SUBSUELO.

DESCRIPCIÓN

La Formación La Luna consiste de una serie de calizas y shales ricos en materia orgánica de edad Turoniano – Santoniano. En Colombia, el área de Tablazo - San Vicente de Chucurí (Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM)) fue denominada por Morales *et al.,* (1958), como la sección tipo y fue subdividida en tres miembros, de base a tope son: Salada, Pujamana y Galembo. A la fecha existes dudas sobre el origen y evolución de esta unidad, por lo tanto en el presente estudio se realiza un análisis integrado con información derivada de múltiples conjuntos de datos (afloramiento, registro de pozo, bioestratigrafía y geoquímica), con el fin de proponer un modelo secuencial para el intervalo de tiempo Turoniano – Santoniano, en la cuenca del VMM que ayude a definir los principales controles estratigráficos que dominaron durante este tiempo.

Los depósitos del Miembro Salada (Turoniano Inferior), presentan alto contenido calcáreo, la ausencia de microfauna bentónica y la abundancia de foraminíferos planctónicos indican que fueron depositadas en un ambiente marino de muy baja energía, en fondos de agua poco ventilados. El Miembro Pujamana (Turoniano Tardío-Coniaciano (?)), está compuesto de lodolita principalmente silíceas, con predomino de materia orgánica continental (cutículas, polen y esporas) reflejado condiciones de depósitos marinos someros (Juliao *et al.,* 2012). El miembro Galembo (Coniaciano (?) Santoniano) consiste de una mezcla de lodolitas calcáreas y Wackestone-Packstone con alto contenido de material silíceo, con importantes capas de fosforitas hacia el tope, las cuales son reconocidas a nivel regional.

A partir de este estudio integrado, se redefinieron los miembros aflorantes en la sección de estudio (Quebrada La Sorda) y se estableció que las características sedimentológicas observadas de manera general presentan las mismas tendencias a nivel de afloramiento como del subsuelo y que por lo tanto son correlacionables a nivel regional.

[*] Tesis de Maestría

[**] Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Maestría en Geología Director: M.Sc. Alberto Ortiz Fernández. Codirector: M.Sc. German Meza

ABSTRACT

TITLE: DEFINITION OF THE SEQUENCE STRATIGRAPHY FOR LA LUNA FORMATION (VMM), BASED IN OUTCROP ANALYSIS AND ITS CORRELATION WITH SUBSURFACE[*]

AUTHOR: LUZ ELENA RUEDA ACEVEDO[**]

KEYWORDS: LA LUNA FORMATION, MIDDLE MAGDALENA VALLEY, SEQUENCE STRATIGRAPHY, LA SORDA OUTCROP, SUBSURFACE.

DESCRIPTION

La Luna Formation is characterized for limestones and shales, rich in organic matter, of Turonian - Santonian age. In Colombia, the San Vicente de Chucurí area's (Cuenca Middle Magdalena Valley (VMM)) was designated by Morales et al, (1958) as type section, and was subdivided into three members, from bottom to top they are: Salada, Pujamana and Galembo. To date, exist doubts about the origin and evolution of this unit, therefore in this study an integrated information from multiple datasets (outcrop, well log, biostratigraphy and geochemistry), is performed in order to propose a sequential model for the time interval Turonian - Santonian, in the basin of VMM, to help define the main stratigraphic controls that dominated during this time.

The deposits of Salada Member (Lower Turonian) have high lime content, the absence of benthic microfauna and abundance of planktonic foraminifera are indicators that they were deposited in a marine environment of very low energy, water funds poorly ventilated. The Pujamana Member (Late Turonian-Coniaciano (?)), is composed of mainly siliceous mudstone, with a predominance of organic matter continental (cuticles, pollen and spores) reflected conditions of shallow marine deposits (Juliao et al., 2012). The Galembo Member (Coniaciano (?) Santonian) consists of a mixture of calcareous mudstones and wackestones-Packstone, with highly siliceous material, with significant layers of phosphorite to the top, which are recognized at regional level.

From this integrated study, the members of La Luna Formation in outcropping (Quebrada La Sorda) were redefined, and established that the sedimentological characteristics observed have the same tendencies in outcrop as subsurface, and therefore they are correlated at regional level.

[*] Master Thesis

[**] Faculty of Engineering Physical Chemical School of Geology Master of Geology. Director: M.Sc. Alberto Ortiz Fernández. Codirector: M.Sc. German Meza

INTRODUCCIÓN

Las rocas Cretácicas de la Formación La Luna son ampliamente reconocidas como roca madre de hidrocarburos en la Cuenca del Valle Medio de Magdalena (VMM) – Colombia, sin embargo durante los últimos años diferentes compañías petroleras han iniciado programas de exploración de petróleo en yacimientos no convencionales de *shale gas* y han considerado a la Formación La Luna como un reservorio prospectivo.

La exploración se ha concentrado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), donde se han realizado programas de exploración desde inicios del 2011; a la fecha existen algunos trabajos publicados con análisis sedimentológicos y geoquímicos los cuales fueron usados como base para correlacionar datos de afloramiento a subsuelo y proponer un análisis de estratigrafía de secuencias para los depósitos del Turoniano – Santoniano en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

En el presente trabajo se propone un registro secuencial de la evolución estratigráfica para la Formación La Luna, a partir de datos adquiridos durante levantamiento estratigráfico de una sección aflorante en borde oriental de la cuenca VMM, los cuales son integrados a datos recopilados de estudios previos con el fin dar mayor coherencia y soporte al análisis de secuencias.

Las descripciones y los datos analizados son comparados y correlacionados con la información del subsuelo, con el fin de plantear cómo fue el comportamiento estratigráfico de esta unidad del Cretácico Superior, mediante un análisis de estratigrafía secuencial.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La Formación La Luna, es considerada en Colombia, como una de las principales roca fuente de hidrocarburos en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM), su potencial de generación de hidrocarburos ha sido altamente evaluado en diferentes trabajos geoquímicos (Zumberge, 1984, Rangel *et al.,* 2000; García, D., 2003); sin embargo, a la fecha existen dudas acerca de la delimitación estratigráfica de esta unidad del Cretácico Superior y no existe un estudio detallado de la estratigrafía secuencial publicado, que integre estudios de análisis de afloramiento con datos del subsuelo.

Por lo tanto en este trabajo se plantea un marco estratigráfico para el intervalo Turoniano- Santoniano (Formación La Luna-VMM); a partir de un trabajo integrado de estratigrafía de secuencias, donde además el flujo de trabajo sirva como patrón metodológico para la aplicación de estos conceptos en otras unidades.

1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles fueron los principales controles estratigráficos que dominaron los depósitos del intervalo Turoniano- Santoniano (Formación La Luna) en el Valle Medio del Magdalena, analizados a partir de un estudio integrado de estratigrafía de secuencias?

1.3 HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Un modelo de estratigrafía secuencias produce resultados óptimos cuando la información derivada de múltiples conjuntos de datos tomados a diferentes escalas (afloramiento, sísmica, núcleo, registro de pozo, bioestratigrafía y geoquímica), están integrados.

La integración de este conjunto de datos es muy importante, ya que cada uno aporta puntos de vista diferentes con respecto al reconocimiento de las tendencias deposicionales y los patrones de depositación. Este tipo de interpretación es la que se observa ausente en la mayoría de los estudios locales publicados sobre la Formación La Luna y su estratigrafía secuencial.

Por lo tanto, la aplicación de los conceptos de estratigrafía de secuencias integrando datos de afloramiento y del subsuelo, ayudarán a definir los principales controles estratigráficos que dominaron los depósitos del intervalo Turoniano - Santoniano (Formación La Luna) en la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

1.4 OBJETIVO PRINCIPAL

Definir el marco estratigráfico de los depósitos del intervalo Turoniano – Santoniano (Formación La Luna-VMM), a partir de un estudio integrado de estratigrafía de secuencias.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los sistemas de asociaciones faciales presentes en el intervalo Turoniano - Santoniano (Formación La Luna- VMM), a partir de la descripción litológica del afloramiento.

- Caracterizar los cambios texturales y composicionales de los diferentes intervalos de la formación a partir del análisis petrográfico de muestras tomadas en afloramiento para respaldar el modelo de estratigrafía de secuencias propuesto.

- Identificar los cambios verticales de faciales en los depósitos de la Formación La Luna, para determinar procesos sinsedimentarios y posdeposicionales que caracterizan la roca en el presente.

- Generar un registro secuencial de la evolución estratigráfica, para la Formación La Luna, amarrado a datos bioestratigráficos obtenidos en este estudio y de la recopilación de datos existentes en la literatura.

- Correlacionar características físicas, químicas y biológicas presentes en la roca, con datos de descripciones publicadas a nivel subsuelo, con el fin proponer un análisis de estratigrafía de secuencias para los sedimentos depositados en la Cuenca de Valle Medio del Magdalena durante el intervalo de tiempo Turoniano – Santoniano.

2. MARCO DE REFERENCIA

Los patrones estratigráficos en el registro de rocas sedimentarias, son el resultado de la interacción de la tectónica, la eustacia y el clima. La tectónica y la eustacia, controlan la cantidad de espacio disponible para la acumulación de sedimento, donde la ciclicidad de estos procesos junto con el clima, controlan tanto la arquitectura como la acomodación y relleno de las facies sedimentarias. (Michael, A., Bradley, S., 2012).

La aplicación de la estratigrafía de secuencias proporciona un marco estratigráfico detallado, que puede reducir los riegos de errores en las correlaciones entre diferentes unidades genéticas y puede ser estudiada e identificada a diferentes escalas (Gareth, 2000). Por lo tanto se producen resultados óptimos cuando la información derivada de múltiples conjuntos de datos (afloramiento, sísmica, núcleo, registro de pozo, bioestratigrafía y geoquímica), están integrados. En la **figura 1**, se presentan las principales aplicaciones que tienen los diferentes *sets* de datos, los cuales son la clave para obtener un modelo de estratigrafía de secuencias fiable y completo (Catuneanu *et al*., 2009).

La integración de estos conjuntos de datos es muy importante ya que cada uno aporta puntos de vista diferentes con respecto al reconocimiento de las tendencias deposicionales y los patrones de depositación. Esta integración es la que se observa ausente en la mayoría de los estudios locales consultados sobre la Formación La Luna y su estratigrafía secuencial. Puntos de vista desde la geología de campo, o la estratigrafía sísmica o la geoquímica pero nunca una integración real de diferentes fuentes que en este caso ya están disponibles a la espera de un meticuloso trabajo integrador.

Figura 1. Contribución de diferentes sets de datos para la Interpretación de la estratigrafía de secuencias.

SET DE DATOS	PRINCIPALES APLICACIONES/CONTRIBUCIONES A LA ESTRATIGRAFIA DE SUECUENCIAS
Datos Sísmicos	Imágenes continuas del Subsuelo; Estilos Estructurales; Parámetros de apilamiento de los estratos; Imágenes de elementos depositacionales, Geomorfología y geometría de los estratos.
Datos de Registros de Pozo	Parámetros de apilamiento vertical, tendencias gradacionales; elementos depositacionales; Sistemas depositacionales; petrofísica, Calibración de datos sísmicos.
Datos de Core	Facies, Texturas y Estructuras sedimentarias; naturaleza de los contactos Estratigráficos; Propiedades físicas de la Roca; Paleocorrientes en pozos orientados; Calibración Roca-Registro-Sísmica.
Datos de Afloramiento	Control 3D de la arquitectura de las Facies; claves del proceso sedimentario; Facies; Elementos Depositacionales; Sistemas Depositacionales; todas las otras aplicaciones ofrecidas por los datos de core.

Fuente: Modificada de Catuneanu *et al.,* (2009).

2.1 FLUJO DE TRABAJO PARA UN ANÁLISIS DE ESTRATIGRAFÍA DE SECUENCIAS

Como para cualquier interpretación geológica, un análisis preciso y detallado de estratigrafía de secuencias depende en gran medida a la cantidad y calidad de información. En el presente análisis para la Formación La Luna propuesto para el sector oriental de la cuenca del VMM, se recopilan los estudios regionales y locales realizados para esta formación, con el fin de integrar y analizar los nuevos datos adquiridos en este trabajo y así proponer un patrón depositacional para el intervalo Turoniano-Santoniano en el sector oriental del Valle Medio del Magdalena.

A continuación se describen tres pasos que deben ser analizados sistemáticamente para obtener el mejor enfoque en un análisis de estratigrafía de secuencias (Catuneanu *et al*., 2009); con los estudios regionales se obtiene una comprensión general de la tectónica y la sedimentación a gran escala y los detalles del contexto geológico se abordan con los análisis a menor escala.

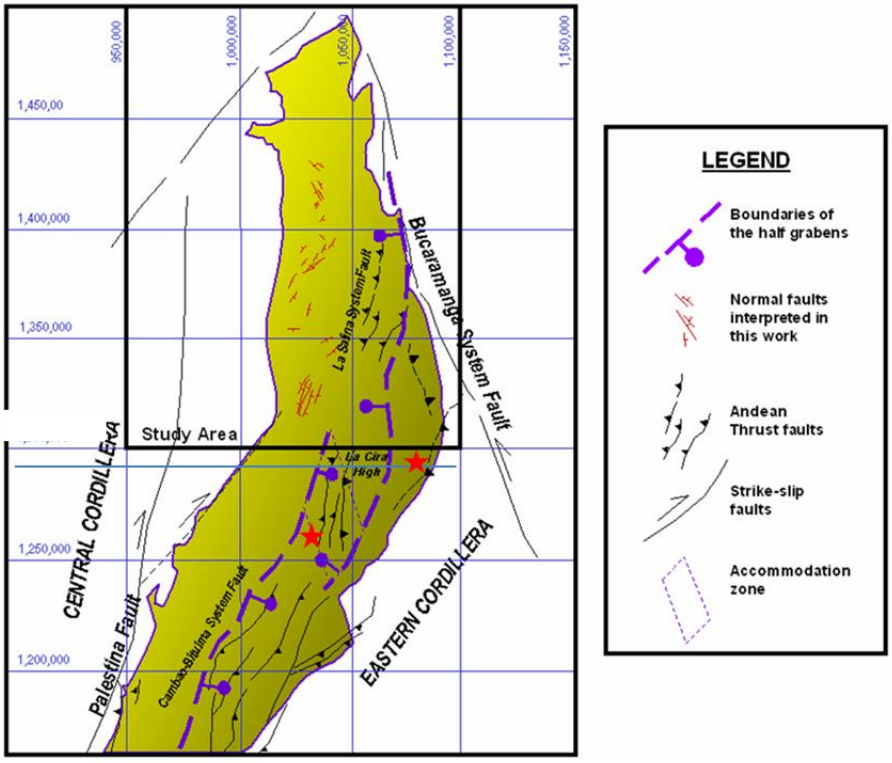
2.1.1 Contexto tectónico (tipo de cuenca sedimentaria) El análisis del tipo de cuenca que hospeda los sedimentos es una variable fundamental que necesita ser estudiada en los primeros estados de una investigación de estratigrafía de secuencias. Durante el Cretácico, la paleogeografía y la distribución de los depocentros eran muy diferentes a los que se encuentran hoy en día. A nivel regional en la zona de estudio, la secuencia de rocas Cretácicas se depositó en una alongada cuenca NE-SW, inicialmente formada por una tectónica tensional tipo *Rift* en el Jurásico y principios del Cretácico, luego fue dominada por subsidencia termal durante el Barremiano al Campaniano. Durante el Albiano Medio la deformación extensional había disminuido y se da el comienzo de una fase *post-rift* controlada por subsidencia termal. El estilo de la deformación dominante era todavía fallamiento normal pero menos fuerte que durante la fase *synrift* (Villamil, 1998).

Debido a que la reconstrucción de un ambiente tectónico debe estar basado en datos regionales, para este trabajo se cuenta con la recopilación de información de estudios realizados sobre la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, donde algunos involucran dentro de su análisis la interpretación de líneas sísmicas y cortes estructurales evaluados a nivel regional en áreas cercanas a el área de interés.

Rolon (2004), propone que durante el Jurásico-Cretácico la estructura de la cuenca VMM presenta una geometría *half graben* asimétrico, donde las fallas que limitan la Cordillera Oriental (La Salina-Bucaramanga y Cambao-Bituima) fueron

originalmente fallas normales que controlaron los espesores de la secuencia *Syn-rift* y en general la geometría de la estructura (**Figura 2**). La secuencia de *Post-rift* es controlada por la subsidencia termal, esta fase es caracterizada por amplias cuencas marginales tipo *Sag,* donde el estilo de la deformación fue de un fallamiento normal pero de menor dominio que el de la fase *Syn-rift.* La mayoría de las fallas remanentes de la fase *rift,* se invirtieron después de la tectónica compresiva que se inició en el Cretácico Superior (Campaniano).

Figura 2. Modelo de la geometría estructural del Jurásico en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Las fallas en morado representan los límites de graben. Los sedimentos Cretácicos son controlados por fallamiento normal pero de menor dominio que los que dominaron durante el Jurásico. En rojo: ubicación de sección y pozos analizados en este estudio.



Fuente: Modificado de Rolon, 2004.

2.1.2 Ambiente depositacional La interpretación del ambiente depositacional es otro paso clave para un flujo de trabajo de estratigrafía de secuencias. La identificación de los elementos depositacionales específicos son muy importantes ya que la morfología de una cuenca tiene influencia directa en la evaluación económica de las unidades estratigráficas de interés (Catuneanu., 2006).

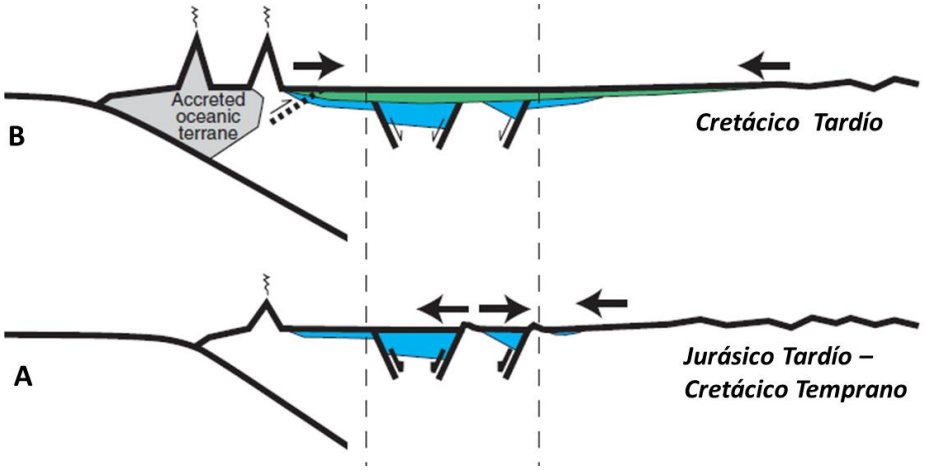
El mérito del análisis en el presente trabajo consiste en recopilar e integrar la mayor cantidad de información bibliográfica disponible, con el fin de analizar las reconstrucciones paleoambientales que indiquen las características depositacionales y fisiográficas del área estudiada.

Los patrones depositacionales ocurridos en el Cretácico Superior y su relación con los eventos Tectónicos-Eustatico más importantes que controlaron la depositación en el área de la Cuenca del Valle del Magdalena, coinciden con la acreción de terrenos oceánicos contra la Cordillera Central, terrenos provenientes de los arcos de islas que causaron las primeras etapas de levantamiento de la Cordillera Central.

Durante el Cretácico Superior, la depositación a nivel regional estuvo controlada por un periodo de transición tectónica, el cual inicia a mediados del Cretácico, pasando de un periodo tardío del sistema del *rifting* (*postrift)* a un periodo de subsidencia termal (Horton *et al.,* 2010). Según algunos estudios apoyados en métodos de datación U-Pb de zircones adquiridos sobre rocas del Cretácico Superior de la Cordillera Oriental, se interpreta que durante este tiempo se eliminan las áreas fuentes provenientes del basamento andino y parte del basamento de la Cuenca de Llanos, producto del completo cubrimiento de cobertera sedimentaria y enterramiento de estas rocas debido a procesos de subsidencia (Horton *et al.,* 2010). Durante el Cretácico Tardío, la ampliación de la cuenca durante la fase de *postrift,* incorporó gran parte del oeste del escudo de Guyana (incluyendo parte de la región de Llanos actual), llegando a incrementar la

contribución relativa de sedimento desde las partes más antiguas del Este del escudo de la Guyana, donde domina el basamento Peleoproterozoico. (Horton *et al.,* 2010), (**Ver Figura 3**.)

Figura 3. Esquema generalizado de la evolución de los andes Colombianos durante la época del Cretácico Superior. A) Jurásico Tardío – Cretácico Temprano. B) Cretácico Superior.



Fuente: (Modificado de Horton *et al.,* 2010).

Durante este periodo de *postrift,* a inicios del Cretácico Superior (Cenomaniano – Turoniano) y teniendo en cuenta las altas tasas de acumulación causadas por la subsidencia termal, se presenta la mayor profundización de la cuenca, marcada por la mayor inundación del Cretácico donde se depositaron espesas capas de sedimentos de influencia principalmente marina. Sin embargo, esta megasecuencia de depósitos marinos es interrumpida abruptamente a finales de Cretácico (Maastrichtiano), por un patrón depositacional de tipo continental, causado por la acreción de la Cordillera Occidental contra el continente (Cooper *et al.,* 1995).

El Cretácico Superior se puede dividir en dos eventos principales. En la etapa temprana del Cretácico Superior (Cenomaniano – Turoniano – Coniaciano), se

entra en una etapa de transgresión marina alcanzando la máxima inundación del Mesozoico durante el Turoniano- Coniaciano lo cual causó la completa inundación de la esquina Noroccidental de Suramérica. La segunda etapa comprendida entre las edades Santoniano – Campaniano – Maastrichtiano, está relacionada a una fase regresiva la cual empieza a marcar el inicio de la depositación con influencia continental-transicional de tipo progradante del Cretácico Tardío, asociada a una gran caída del Nivel Base debido a la tectono – Eustasia relacionada con la acreción de la cordillera Occidental y levantamiento incipiente de la Cordillera Central.

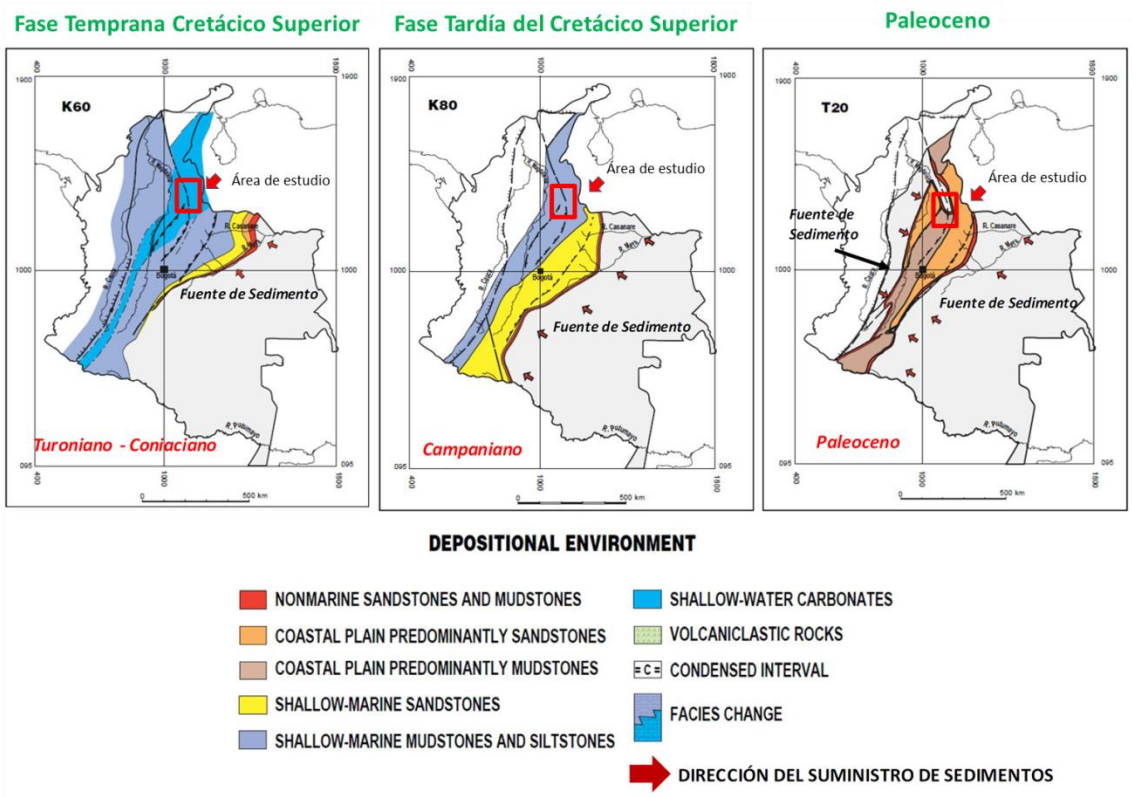
De esta manera, se puede decir que para la etapa temprana del Cretácico Superior, la fuente de aporte de sedimentos correspondió principalmente a Escudo de la Guyana desde el Este de la Cuenca. Por otra parte, para la etapa tardía del Cretácico Superior (Maastrichtiano), además de proveniencia de sedimentos desde el escudo de Guyana, se empieza a tener un aporte de sedimentos adicional provenientes de la Cordillera Central. En la **figura 4**, se pueden observar las variaciones en los ambientes depositacionales asociados a la somerización de la cuenca durante el Periodo de Cretácico Superior- Paleoceno producto de la acreción de terrenos oceánicos al continente.

Por lo tanto se puede concluir que durante la depositación de las unidades estratigráficas del Cretácico Superior, las facies más continentales fueron depositadas hacia el Este de Colombia mientras que las facies de mayor influencia marina se depositaron hacia las zonas del Valle del Magdalena y Flanco Oeste de la Cordillera Oriental.

En el sector del Valle Medio del Magdalena, la Formación La Luna fue depositada durante el periodo de máxima inundación del Cretácico Superior, en donde existía un gran espacio de acumulación. El ambiente sedimentario de esta formación corresponde a un ambiente marino que varía desde depósitos de ambiente marino

somero a depósitos de *offshore.* Esto coincide con los mapas paleoambientales propuestos por algunos autores (Cooper *et al*, 1995; Sarmiento, 2001), donde se observa que los depósitos del Valle del Magdalena corresponden a los depósitos de mayor profundidad en la evolución de la cuenca durante el Cretácico Superior.

Figura 4. Ambientes depositacionales de Cretácico Superior en las cuencas de Colombia.



Fuente: Modificado de Cooper *et al*., 1995.

2.1.3 Marco de estratigrafía de secuencias La estratigrafía de secuencias es el análisis de la respuesta sedimentaria a los cambios en el nivel base y las tendencias depositacionales que surgen de la interacción del espacio de acomodación y la sedimentación (Catuneanu., 2006). Según esta definición, es importante familiarizarse con el término "espacio de acomodación" el cual es el espacio disponible para la acumulación de sedimento" (Jervey´s, 1988 en

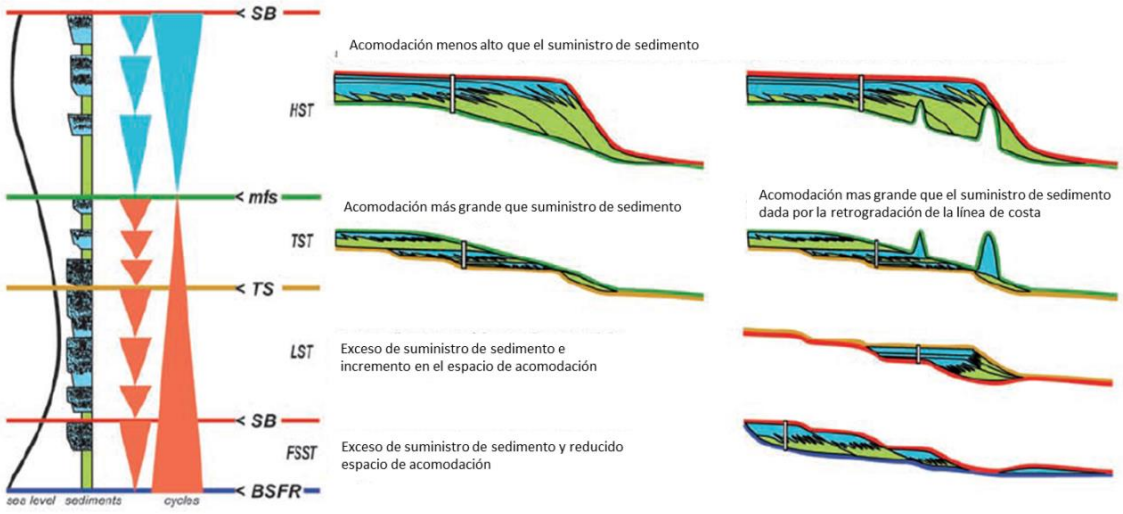
Catuneanu, 2009), sin embargo, en un análisis de secuencias en un sistema con influencia de carbonatos el término es modificado. El espacio para la acumulación de carbonatos puede ser subdividido en acomodación “física” y “ecológica” (Pomar and Kendall., 2007, en Catuneanu, 2006). La acomodación física está dominada por las condiciones hidrodinámicas y la ecológica está controlada por los organismos y su productividad.

Dentro del espacio de acomodación, los sedimentos sueltos (no cementados) pueden ser carbonáticos o siliciclásticos, tienden a construir el perfil de equilibrio de la plataforma. Esta superficie es el nivel base, que está implicado en la creación de la pendiente y plataforma depositacional.

Por lo tanto los conceptos de estratigrafía de secuencias aplicados a sistemas carbonáticos se analizan de la misma forma que para siliciclásticos o terrígenos, su diferencia radica en el carácter físico de las superficies (Sarg, 1988; Handford and Loucks, 1993; Hunt and Tucker, 1993; Cathro et al., 2003; Schlager, 2005 en Catuneanu *et al*., 2009). Por ejemplo, los sedimentos carbonatados son el producto de la generación *insitu* de organismos que producen carbonato, muchos de los cuales son producto de la actividad fotosintética y tienen sus mayores tasas de generación cerca de la interface aire/mar; mientras que lo clásticos son transportados a su ambiente depositacional. Adicionalmente los sedimentos carbonatados tienen origen bioquímico y están influenciados por la química del agua donde precipitan. Esto significa que las facies carbonatadas también pueden ser usadas para determinar cambios en la paleogeografía y en el paleoclima.

Al igual que en los sedimentos siliciclásticos, la geometría de los estratos carbonáticos son el producto de la morfología de la superficie depositacional, las tasas de cambio del nivel base y de la acumulación de sedimento (**figura 5**).

Figura 5. Marco de Secuencia estratigráfica para una plataforma carbonatada con (lado derecho) y sin (izquierda) acumulaciones laterales. La sección vertical en el lado izquierdo es una columna esquemática de los sedimentos que se acumularon apilados dentro de cada sistema. La posición aproximada de cada columna es indicada con las barras en blanco.



Fuente: Modificado de Catuneanu e*t al.,* 2011

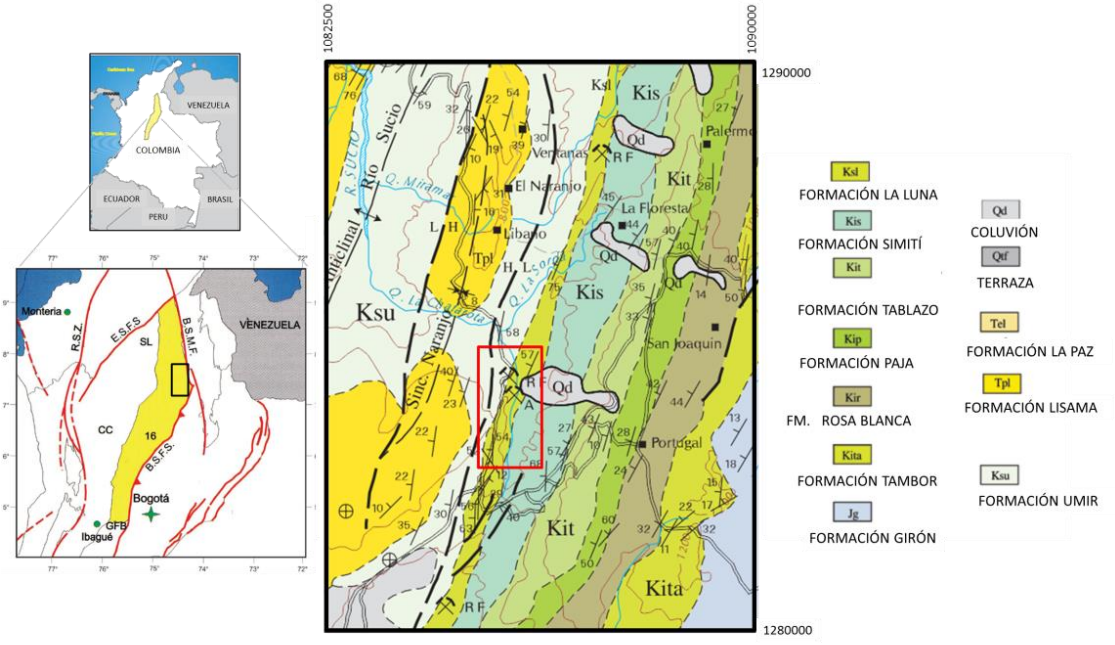
La subdivision de las superficies estratigráficas identificadas en las secuencias cabonáticas son superficies de inundación y erosión producidas por el cambio del nivel base (Handford and Loucks, 1993 en Catuneanu *et al.,* 2011). Las geometrías están definidas por superficies límites. Durante y en las transgresiones (TST y MSF) y las que se forman durante la caída del nivel del mar, como son las superficies regresivas (SB) (Catuneanu *et al.,* 2011).

3. LOCALIZACIÓN Y ANTECEDENTES

3.1 LOCALIZACIÓN

La cuenca del Valle Medio del Magdalena está localizada geomorfológicamente a lo largo de la porción central del valle cursado por el Río Magdalena, entre las Cordilleras Oriental y Central de Los Andes colombianos (ANH, 2008). El trabajo de campo desarrollado en este proyecto se realizó en el costado oriental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, en las inmediaciones del municipio de Lebrija Santander, sobre la sección Quebrada La Sorda. El punto de acceso a esta sección es por la vía principal Bucaramanga - Barrancabermeja, tomando el desvío por la antigua carretera que conduce al municipio de Sabana de Torres en el sitio denominado La Azufrada, a la altura de la Hacienda La Sorda se intercepta la sección en estudio "Quebrada La Sorda" (**figura 6**). La descripción de la sección se realizó de tope a base con punto de inicio X: 1.085.746 - Y: 1284884 y punto final X: 1.085.720 - Y: 1.283.633, con proyección coordenadas en Bogotá D.C.

Figura 6. Localización del Valle Medio del Magdalena, Colombia y área de estudio: Falla la Salina (LS), Bituima (BSFS); Falla Espíritu Santo (ESFS); Serranía de San Lucas (SL); Cordillera Central. Mapa de Localización de Afloramientos.



Fuente: ANH, 2008, Mapa Cuadrángulo H12. (Ingeominas., Ward *et al.,* 1977).

3.2 MARCO TECTONO - ESTRATIGRÁFICO

La configuración actual de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena es producto de varias etapas tectónicas estrechamente vinculadas con los eventos ocurridos en la esquina oeste de Sur América.

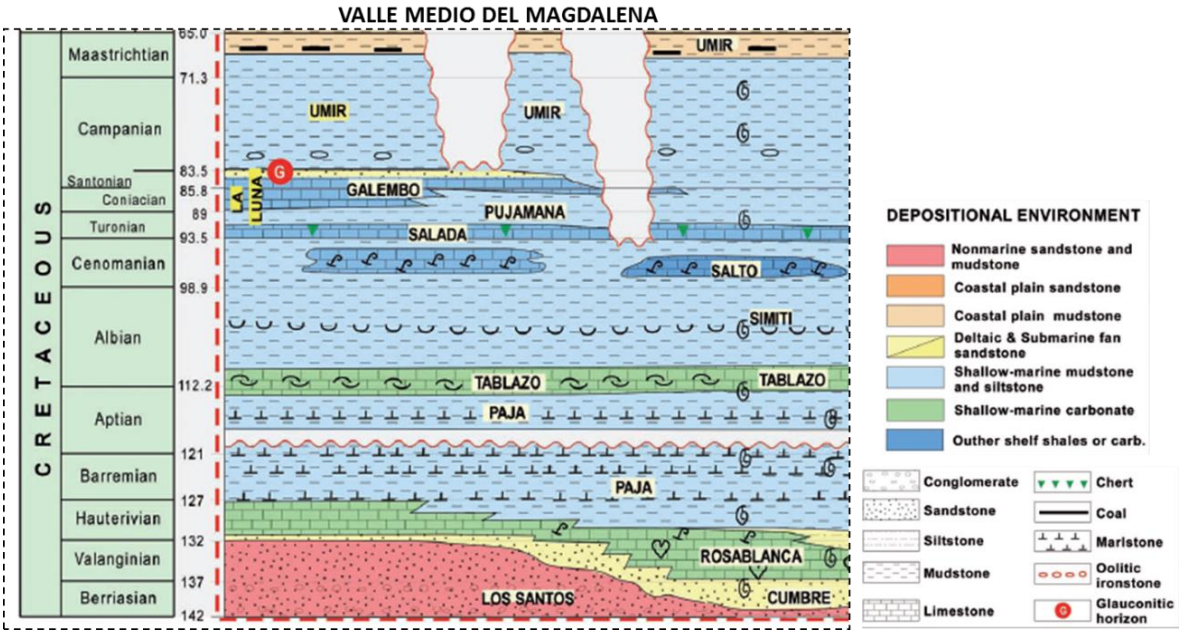
Una fase extensional Este-Oeste *(Syn Rift)* durante el Jurásico Superior - Aptiano, produjo el adelgazamiento de la litosfera, causando en algunas áreas fusión parcial del manto y consecuentemente el emplazamiento de cuerpos intrusivos durante el Jurásico – Cretácico (Barrero y Renzoni, 1969; Etayo *et al.,* 1983;

Fabre, 1983; en Rolon, 2004). El desarrollo de este tipo de cuenca durante este tiempo favoreció la acumulación de rocas sedimentaria fluviales- lacustres en un evento representado por una secuencia *Lowstand* (Formaciones Girón, Jordán y Los Santos) seguido por secuencias transgresivas y de *highstand system tract,* representadas por las formaciones Cumbre, Rosablanca, Paja y Tablazo.

Para el Cretácico Superior Albiano Medio – Maastrichtiano, se da un periodo de *postrift*, donde se producen altas tasas de acumulación y la mayor profundización de la cuenca, la cual está marcada por la depositación de espesas capas de sedimentos de influencia principalmente marina (Cooper *et al.,* 1995 en Sarmiento, 2001). El espacio de acomodación fue creado por subsidencia termal y por el aumento de los cambios eustáticos que ocurrieron durante este periodo. El relleno de la cuenca está representado por las formaciones Simití, La Luna y Umir.

Durante el Maastrichtiano al Paleoceno, un evento de deformación compresiva asociado a la acreción oblicua de la corteza oceánica de la actual Cordillera Occidental propagó la deformación hacia el Norte y produjo acortamiento y levantamiento de la Cordillera Central (Cooper *et al*., 1995), lo cual provoco el retiro del mar desde el Sur del Valle Medio del Magdalena (Gomez *et al.,* 2003).
En la **figura 7** se presenta un esquema cronoestratográfico de un corte en el Valle Medio del Magdalena, donde se indican las secuencias cretácicas depositadas en esta cuenca.

Figura 7. Diagrama cronoestratigráfico para la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.



Fuente: Modificada de Sarmiento, 2011.

La Formación La Luna corresponde a sedimentos de ambiente marino depositada durante un periodo de máxima inundación en el Cretácico Superior (intervalo Turoniano – Santoniano). Está constituida por calizas gris oscuras, arcillosas, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas, lutitas gris oscuras con delgadas intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro, capas delgadas de chert negro y también capas fosfáticas hacia la parte superior. (Morales *et al.,* 1958 en Royero J., Clavijo, J., 2001).

En Colombia, la Formación La Luna se subdivide en tres miembros: Miembro Salada, Miembro Pujamana y Miembro Galembo, los cuales son definidos por Morales *et al.* (1958) en el área de Tablazo (Santander) a partir de las características física similares observadas en la sección tipo localizada en la Serranía de Perijá, Venezuela.

Miembro Salada: Esta unidad está compuesta por shale duro, con capas delgadas finamente laminadas, con algunos intervalos de calizas. Una característica importante de este miembro es la ocurrencia de concreciones de pirita. Se interpreta que estos sedimentos fueron depositados en un ambiente relativamente profundo en aguas poco ventiladas las cuales no desarrollaron microfauna bentónica. Tiene rangos de espesor entre 50 y 100 metros y descansa concordantemente sobre la Formación El Salto (Morales *et al*., 1958).

Miembro Pujamana: Esta unidad de edad Turoniano Superior a Coniaciano Inferior, constituye el miembro medio de la Formación La Luna, el cual consiste de shale calcáreo de color gris o negro. El ambiente de depositación para esta unidad según Morales *et al.* (1958), consiste de ambientes marinos profundos y su espesor varía entre 50 y 225 m. En el Valle Medio del Magdalena se encuentra infrayaciendo el Miembro Galembo.

Miembro Galembo: Este miembro presenta un rango de edad Coniaciano más superior a Santoniano. Consiste principalmente de shale calcáreo alternando con finas capas de caliza, con numerosos nódulos discoidales de caliza que pueden alcanzar varios metros de diámetro y que contienen amonites. Presenta un rango de espesor 180 metros en la sección del Río Sogamoso, a 350 metros en el Valle del Magdalena. Cerca del techo se encuentra un horizonte bastante constante, con dientes, vértebras y otros restos de peces. El contacto con la Formación Umir es discordante (Morales *et al.,* 1958).

3.3 ESTUDIOS PREVIOS

En el presente capítulo se recopilan cronológicamente los estudios previos realizados sobre la sucesión del cretácico superior aflorante en el costado oriental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (Sección Quebrada La Sorda), así

como importantes estudios desarrollados a nivel regional sobre la Formación La Luna en superficie y subsuelo.

El nombre de la formación La Luna fue designado por Garner (1926), donde según observaciones realizadas en la Quebrada La Luna (Serranía del Perijá-Venezuela), describió esta formación como calizas y lutitas calcáreas fétidas, con abundante materia orgánica laminada y finamente dispersa, con concreciones elipsoidales a discoidales de 10 a 80 cms de diámetro (Garner, 1926, en Código Estratigráfico Cuencas Petroleras de Venezuela). Posteriormente Morales *et al.* (1958), amplió este término subdividiendo esta unidad en tres miembros: Miembro Salada, Miembro Pujamana y Miembro Galembo y le asignó un rango de edad entre Turoniano Temprano – Coniaciano- Santoniano en el área del Río Sogamoso – Colombia.

Una sección estratigráfica de la Formación La Luna medida en la Quebrada La Sorda (Ward *et al.,* 1973), indica que este afloramiento tiene un espesor 260 metros de sección, aquí se describieron los tres miembros de la formación y se propone que la Formación La Luna descansa en concordancia sobre las rocas de la Formación Simití y que se encuentra en discordancia con la unidad suprayacente (Formación Umir). Los miembros Galembo y Salada son los más resistentes y están limitados en el medio por el miembro Pujamana.

En esta sección se describen hacia la parte inferior del miembro Galembo capas fosfáticas que pueden trazarse por lo menos veinte kilómetros a lo largo del rumbo hacia el norte y posiblemente se extienden más hacia el sur (Ward *et al*., 1973).

Debido a su composición litológica, la Formación La Luna presenta un alto contenido de materia orgánica de origen marino, por lo tanto la sección anteriormente descrita ha sido objeto de estudio de diferentes trabajos con

enfoques principalmente geoquímicos, que buscan analizar las propiedades de esta formación generadora de hidrocarburos.

A partir del estudio de análisis de Kerógeno realizado sobre muestras de afloramiento expuestas en la Quebrada La Sorda (Miembros Galembo y Pujamana) y a 5 km de esta quebrada (Miembro Salada), Zumberge (1984), estableció que la formación presenta un nivel de madurez dentro de la zona de generación de hidrocarburos.

Gonzales y Sánchez (1999), definieron sobre la sección en estudio una secuencia de 236 metros (Quebrada La Sorda) de la Formación La Luna. En este trabajo se realizó una caracterización de facies orgánicas con el fin de establecer el potencial de generación de hidrocarburos de la formación. A partir de los datos obtenidos se realizó un análisis cicloestratigráfíco que muestra concordancia entre los altos valores de TOC -HI y los niveles identificados con un ascenso del nivel base.

Basado en el trabajo realizado Gonzales y Sánchez (1999), Rangel *et al*. (2000), evaluó la variabilidad de los datos geoquímicos medidos sobre la sección y propone un análisis quimioestratigráfico entre los cambios litológicos y las facies orgánicas caracterizadas en la sección. A partir de la posible relación entre las características de la materia orgánica y los cambios del nivel del mar Rangel *et al.* (2000), interpreta ciclos de baja frecuencia para la Formación La Luna en la sección expuesta en la Quebrada La Sorda. La secuencia de shale y de menor carácter calcáreo descrita como Miembro Pujamana, es interpretada como un ciclo de subida del nivel base en donde se depositaron las facies más profundas de la cuenca.

Con el fin de entender el origen y evolución de esta formación Bernal (2009), realizó una caracterización estratigráfica y petrográfica de la Formación La Luna en el área propuesta por Morales *et al.* (1958) como sección tipo (sector de

Tablazo VMM). Bernal (2009), calculó una secuencia de 170 metros para el miembro aflorante en esta sección proponiendo que el Miembro Galembo es el único presente en el sector de Tablazo. Además, aclara que definir el uso de los términos Miembro Salada y Pujamana en este sector no sería correcto ya que estos miembros no existirían en la sección tipo expuesta en el área de Tablazo. Bernal (2009), plantea que La Formación La Luna (Coniaciano –Santoniano) aflorante en esta zona se encuentra en contacto fallado con la Formación Simití.

Durante los últimos años diferentes compañías petroleras han iniciado programas de exploración de petróleo en yacimientos no convencionales de *shale gas* y han considerado a la Formación La Luna como un reservorio prospectivo. La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en el 2012 junto con INGRAIN, evaluaron el potencial de hidrocarburos no convencionales en la cuenca del Valle Medio del Magdalena a partir del análisis de integración geológica, registros de pozo y la nueva tecnología de digitalización y análisis de núcleos. En este estudio se identificó a la Formación La Luna como una unidad que reúne las condiciones para ser evaluada como yacimiento no convencional.

Debido al gran interés de analizar el alto potencial de producción de los yacimientos no convencionales en Colombia, en los últimos cuatro años se han realizado diferentes trabajos de investigación sobre la Formación La Luna por parte de la Universidad de Oklahoma en convenio con el programa de recursos no convencionales de Ecopetrol. Estos estudios se han basado principalmente en caracterizar el potencial como reservorio gas shale de la Formación La Luna a nivel de afloramiento y de pozo, para lo cual han integrado diferentes técnicas de laboratorio. Además, se han definido los posibles cambios del nivel del mar en el momento de depositación de la Formación La Luna basados en el contenido total de carbono orgánico (TOC) y el potencial relativo de hidrocarburo (Torres, 2013; Galvis-Portilla *et al.,* 2014).

Juliao *et al.,* 2012; realizó sobre muestras de un pozo localizado en el Valle Medio del Magdalena una reconstrucción paleoambiental para la Formación La Luna basada en el análisis de palinofacies. Los resultados de este análisis reflejan una mezcla de materia orgánica marina y terrestre en el Miembro Pujamana (predominio de cutículas, polen, esporas), lo que indica condiciones de ambientes marinos someros durante su depositación. Los Miembros Salada y Galembo se interpreta fueron depositadas en un ambiente marino de plataforma interna a externa.

En el reciente trabajo de caracterización petrográfica realizado sobre la Sección Quebrada La Sorda (Sarmiento *et al.,* 2015), se midió una sección estratigráfica de 264 metros. En este trabajo se considera que La Formación La Luna es una unidad predominantemente calcárea (biomicrita) que representa la facies más profunda del Valle Medio del Magdalena. Dentro del análisis petrológico se definen los tres miembros de la formación a partir de asociaciones petrofaciales características de cada uno de los miembros así como la relación de ocurrencia de foraminíferos planctónicos y bentónicos dentro de la secuencia. Además propone que hacia la base la Formación La Luna se encuentra en contacto como la Formación El Salto.

La serie de trabajos y estudios anteriormente nombrados fueron claves para realizar un análisis integrado de estratigrafía de secuencias para la Formación La Luna en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, estos serán integrados y analizados dentro del presente estudio en el capítulo de análisis de resultados.

4. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en el presente estudio consistió de tres etapas:

Etapa I

Esta fase comprende de un valioso proceso de recolección de información de estudios regionales realizados sobre la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, donde algunos involucran dentro de su análisis la interpretación de registros eléctricos, los cuales contribuyen a los objetivos de la realización del proyecto. A su vez se recopilaron datos petrográficos, geoquímicos y columnas estratigráficas existentes para la Formación La Luna, así como estudios realizados en otras cuencas del mundo referentes a estudios sedimentológicos y de estratigrafía de secuencias, que apoyan la interpretación realizada en este trabajo.

Los estudios de Morales *et al*. (1958); Ward *et al. (*1973); Rangel *et al.* (2000) y Sarmiento *et al.* (2015) realizados en superficie; así como los trabajos de caracterización de la Formación La Luna desarrollados a nivel de subsuelo y publicados por la ANH e Ingrain (2012) y Galvis-Portilla *et al.* (2014), fueron analizados con mayor detalle dentro del desarrollo del presente estudio.

Etapa II

En la fase de campo se realizó el levantamiento de 425 metros de columna, medida a escala 1:100 con bastón de Jacob en la sección conocida como Quebrada La Sorda, los intervalos cubiertos fueron medidos por poligonal. Se determinaron diferentes tipos de facies por inspección visual, identificándose características composicionales y texturales para una primera clasificación:

tamaño del grano, estructuras sedimentarias, geometría de las capas y la composición de las partículas gruesas. La presencia de carbonato fue determinada por la aplicación de HCl a las muestras de mano.

En ésta etapa, se llevó a cabo una recolección de sesenta y nueve muestras de mano (69 muestras). Con el fin de identificar las facies representativas de esta formación; se clasificaron quince (15) para estudios petrográficos donde se identificaron cambios texturales y composicionales de los diferentes intervalos. Las secciones delgadas fueron elaboradas por el *Laboratorio de Procesamiento de Secciones Delgadas Luis Felipe Peña*. Las muestras se sometieron a un proceso químico de tinción con Rojo de Alizarina S y Ferrocianuro Potásico para facilitar la diferenciación de carbonatos.

De las muestras recolectadas (65), se seleccionaron doce (9) muestras de litología finogranular con alto contenido de materia orgánica con el fin obtener datos bioestratigráficos que permitieron respaldar el modelo de estratigráfica de secuencias propuesto. Las muestras fueron preparadas para micropaleontología (foraminíferos) por el *Laboratorio de Procesamiento Geológico (LPG)*, empleando el método del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 10%. Una vez preparadas las muestras, fueron tamizadas sobre las mallas 250 µm, 125 µm y 63 µm. Posteriormente los foraminíferos fueron seleccionados y asignados a una morfoespecie con el fin de identificar biozonas a lo largo de la sucesión sedimentaria (Patarroyo, 2014). Se procesaron tres (3) muestras para datos palinológicos,con el fin de soportar es análisis propuesto en el presente estudio.

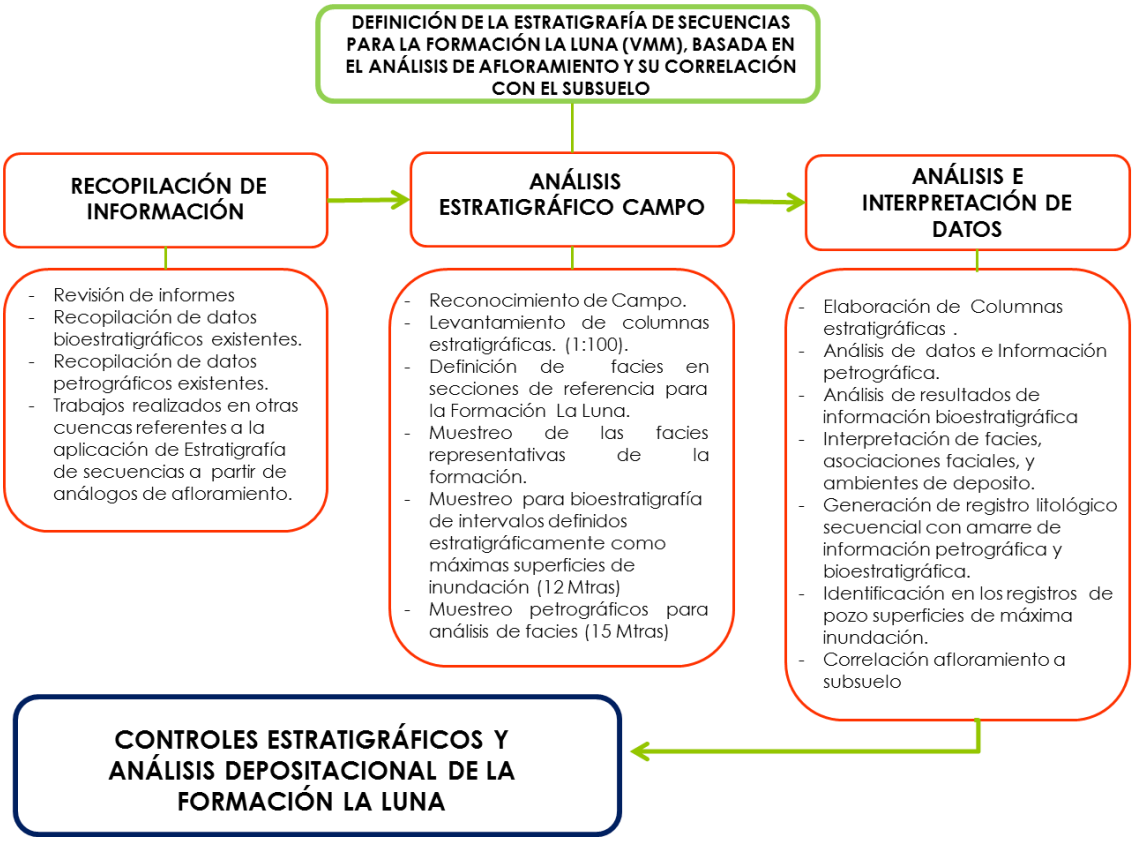
Etapa III

Se realizó un análisis integrado de los datos de campo obtenidos en este estudio (petrografía, bioestratigrafía y los cambios verticales de facies) con los recopilados en de la literatura, con el propósito de plantear y proponer un modelo estratigráfico

para sección aflorante de la Formación La Luna en el costado oriental de la cuenca (VMM). Posteriormente, éste modelo es comparado con datos del subsuelo a partir de una correlación estratigráfica generada con la interpretación de los registros eléctricos disponibles con intervalo registrado para la Formación La Luna en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, con el fin de determinar elementos y sistemas depositacionales para esta formación.

La integración de este conjunto de datos llevados de superficie a subsuelo serán la herramienta para proponer un modelo de estratigrafía de secuencial fiable y completo para la Formación la Luna en el Valle Medio del Magdalena, Colombia (**figura 8**).

Figura 8. Metodología desarrollada en este estudio.



5. RESULTADOS

5.1 TRABAJO DE CAMPO

La Formación La Luna se distingue claramente en campo por su morfología escarpada; la sección levantada en la Quebrada La Sorda está compuesta por capas densas con rumbo promedio N30E y buzamiento 63° NW. El trabajo de campo se realizó sobre la quebrada de tope (1.085.746- Y: 1.284.884) a base (X: 1.085.720 - Y: 1.283.633) con proyección coordenadas en origen Bogotá D.C. El punto de inicio se marca con la exposición de buenos afloramientos donde geomorfológicamente termina un valle amplio y suave e inicia una cresta estrecha que marca la dirección de la quebrada corriente aguas arriba. Las capas se midieron con bastón de Jacob siguiendo el trazo de la quebrada hasta donde geomorfológicamente se distingue de nuevo un valle suave; los intervalos cubiertos se toman con proyección de poligonales.

Se recolectaron 69 muestras de mano, las cuales son descritas y analizadas en detalle con el fin de tener evidencia litológica de las principales capas descritas en afloramiento (anexo A), de estas se seleccionaron quince (15) para análisis petrográficos (**figura 9**), nueve (9) para análisis micropaleontológicos (anexo B) y tres (3) para análisis palinológicos. En la figura 10, se observa el levantamiento estratigráfico realizado sobre la quebrada con sus respectivos datos de control estructural.

5.2 DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA.

La sucesión levanta en la Quebrada La Sorda según la descripción realizada por Abozaglo *et al*., 1967 en Ward *et al.,* 1973, tiene una alta probabilidad de estar afectada tectónicamente debido a la deformación regional. La poca competencia de las capas blandas del Miembro Pujamana las cuales se encuentran entre las capas más resistentes de los Miembros Salada y Galembo tienden a contorsionarse por lo que en campo se dificulta el reconocimiento de los distintos miembros de la formación (Ward *et al.,* 1973).

Partiendo de este planteamiento y con el fin de evaluar el grado de afectación estructural sobre la sección descrita en el presente trabajo, se realizó un muestreo sistemático de datos de rumbo y buzamiento de tope a base sobre toda la secuencia aflorante en la quebrada (en dirección sur). Mediante este muestreo se puede observar que los dominios tanto de rumbo como de buzamiento se mantienen constantes a lo largo de la secuencia (**figura 10**), los cuales varían en promedio de 25 a 35 grados (rumbo de las capas) con dirección de buzamiento noroeste (NW). Sobre la sección hay ciertos puntos en donde la quebrada cambia de dirección hacia el sur-sur oeste, esto implica que estratigráficamente se está repitiendo parte de la sección ya descrita por efecto del cambio de dirección de la quebrada más no porque exista una repetición ocasionada por una componente estructural. El considerar un pliegue en la sección implicaría al menos cambios en la dirección de buzamiento los cuales no son evidentes en la sección La Sorda. Por lo tanto se concluye que sección estudiada es una secuencia continua sin variaciones importantes en superficie.

Con el fin de identificar las características litológicas, expresión morfológica y los contactos de los miembros definidos para la Formación La Luna, se revisó en detalle el artículo de Morales *et al.* (1958), el cual propone como sección tipo de esta formación los depósitos expuestos en el sector del Tablazo en el Valle Medio

del Magdalena. A partir del análisis integrado de los datos adquiridos en campo (control estructural y morfológico, descripción litológica, análisis petrográficos, bioestratigráficos y de facies), en el presente estudio se propone que la sección estratigráfica aflorante sobre la quebrada La Sorda tiene un espesor aproximado de 425 metros de secuencia (220 metros medidos) del Cretácico Superior (Formación La Luna).

A continuación se describen las características sedimentológicas de cada uno de los miembros de la Formación La Luna, los cuales fueron definidos a partir de la comparación de la descripción realizada por Morales *et al.* (1958) en el área tipo con las observaciones y consideraciones analizadas en campo y subsuelo.

Figura 9. Ubicación de muestras analizadas para la caracterización petrográfica de facies.

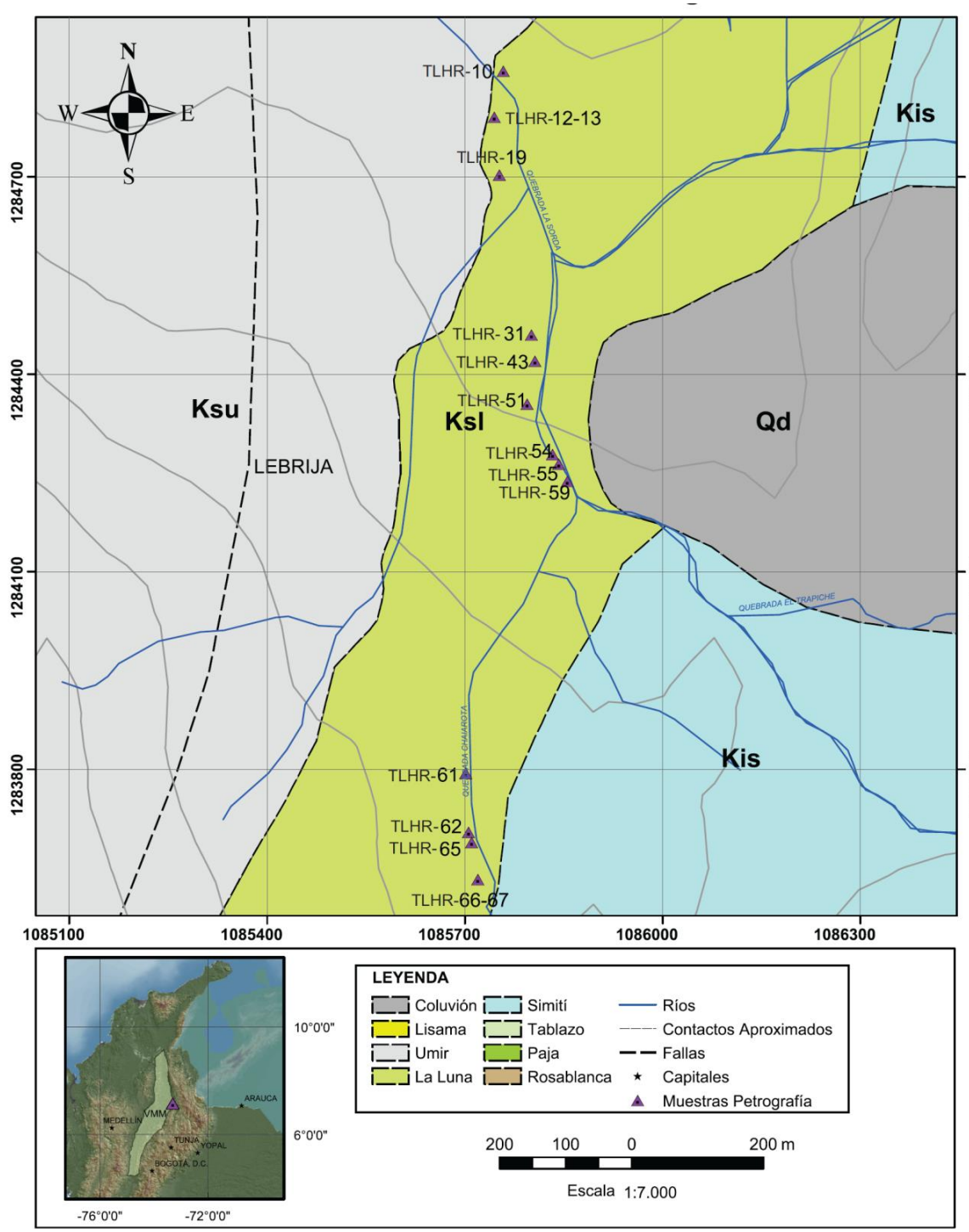
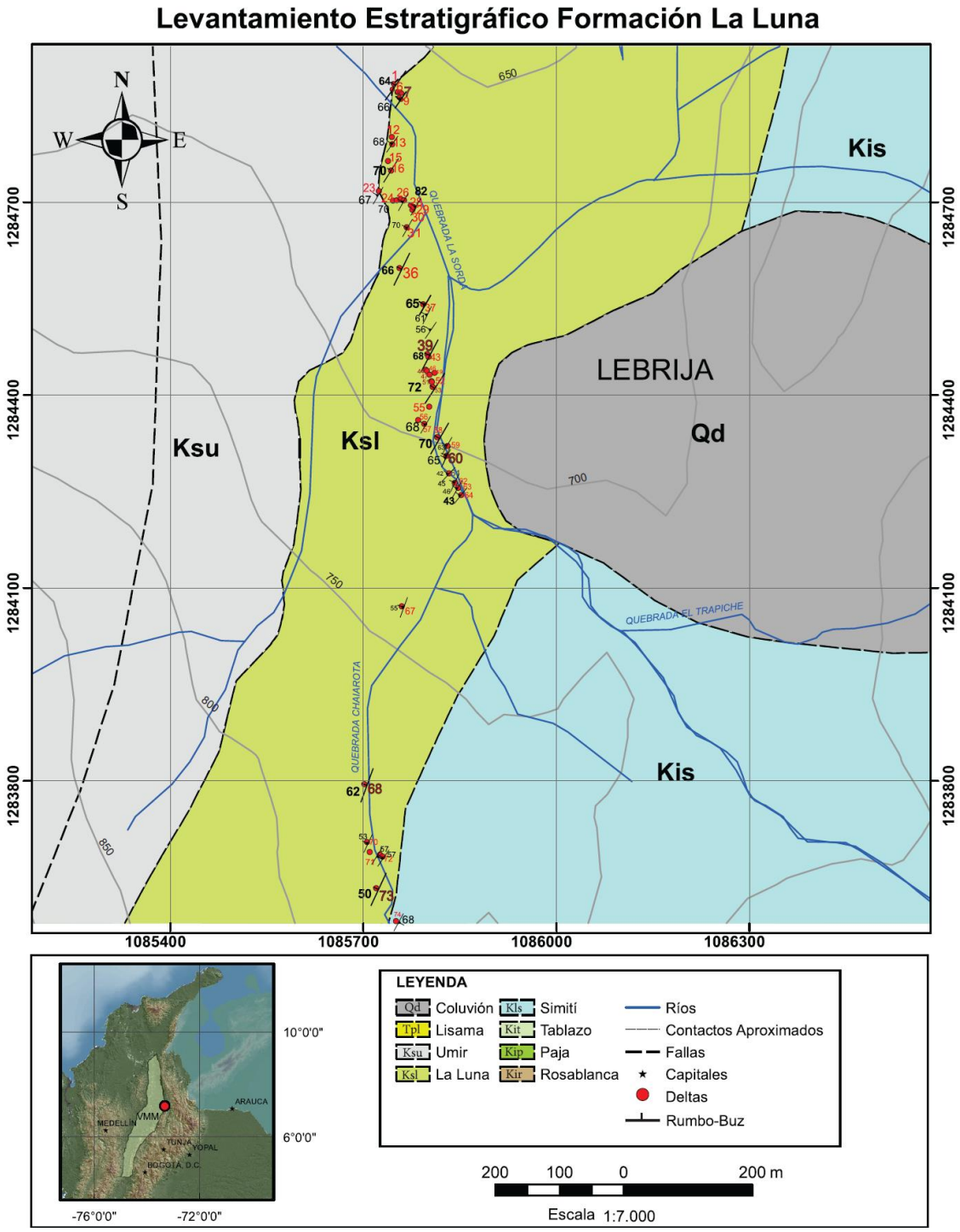


Figura 10. Levantamiento estratigráfico realizado en el sector de "La Azufrada" Quebrada La Sorda. Nótese el control estructural realizado sobre la sección. Ubicación de deltas (puntos rojos). Datos estructurales (Negro).



Miembro Salada.

Morales *et al.* (1958), describe una unidad compuesta de shales negros limosos con ocasionales capas delgadas de calizas negras de grano fino, laminadas y con concreciones de pirita. Una edad de Turoniano Inferior es asignada para este miembro debido a la presencia de bivalvos *Inoceramos Labiatus c*olectados en la sección tipo. Villamil (1998), reconoce fósiles de *Inoceramos Labiatus y Anomia*, por ser un fuerte bioevento de correlación para el Turoniano inferior los cuales son identificados en varias secciones de Colombia y Venezuela. En el área de estudio se intentó definir este miembro por la presencia de estos bivalvos sin embargo su presencia no es clara.

En la **figura 10,** se puede observar los deltas y puntos de control tomados sobre la sección, siendo el tope el delta uno (1) y la base el delta 73. Hacia la base, después de delta 73 la morfología cambia a un valle suave y no se vuelve a observar exposición clara de rocas calcáreas. En el delta 74 se encuentra un afloramiento pequeño de arcillolitas arenosas de color amarillo blanquecino que según el Mapa Geológico del cuadrángulo H12 (Ward *et al*., 1977) pertenece a la Formación Simití.

Entre los deltas 73 y 68 sobresalen morfológicamente de las unidades supra e infrayacentes unas capas caliza tipo packstone/wackestone de foraminíferos planctónicos sin estructuras intercaladas con lodolitas calcáreas laminadas con alto contenido de materia orgánica. Estas capas son interpretadas en el presente estudio como Miembro Salada. (**Ver figura 11**).

Figura 11. Caliza tipo packstone sin estructuras intercaladas con lodolitas calcáreas laminadas con alto contenido de materia orgánica, expuestas hacia la base de la sección (Delta 71).

Miembro Pujamana

Esta unidad es descrita por Morales *et al.* (1958), como intercalaciones de shales y shales calcáreos de color gris oscuro a negro en capas delgadas; la edad asignada para este miembro es Tunoniano Tardío a Coniaciano Temprano. Por su naturaleza, estas capas tienen una competencia limitada y tienden a contorsionarse siendo difícil definir su espesor en campo. La sección aflorante en la sección mediada es de aproximadamente 21 metros, sin embargo, es claro que debido a la poca competencia de las capas este miembro no se encuentra completamente expuesto sobre la sección.

En el presente estudio se propone el contacto entre el Miembro Pujamana y el Miembro Galembo en el delta sesenta (60), aquí se observa un drástico cambio litológico entre calizas laminadas intercaladas con lodolitas calcáreas con concreciones de 10 a 50 centímetros y un shale físil con cristales de pirita, de color negro a rojizo por meteorización, intercalado con lodolitas silíceas ligeramente laminadas y delgadas capas de lodolitas calcáreas (**figura 12 y 13**). En este punto también se observa un cambio morfológico muy marcado debido al cambio

de competencia en las litologías. Las capas tienden a horizontalizarse producto de la remoción por erosión, sin embargo la dirección del rumbo y buzamiento de las capas mantienen en promedio el mismo domino (N20-25E/60NW) que se mide a lo largo de la sección.

Figura 12. Vista panorámica entre los deltas 60-61. Contacto entre los miembros Galembo el Pujamana, el cual se marca por el cambio litológico y morfológico observado en la sección.

Figura 13. Detalle de contacto definido entre el Miembro Pujamana y Galembo. Delta 60.

Miembro Galembo

Morales *et al.* (1958), indica que en el área propuesta como sección tipo el Miembro Galembo presenta un espesor de 180 metros, descansa concordante sobre el Miembro Pujamana y es suprayacido por la Formación Umir.

Se le asigna una edad que incluye desde Turoniano Tardío hasta Santoniano basado en la ocurrencia *de Anomalina redmondii* la cual es característica del Miembro Galembo y es considerada de edad Coniaciano

Litológicamente está caracterizada por la alternancia de lodolitas calcáreas laminadas y calizas de textura tipo Mudstone/Packstone laminado a ligeramente laminado con alto contenido de foraminíferos, son de color gris oscuro a negro, con geometría tabular en capas delgadas y medias, se observan abundantes concreciones calcáreas elipsoidales a obladas, hacia el tope de la sección se presentan niveles de fosforitas de color amarillo crema a gris claro (**figura 14);** además, se observaron capas delgadas y medias de chert negro (**figura 15**).

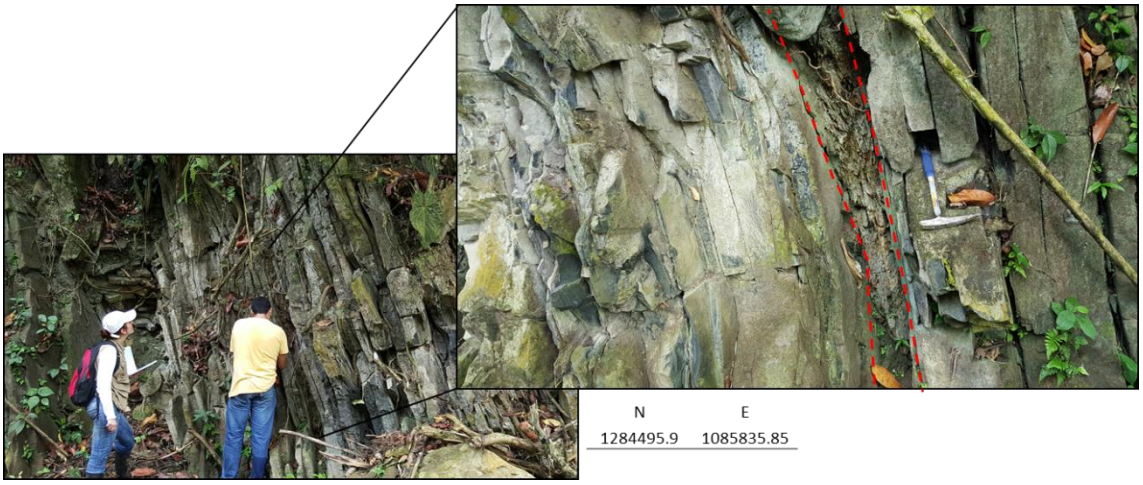
Entre los deltas veinte tres (23) y veinte siete (27), se midió sobre la carretera que conduce a la quebrada un intervalo pobremente expuesto del miembro Galembo. Aquí se describió una secuencia de lodolitas ligeramente calcáreas de color gris claro a marrón crema intercalada con lodolitas de color gris y delgadas capas de arcillas de color amarillo rojizo las cuales fueron descritas por Rangel *et al.,* 2000 como capas de bentonitas. Estas bentonitas también están presentes hacia la parte inferior de este miembro sobre la bifurcación hacia el sureste que hace la quebrada (Bayona. G, comunicación verbal). (**Ver Figura 16**)

El contacto con la formación Umir se ve representado en campo por un cambio de la morfología de la quebrada. Morales *et al.* (1958), propone que el contacto de la Formación La Luna con la suprayacente Formación Umir al menos localmente es discordante.

Figura 14. Niveles de fosforitas observados al tope del Miembro Galembo.

Figura 15. Capas de Chert de 5 a 7 cms observadas al tope del Miembro Galembo.

Figura 16. Capas de bentonitas observadas en el Miembro Galembo.



5.2 DEFINICIÓN DE FACIES

El análisis de facies es un método esencial para la reconstrucción de ambientes paleodepositacionales, así como para el entendimiento de los cambios climáticos y la historia de subsidencia de una cuenca sedimentaria. Las características analizadas como la dimensión, estructuras sedimentarias, tamaño y tipo de grano,

contenido biogénico y color de la roca sedimentaria reflejan las condiciones bajo las cuales esta fue formada (Nichols G., 2009).

El intervalo estratigráfico estudiado en la sección Quebrada La Sorda, está representado por una sucesión de sedimentos ricos en materia orgánica de apariencia monótona con buen potencial de generación de crudo. Debido a que no es clara una terminología estandarizada para denominar facies en rocas de grano fino ricas en materia orgánica se clasificaron las diferentes facies a partir de la relación de los constituyentes texturales. Con el fin diferenciar la procedencia del carbonato en las litologías fino granulares y poder definir su presencia en la matriz o en los granos, se muestrearon estratégicamente diferentes litologías para análisis petrográficos, los cuales contribuyeron a identificar las características observadas en afloramiento. Para la asignación del nombre de estas rocas a nivel petrográfico, se empleó la clasificación para rocas mixtas propuesta por Folk, (1974) según los diagramas ternarios, Aloq-Ort-Terr (Aloquímicos-Ortoquímicos-Terrígenos), mientras que para las calizas se usó la clasificación propuesta por Folk (1962) y Dunham (1962).

Por lo tanto, el reconocimiento de características como tamaño de grano, estructuras sedimentarias, trazas fósiles, contenido fosilífero, geometría y relaciones espaciales de los cuerpos sedimentarios observados en campo, junto con los análisis petrográficos (cambios texturales y composicionales) de las muestras seleccionadas estratégicamente sobre la columna estratigráfica, permitieron reconocer y clasificar doce (12) tipos de facies (**Figura 17**). Se nombran con letras descriptivas las principales características de la roca, siendo el primer componente el tipo de textura (letra en mayúscula) y luego se complementa con la estructura sedimentaria física o biogénica principal (letra en minúscula). La distribución estratigráfica de cada una de estas facies se plasma en la columna estratigráfica (**Ver. Anexo C**).

Figura 17. Facies definidas en la secuencia descrita en la Sección Quebrada La Sorda.

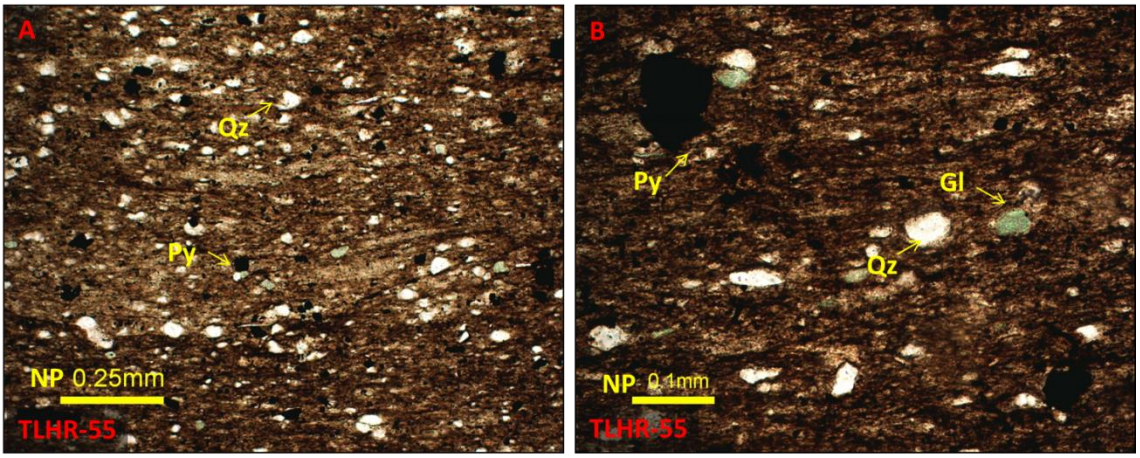
Lf	Lodolita fisil
Lm	Lodolita masiva.
Lms	Lodolita masiva con siderita
Lfmo	Lodolita bioclástica fosilífera laminada
Lb	Lodolita bioclástica
WPm	Wackestone/Packstone masivo a debilemente laminado
Wl/Ml	Wackestone /Mudstone laminado
Lb/Ml	Lodolita bioclástica/ Mudstone laminado
Grp	Grainstone de ooides fosfáticos.
WP/Lbp	Wackstone – Packstone /Lodolita bioclástica con fosfatos (WP/Lbp)
Ch	Chert
B	Bentonita

Lodolita fisil : (Lf)

Texturalmente corresponde a una lodolita fisil a ligeramente laminada, estas facies representa el 2.47% de la sección descrita.

La matríz es lodosa de color marrón a marrón rojizo oscuro (71%), constituida por minerales indiferenciados petrográficamente de tamaño de grano arcilla. Las partículas de aloquímicos no son evidentes en la muestra representativa de esta facies (THLR 55). Ortoquímicos diferenciados a manera de trazas por la presencia de cuarzo microcristalino. Los componentes terrígenos son principalmente granos de cuarzo (Qz) detrítico de tamaño limo (15%) los cuales presentan sobrecrecimiento de illita que al unirse forman muscovita. Como minerales accesorios se destaca la presencia de cristales de pirita (Py) autigénica diseminados en la matriz (1%), material “bituminoso” al parecer laminado (13%) y trazas (Trz) de peloides de glauconita (?). (**Ver figura 18**).

Figura 18. Facies Lodolita fisil (Lf): Matriz de color marrón oscuro compuesta de minerales no diferenciados de tamaño arcilla, con contenido de materia orgánica y minerales de cuarzo tamaño limo. Fotomicrografía A. Facies (Lf), lodolita fisil, nótese el contenido de cuarzo tamaño limo y pirita. Tomada en Nicoles Paralelos (NP). Detalle de la fotomicrografía A tomada en nicoles paralelos (NP), nótese la presencia de Glauconita (Gol).



Lodolita masiva: (Lm)

Estas facies se identifica a nivel macroscópico y es diferenciada de la facies anterior por su compormtamiento masivo dentro de la secuencia. Se identifican capas de un comportamiento más tabular las cuales no reaccionan al contacto con ácido clorhídrico (HCL). Son de color negro a gris medio. Esta facies constituye el 6.9% de la formación La Luna.

Lodolita masiva levemente fosilífera con siderita: (Lms).

Estas facies está representada por delgadas capas de color rojizo de aproximadamente 20 – 30 centímetros de espesor, la cual se encuentra entre facies de Lodolita masiva **(Lm)** descrita anteriormente. Texturalmente corresponde

a una lodolita masiva, donde los cristales de siderita dan una sensación de bandeaminto a la roca **(TLHR-59).**

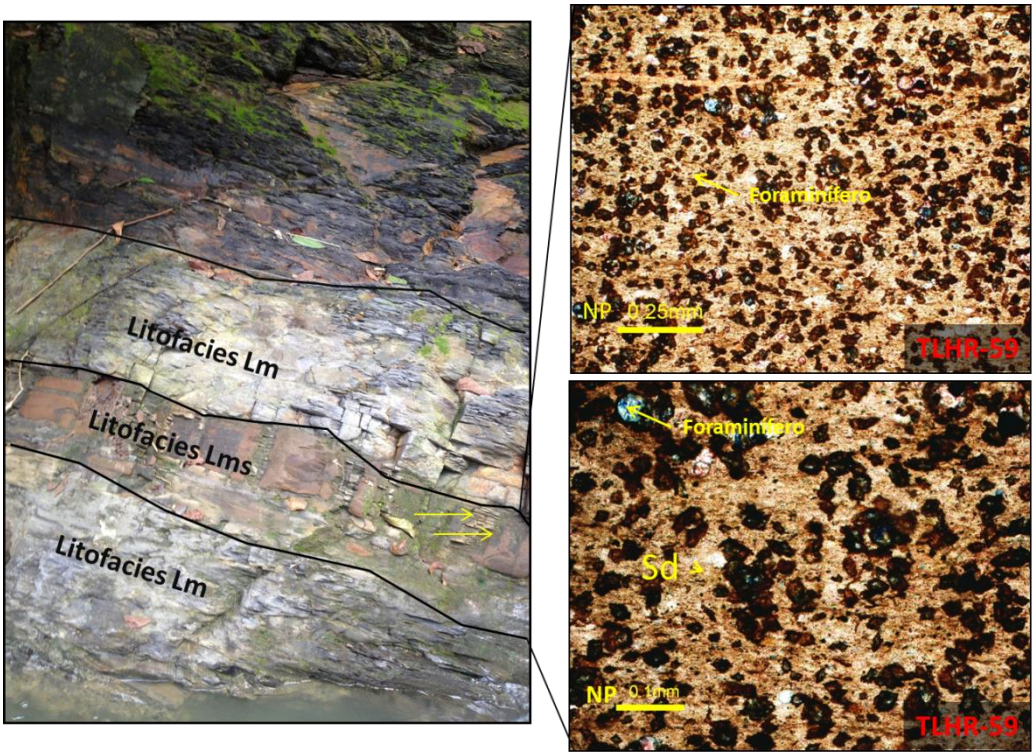
La matriz (70%) se observa de color marrón claro conformada por minerales tamaño arcilla y limo indiferenciados (filosilicatos?) petrográficamente. Los componentes aloquímicos son escasos foraminíferos los cuales se encuentran algunos formando un núcleo de siderita ó rellenos principalmente de carbonato ferroso (5%). Como minerales ortoquímicos se observa siderita (Sd), dispuestos en agregados finos de cristales subhédricos (25%), con birrefrigencia alta, la cual se forma por eventos diagenéticos en un medio rico en soluciones ferrosas. Se presentan como minerales accesorios trazas de pirita (Py). (**Ver figura 19**).

Lodolita fosilífera rica en materia orgánica (Lfmo)

Esta facies se caracteriza por presentar un expresivo aumento en el contenido de partículas de foraminíferos, los cuales en ocasiones contribuyen a la porosidad (porosidad móldica (ϕm)). Adicionalmente la matriz arcillosa es muy rica en materia orgánica. Esta facies representa el 11.67% de la sección descrita.

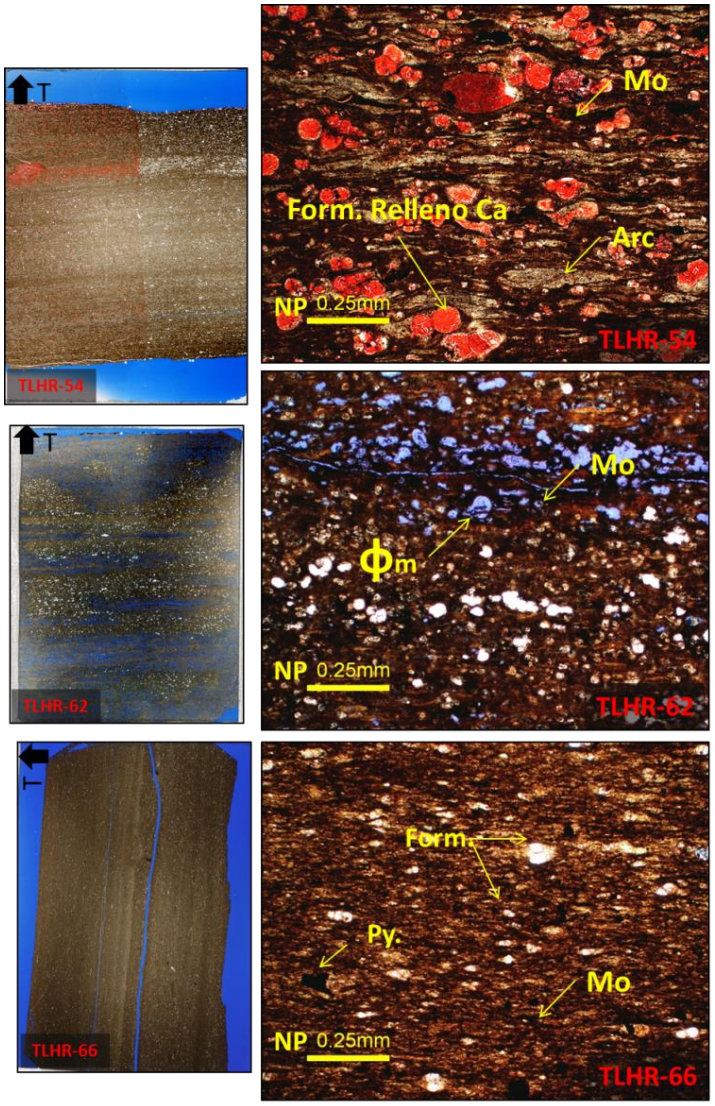
Texturalmente corresponde a una lodolita masiva laminada a ligeramente laminada. La matriz se compone de minerales no diferenciados petrográficamente rica en materia orgánica, lo que le da a la roca una coloración marrón oscuro a negro (67 a 80%). Los componentes aloquímicos (15 – 30%) son foraminíferos mal preservados, algunos presentan sus cámaras rellenas de carbonato no ferroso y materia orgánica. Como materiales ortoquímicos se presentan ligeros parches de micrita y sílice microcristalina, principalmente en la muestra (TLHR-54). Como minerales accesorios se observa pirita autigénica a manera de trazas. (**Ver figura 20**)

Figura 19. **Facies Lms: Lodolita masiva con siderita. Capas de color marrón rojizo, intercaladas con facies de lodolita masiva. A nivel petrográfico se observa siderita (Sed), dispuesta en agregados finos de cristales subhédricos con alta birrefringencia. Fotomicrografías tomadas en Nicoles paralelos (NP).**



N:1085707.467 E: 283988.458

Figura 20. Facies Lfmo: Lodolita fosilífera con alto contenido de materia orgánica. Obsérvese foraminíferos recristalizados por calcita no ferrosa y otros disueltos formando porosidad móldica (ϕm). Fotomicrografías tomadas en nicoles paralelos (NP). Mo. Materia orgánica, Arc. Arcilla. Py. Pirita.

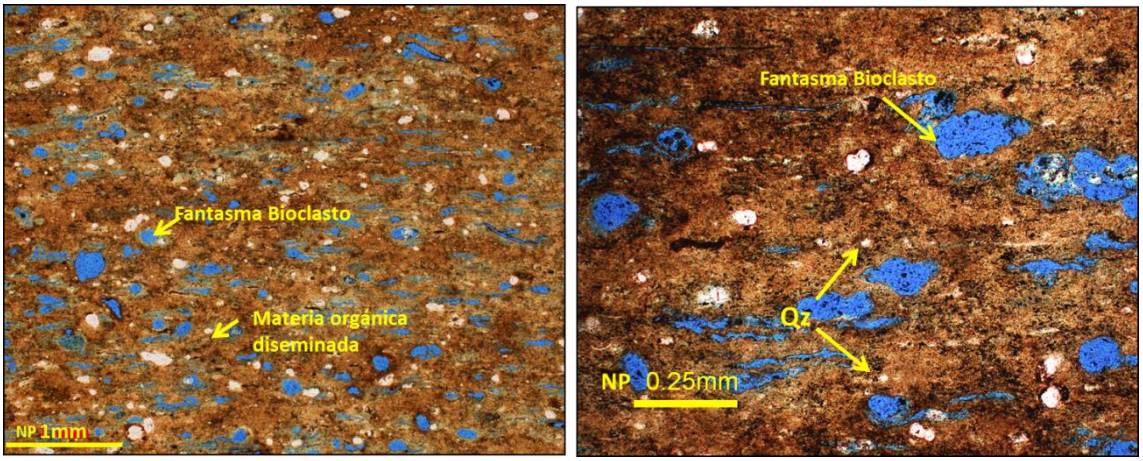


Lodolita bioclástica: (Lb)

Matriz lodosa de color marrón rojizo a marrón oscuro, constituida por minerales indiferenciados petrográficamente de tamaño limo-arcilla, con contenido de

materia orgánica posiblemente fosfatizada. Esta facies se representa como una ligera variación de la facies descrita anteriormente **(Lfmo)** debido a que presenta menor contenido de materia orgánica. Los componentes aloquímicos estan constituidos por partículas de bioclastos los cuales se encuentran parcialmente rellenos de materia orgánica (Mo) y sílice microcristalina (Si). Debido a la disolución de los carbonatos se observa porosidad tipo móldica "fantasmas" de foraminíferos. Como material terrígeno se presentan trazas de cuarzo (Qz) tamaño limo (**figura 21**). Esta facies son el 11.14 % de la sección descrita.

Figura 21. Facies Lb: Lodolita fosilífera con alto contenido de materia orgánica. Obsérvese el alto porcentaje de bioclastos disueltos formando porosidad móldica (ϕm).Fotomicrografía muestra TLHR-19, tomada en nicoles paralelos (NP).

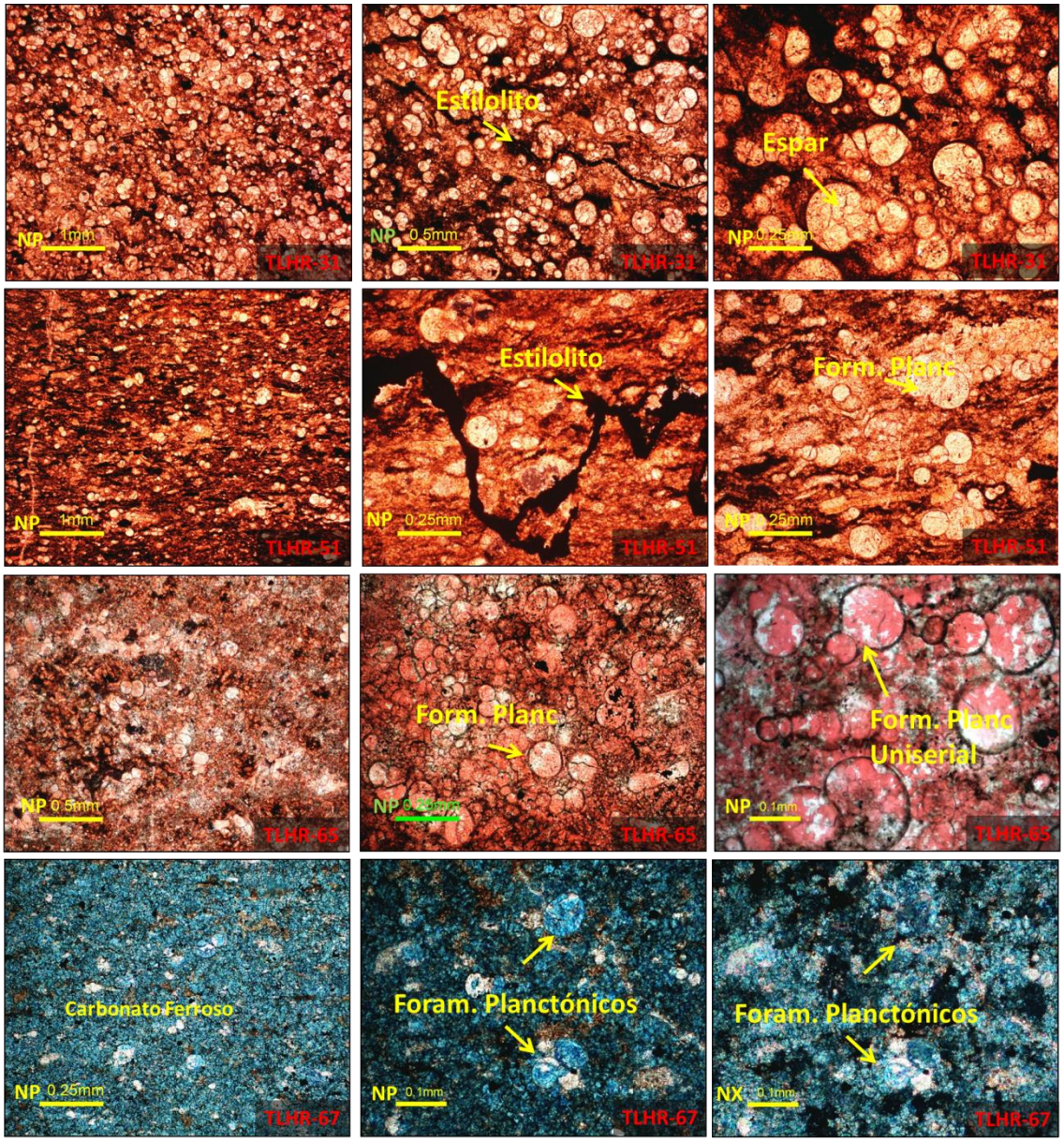


Wackestone /Packstone de foraminíferos, masiva a debilemente laminada (WPm).

El contenido de componentes ortoquímicos y aloquímicos son los que se encuentran en mayor proporción en estas rocas, por lo que se clasifican texturalmente como calizas tipo Wackestone-Packstone. Los componentes ortoquímicos estan formando mosaicos de micrita y microesparita, se presentan

masivas a ligeramente laminadas. Los materiales aloquímicos son principalemente foraminíferos planctónicos remplazados por micrita o sus cámaras se encuentran rellenas de carbonato no ferroso, materia orgánica y localmente sílice microcristalina. La matriz contiene minerales indiferenciados petrográficamente de tamaño arcilla y materia orgánica. Como minerales accesorios se presenta trazas de pirita (Py) autigénica diseminada en la matríz y a manera de parches o como estilolitos paralelos o perpendiculares a la laminación, se observa material orgánico bituminoso ?. La muestra TLHR-67, tiene una alta proporción de carbonato ferroso lo que podría indicar que las condiciones de depósito se dieron en un medio restringido ferroso y muy anóxico (**Ver figura 22**). El 11.82 % de las rocas descritas sobre la sección Quebrada La Sorda corresponde a estas facies.

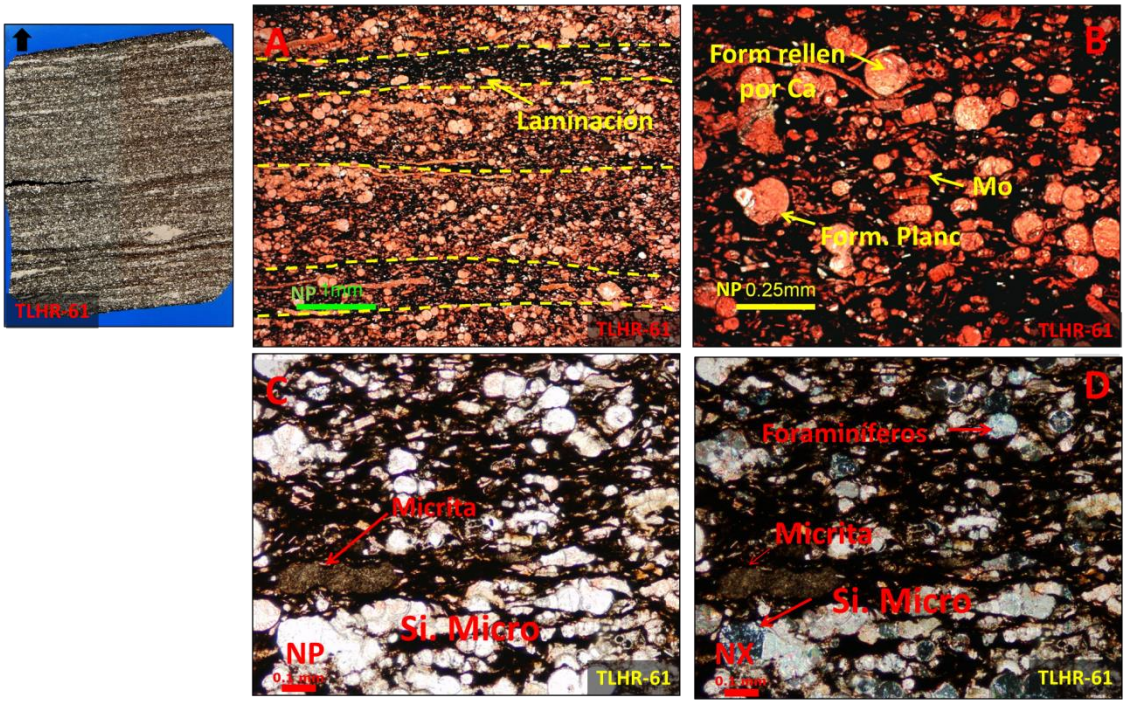
Figura 22. Facies WPm: Packstone/Wackestone de foraminíferos, masiva. Se observa alto contenido de materia orgánica y fragmentos de foraminíferos rellenos de calcita no ferrosa. Eventos de presión solución que generan estilolitos. Microfotografías tomadas en nicoles paralelos (NP) y nicoles cruzados (NX).



Wackestone/Mudstone laminado (Wl/Ml)

La roca presenta alto contenido de materia orgánica que enmascara la matriz de la roca. Es clasificada como un Wackestone/Mudstone laminado con alto contenido de materia orgánica. Los materiales ortoquímicos corresponden con microesparita y lodo calcáreo (micrita), dispuestos en forma de flóculos o parches alargados. La matriz es rica en materia orgánica. Los componentes aloquímicos son principalmente foraminíferos uniseriales reemplazados por micrita con sus cámaras rellenas de carbonato no ferroso y localmente por sílice microcristalina (**Figura 23**). Esta facies se encuentra presente en un 14.86% de la sección.

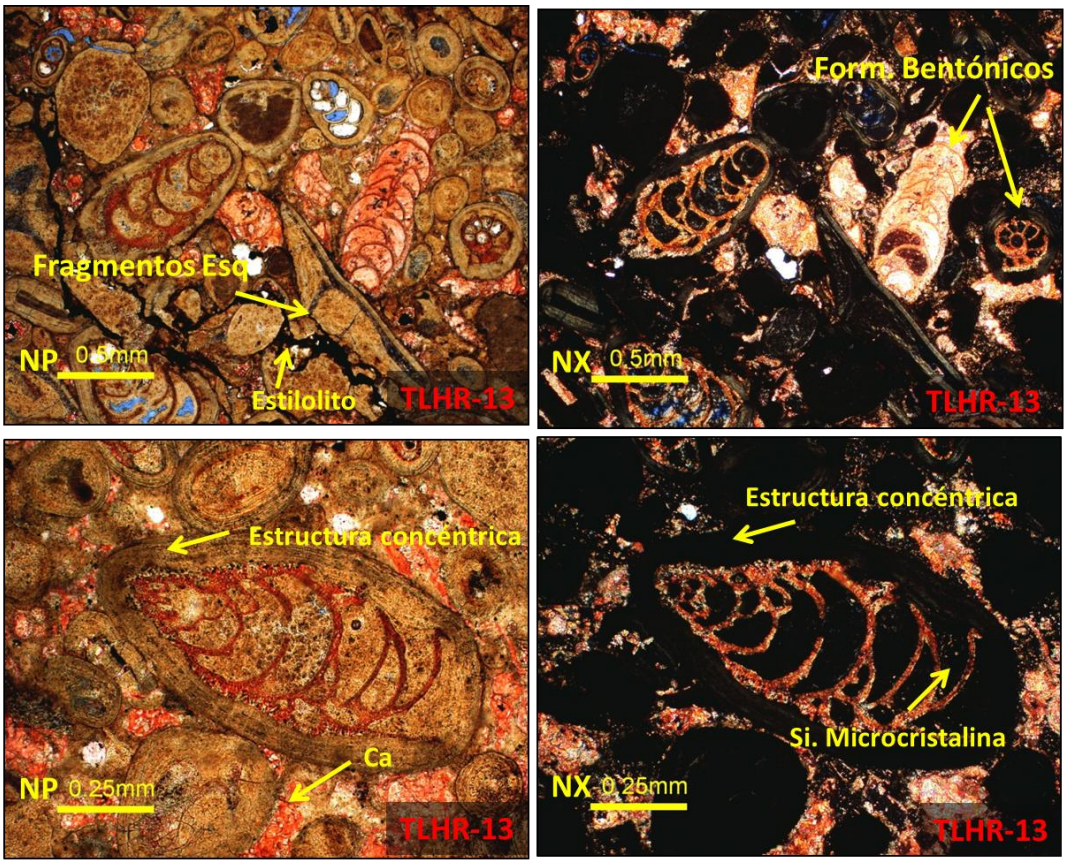
Figura 23. Facies Wl/Ml: Wackestone laminado/Mudstone laminado de foraminíferos, masiva a débilmente laminada. Se observa alto contenido de materia orgánica y fragmentos de foraminíferos rellenos de calcita no ferrosa. Microfotografías A, B tomadas en nicoles paralelos (NP) con tinción. Microfotografía C, D tomadas en nicoles parales (NP) y cruzados (NX) respectivamente. Sin tinción.



Grainstone de ooides fosfáticos. (Grp)

Caliza grano soportada clasificada texturalmente como Grainstone (Dunham, 1962). Esta facies se observa al tope de la secuencia y representa el 1.21% de la sección descrita en el área de estudio. Los materiales aloquímicos son ooides fosfáticos de tamaño que varía de 0.25 a 1 milímetro de diámetro. Se observan foraminíferos bentónicos, pellets y fragmentos de peces tamaño arena media a gruesa. Los bioclastos son el núcleo de un ooide los cuales se presentan de forma ovalada a elipsoidal con la estructura interna del núcleo concéntrica. Sílice microcristalina rellenando las cámaras de los foraminíferos. Presencia de material bituminoso formando estilolitos y material terrígeno (Qz) tamaño limo. El material intergranular es cemento calcáreo, en ocasiones representado por microesparita (**figura 24**).

Figura 24. Facies Grp: Grainstone de ooides fosfáticos. Los bioclastos son el núcleo de un ooide, los cuales se presentan de forma ovalada a elipsoidal con la estructura interna del núcleo concéntrica. Sílice microcristalina rellenando las cámaras de los foraminíferos. Microfotografías de Izq. tomadas en nicoles paralelos (NP). Microfotografías de Der. tomadas en nicoles cruzados (NX).



Wackestone, Packstone laminado / Lodolita bioclástica ligeramente laminada con alto contenido de fosfato (WP/Lbp)

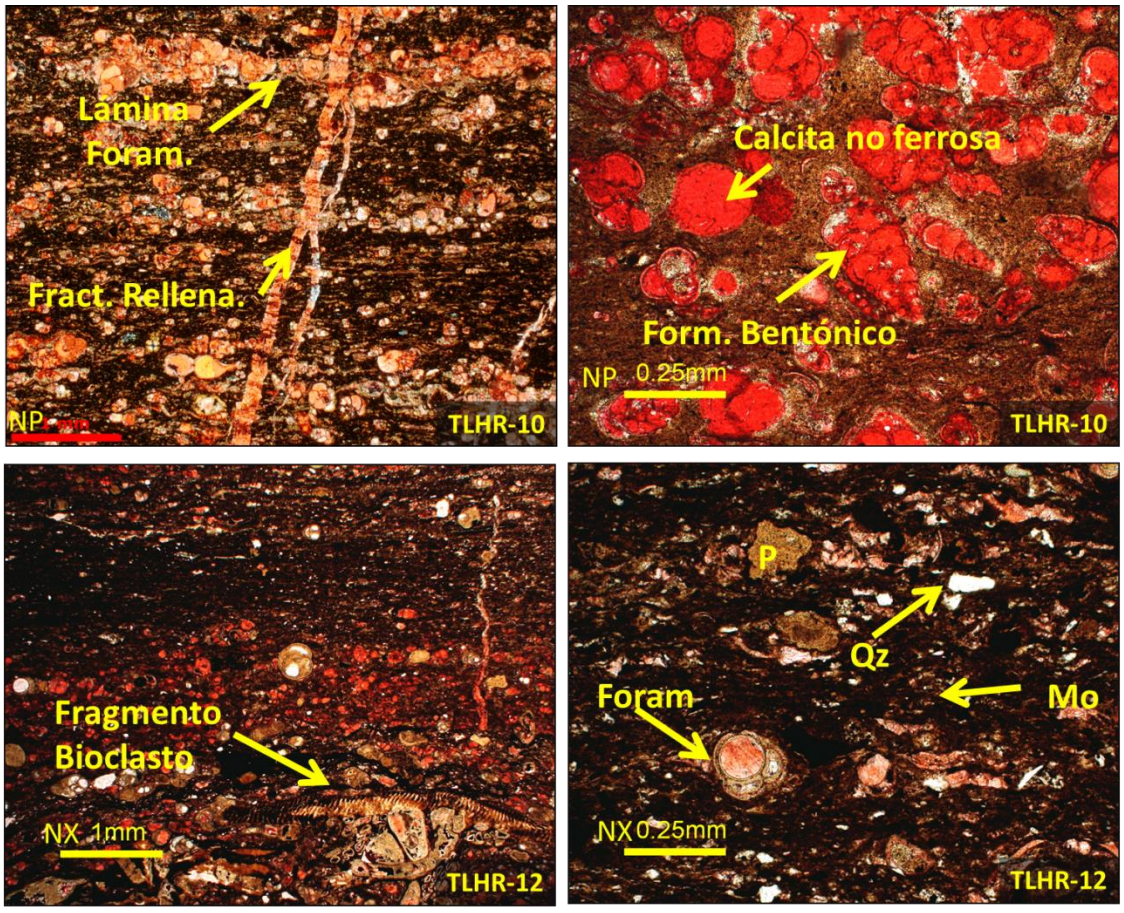
Estas petrofacies se caracterizan por una marcada presencia de material terrígeno tamaño limo. La litología con mayor contenido calcáreo está caracterizada por presentar una matriz rica en materia orgánica (Mo), de color marrón oscuro (TLHR-10). Los componentes aloquímicos son principalmente foraminíferos

bentónicos, peloides fosfáticos y fragmentos de braquiópodos mal preservados. Los foraminíferos están siendo reemplazados por calcita. Como mineral accesorio se destaca la presencia de pirita (Py). Se observa una alternancia con lodolitas bioclásticas laminadas y se distingue de la litología anterior por observarse un ligero aumento en el contenido de cuarzo detrítico y menor presencia de lodo calcáreo (TLHR-12). Los componentes aloquímicos son principalmente peloides fosfáticos, fragmentos de braquiópodos mal preservados y foraminíferos dispuestos en láminas. Como minerales accesorios se observan pirita (Py) (**Ver figura 25**). Estas facies constituyen el 20.4% de la sección en estudio.

Lodolita bioclástica /Mudstone Laminado.

Esta facies se diferencia de la anterior por tener mayor alternancia de capas de lodolita calcárea bioclástica alternado con capas de mudstone laminado con alto contenido de materia orgánica. Se observan parches de lodo calcáreo y láminas donde se encuentran dispuestos los bioclastos. Los componentes aloquímicos son principalmente foraminíferos y fragmentos fósiles fosfatizados. Esta facies representa el 16.05% de la sección descrita.

Figura 25. Facies WP/Lbp: Wackestone, Packstone /Lodolita bioclástica ligeramente laminada con alto contenido de fosfatos, se presenta abundantes foraminíferos bentónicos rellenos de calcita no ferrosa, pelets fosfáticos, partículas terrígenas tamaño limo y arena. NP. Fotomicrografías tomadas en nicoles paralelos y cruzados (NX). QZ. Cuarzo, P. Fosfatos, Mo. Materia orgánica.



Bentonita (B).

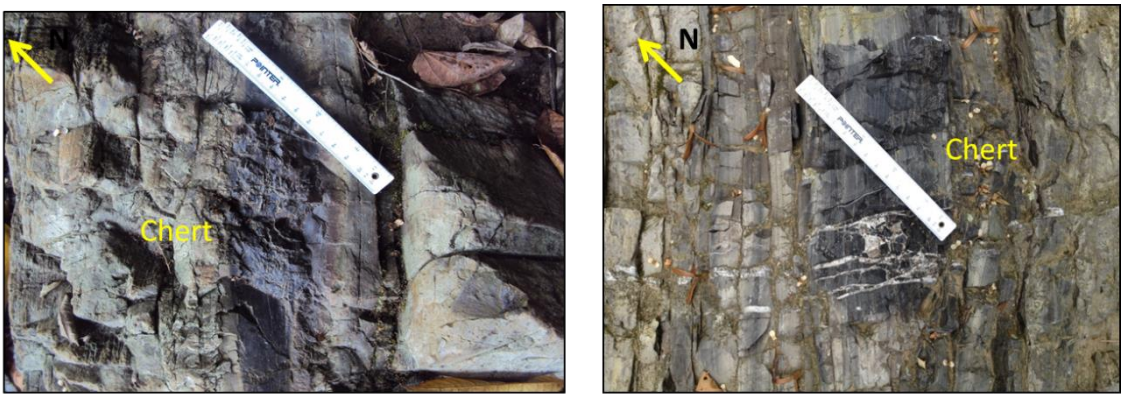
Intervalos de arcillas de color amarillo grisáceo a naranja grisáceo las cuales se encuentran dispuestas en capas de 10 a 15 cm (**Figura 26**). Representa el 0.6% del total de facies descrita.

Figura 26. Facies (B). Capas de arcilla de color armarillo grisáceo a verdoso, naranja caracterizadas como bentonitas.

Facies Chert (Ch)

Representado por capas de 6 a 10 cm de espesor de color negro oscuro. Estas facies se encuentran principalmente intercalando las facies tipo (WP-Lbp), Wackestone –packstone ricas en fosfatos (**Figura 27**). El 2.65% de la sección contienen esta facies.

Figura 27. Capas de chert de 4 a máximo 15 centímetros de espesor. Se encuentran distribuidas a lo largo de la columna.



N 1284884.4 E 1085746.6

5.4 ANÁLISIS BIOESTRATIGRÁFICOS

Con el objetivo de definir tanto litológicamente como bioestratigráficamente los miembros de la formación La Luna aflorantes en el borde Oriental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, se realizaron análisis micropaleontológicos (nueve muestras) y palinológicos (tres muestras) a muestras tomadas sobre la Sección Quebrada La Sorda. En sentido general, se presentó un recobro bajo a moderado y una preservación moderada a mala de la microfauna. Del material analizado, las muestras TLHR-18 y TLHR-68 fueron estériles en microfauna (Patarroyo G., 2014 para este informe) y la muestra TLHR 25 aunque presenta buen recobro de palinomorfos (quistes de dinoflagelados) se encuentran muy mal preservados (Rueda. M, 2016).

A partir de la microfauna encontrada y de las descripciones y análisis realizados en campo se sugiere una interpretación litoestratigráfica que difiere de las propuestas en estudios anteriores (Ward *et al*., 1973; Rangel *et al*., 2000; Torres, 2013; Sarmiento *et al*., 2015; entre otros). Esta interpretación será discutida en el capítulo seis con base en los resultados obtenidos en el presente estudio. En la

figura 28, **tabla 1,** se relacionan las muestras analizadas y en el **anexo B**, se presentan los resultados de los análisis bioestratigráficos.

Figura 28. **Mapa de localización con ubicación de las muestras analizadas para dataciones bioestratigráficas.**

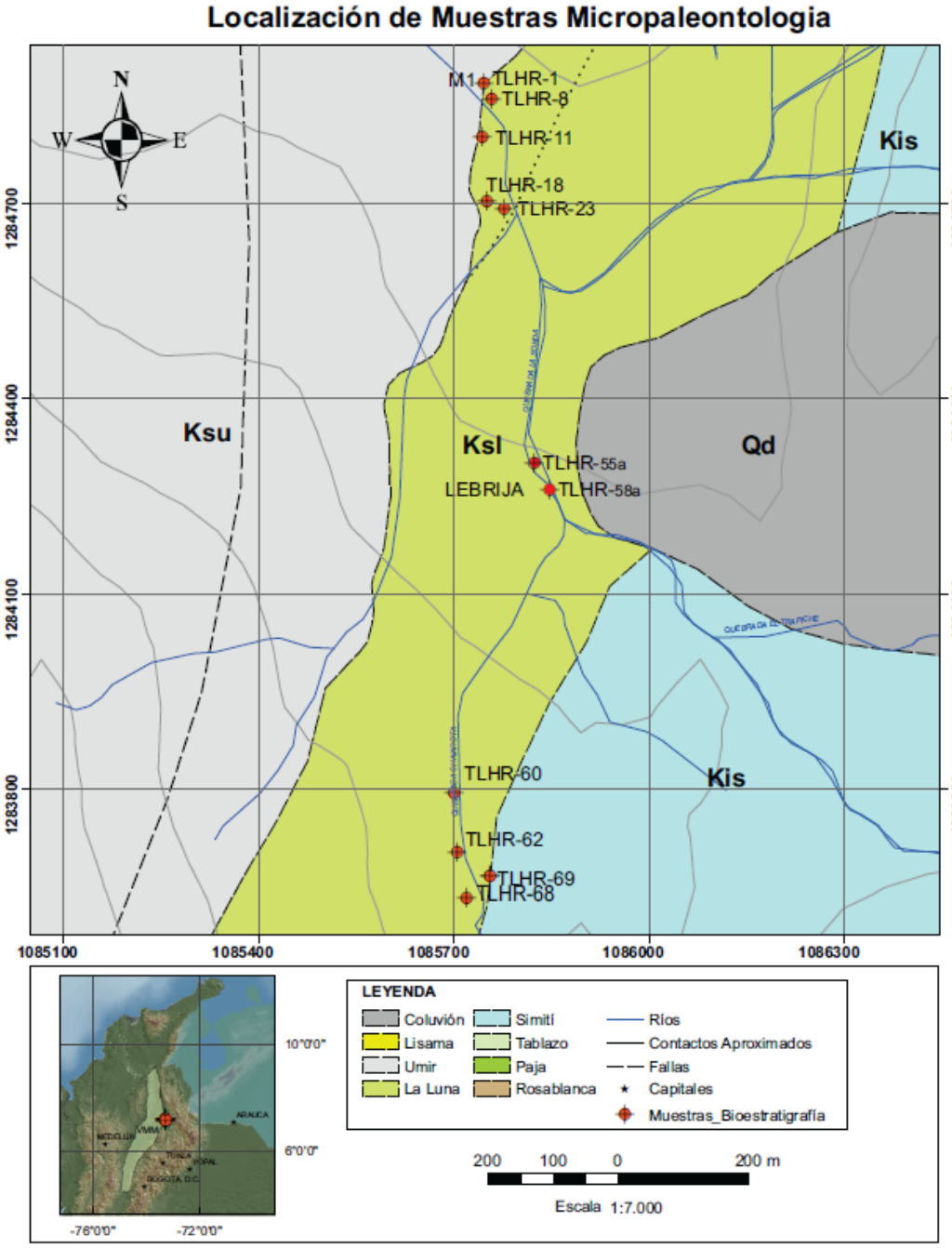


Tabla 1. Muestras analizadas para dataciones bioestratigráficas en la sección Quebrada La Sorda. En rojo se indican las muestras estériles en microfauna. *Litoestratigrafía propuesta en estudios previos. Litoestratigrafía sugerida de acuerdo a la microfauna encontrada y a los análisis discutidos en el presente trabajo.

DELTA	TIPO DE ANÁLISIS	MUESTRA	PROFUNDIDAD ESTRATIGRAFICA (metros)	LITOESTRATIGRAFÍA (Ward *et al.*, 1973; Rangel *et al*., 2000)	LITOESTRATIGRAFÍA (Sarmiento *et al*., 2015)	LITOESTRATIGRAFÍA PROPUESTA EN EL PRESENTE ESTUDIO
D1	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-01	0.5	La Luna (Galembo)	La Luna (Galembo)	Umir (basal)/La Luna
D9	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-08	22.5	La Luna (Galembo)	La Luna (Galembo)	La Luna (Galembo)
D12	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-11	26.5	La Luna (Galembo)	La Luna (Galembo)	La Luna (Galembo)
D25	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-18	80	La Luna (Pujamana)	La Luna (Pujamana)	La Luna
D30	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-23	110.5	La Luna (Pujamana)	La Luna (Pujamana)	La Luna (Galembo)
D37	PALINOLOGíA	TLHR-25	175	La Luna (Pujamana)	La Luna (Pujamana)	La Luna (Pujamana)
D61	PALINOLOGíA	TLHR-55a	268	Simití	El Salto	La Luna (Pujamana)
D64	PALINOLOGíA	TLHR-58b	277	Simití	No descrito	La Luna (Pujamana)
D68	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-60	345	No descrito	No descrito	La Luna (Salada)
D70	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-62	382	No descrito	No descrito	La Luna (Salada)
D73	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-68	426	No descrito	No descrito	Simití (?)
D72	MICROPALEONTOLOGíA	TLHR-69		No descrito	No descrito	Simití (?)

5.5 ASOCIACIÓN DE FACIES Y AMBIENTE DE DEPÓSITO.

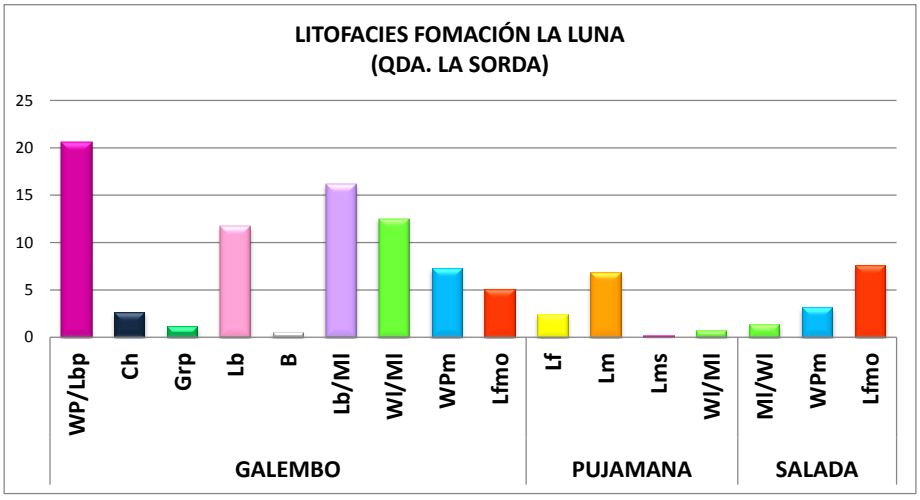
La integración de los diferentes conjuntos de datos tomados en campo (datos estructurales, análisis de facies a nivel macro / micro, datos bioestratigráficos y la expresión morfológica de los contactos) muestran que la secuencia aflorante sobre la sección Quebrada La Sorda estuvo influenciada por la depositación de sedimentos muy finos donde parte de sus componentes fueron generados a partir de la fragmentación de restos de animales los cuales por procesos físico – químicos sufren diagénesis y precipitan los principales minerales de la roca (calcita y fosfatos). Los sedimentos se disponen casi paralelos entre sí, indicando que fueron depositados lentamente sobre el lecho marino con un flujo de energía muy bajo y poca influencia del oleaje y las corrientes. La asociación de facies muestra que el intervalo descrito hace parte de las de sedimentitas del Cretácico

Superior las cuales son reconocidas en el Valle Medio del Magdalena como Formación La Luna.

Las facies de dominio calcáreo son las que se encuentran en mayor proporción dentro de la secuencia descrita. Hacia la parte media del intervalo se depositan las facies menos competentes y con mayor influencia de material terrígeno de la Formación La Luna (Miembro Pujamana).

En la **figura 29**, se indica la asociación de facies y el porcentaje que predomina en para cada uno de los miembros caracterizados. El Miembro Galembo es el que se encuentra con mejor exposición de roca por lo que fue posible analizar con mayor detalle las facies características.

Figura 29. **Porcentaje de facies descrito en los diferentes miembros de la Formación La Luna.**



De base a tope, la secuencia inicia donde se da un cambio morfológico entre capas poco competentes de arcillas arenosas de color amarillo blanquecino (Formación Simití) y comienza a aparecer con mayor frecuencia los niveles calcáreos típicos de la Formación La Luna. Hacia la base, entre los deltas 73 y 68, se encuentra una secuencia pobremente expuesta y se identifican tres

secuencias de capas finas a medias tabulares. Las dos primeras secuencias están constituidas por litofacies tipo Wackestone/Packstone masiva **(WPm)** con presencia de cemento calcáreo ferroso y no ferroso**,** intercaladas con lodolitas fosilíferas con materia orgánica **(Lfmo).** Hacia el tope cambia la apariencia masiva de las calizas y se encuentra expuesto un paquete de seis metros de espesor de Wackestone laminado / Mudstone laminado **(Wl/Ml),** con alto contenido de materia orgánica, intercalado con facies de lodolita fosilífera con materia orgánica **(Lfmo).** Los bioclastos presentes en estas facies son dominantemente foraminíferos planctónicos.

La laminación, la ausencia de microfauna bentónica y la abundancia de foraminíferos planctónicos organizados en láminas y el carácter calcáreo observado en estas facies, demuestran que las rocas fueron depositadas en un ambiente marino de muy baja energía (por debajo del nivel de acción de las olas), con fondos de agua poco ventilados. Hacia la base (muestras TLHR- 66 y 67) parece haber ocurrido condiciones con mayor deficiencia de oxígeno ya que decrece el contenido de foraminíferos y se observa una mayor precipitación de carbonato ferroso. Cabe resaltar la presencia de niveles de concreciones calcáreas que parecen ser sin genéticas, ya que están envueltas por la laminación. Los eventos post-depositacionales que caracterizan estas facies está dado por procesos de presión disolución haciendo que la materia orgánica presente en la roca se organice en forma de estilolitos y migre a los espacios porosos de la roca. Hacia la parte alta de este miembro aunque el color y los aspectos de la roca indican condiciones de anoxia al momento de la depositación, la abundancia foraminíferos planctónicos en las facies (**WPm**) y (**Wl/Ml**) podría indicar un alto contenido de nutrientes en la masa de agua que permitió la proliferación de foraminíferos en el medio. Las características sedimentológicas y depositacionales anteriormente descritas permiten proponer que entre los deltas 68 y 73 de la sección expuesta hace parte de la secuencia basal de la Formación

La Luna (Miembro Salada). Esta interpretación es soportada por dataciones bioestratigráficas, las cuales serán discutidas en el capítulo seis.

La parte media de la Formación La Luna está caracterizada por tener el mayor contenido argiláceo y menor calcáreo de toda la secuencia (Galvis-Portilla *et al.,* 2014); por su naturaleza poco competente este miembro esta escasamente expuesto en la sección de estudio. El contacto del Miembro Pujamana con el infrayacente Miembro Salada es establecido en el sitio donde desaparecen las capas calcáreas (delta 68) y se marca un valle de topografía suave. Entre los deltas 67 y 60 se encuentran expuestos niveles lodolitas silíceas friables ligeramente carbonosas. Las facies analizadas en este intervalo están caracterizadas por lodolitas físiles (**Lf**) y lodolitas masivas (**Lm**). Se destaca la presencia de material terrígeno (cuarzo) tamaño limo y trazas de peloides de glauconita. Hacia la parte media de este intervalo se observan capas de poco espesor ligeramente calcáreas, además se reconoce una capa de aproximadamente 20 centímetros de color rojizo la cual es reconocida a nivel petrográfico por la presencia de cristales de siderita que podrían estar indicando que esta parte de la secuencia fue depositada en ambientes pantanosos y reductores de agua más someras. Esta capa es nombrada como facies lodolita masiva con siderita (**Lms**). La asociación facial descrita en este intervalo muestra que los sedimentos fueron depositados en un ambiente de baja energía posiblemente con una marcada influencia continental.

El miembro superior de la Formación La Luna presenta un espesor de 262 metros, la base de este segmento fue definida en el sitio donde desaparecen las arcillolitas silíceas (delta 60) y se da paso a niveles calcáreos muy competentes. Los resultados de las dataciones biestratigráficas que ayudaron a redefinir los límites estratigráficos de este miembro serán discutidos en el capítulo seis.

En este miembro se pueden reconocer a manera general tres segmentos. El primer segmento es marcado hacia la base entre los deltas 60 a 39, aquí se observa una secuencia que inicia con lodolitas fosilíferas laminadas (**Lfmo**), las cuales van aumentando la concentración de carbonato y el contenido de fragmentos fosilíferos dispuestos en láminas (facies Wackestone /Mudstone laminado (**Wl/Ml**)). Se reconocieron también facies de caliza Wackestone/Packstone masivo (**WPm**), la presencia de foraminíferos planctónicos y de material bituminoso es una característica importante de esta facies. Al tope de este segmento se reconocen delgadas capas de bentonitas (**B**) de color marrón rojizo y chert (**Ch**). Por la alta proporción de foraminíferos planctónicos dispuestos en estas facies y la laminación marcada, se propone que los sedimentos analizados a la base del Miembro Galembo fueron depositados bajo condiciones ambientales muy similares a las desarrolladas durante los depósitos del Miembro Salda, en ambientes marinos tranquilos poco oxigenados, con aguas ricas en nutrientes que contribuyeron a la presencia de foraminíferos en el medio.

El segundo segmento se define a partir del metro 220 hasta el metro 65 marcado en la columna estratigráfica (**Ver Anexo. C).** La base corresponde a un intervalo cubierto. El primer intervalo aflorante de este segmento se marca por la alternancia de facies lodolita bioclástica a mudstone laminado (**Lb/Ml**). Sobresale la presencia escasa de cuarzo tamaño limo y minerales arcillosos. Se observan restos bioclastos fosfáticos remplazados por calcita y las primeras ocurrencias de foraminíferos bentónicos (Sarmiento *et al.,* 2015). Este segmento se caracteriza por presentar un mayor contenido de sílice, la parte superior contiene capas de lodolitas bioclásticas (**Lb**), las cuales se diferencian en afloramiento por su coloración amarillo crema y por su apariencia dura. Entre este intervalo se observan delgadas capas de chert y unas capas de arcilla de color amarillo grisáceo las cuales se relacionas a niveles de bentonita (?). La asociación de facies permite proponer un ambiente marino transicional menos profundo que el

segmento anteriormente descrito debido a que hay mayor presencia de material terrígeno y a primeras ocurrencias de foraminíferos bentónicos.

Seguido de este intervalo, se observa la depositación de facies Grainstone de ooides fosfáticos (**Grp**); ambientalmente el contenido de ooides indica que dentro de la secuencia analizada para la Formación La Luna éste segmento es el que presenta mayor energía en el medio, donde el régimen depositacional es predominantemente carbonato o una mezcla de carbonato y sílice con condiciones de más alto flujo, por lo tanto se pasa de un ambiente de regimen tranquilo a uno por encima del nivel de acción de las olas.

Seguido de estas rocas se observan facies denominadas por una alternancia de litologías Wackestone Packstone impuro y Lodolitas bioclásticas (**WP/Lbp**), ambas con alto contenido de restos fosfáticos, foraminíferos uniseriales y biseriales, peloides fosfáticos, fragmentos de braquiópodos mal preservados y fragmentos tamaño limo fino a muy fino de cuarzo.

La alternancia con las capas **WP/Lbp** indican cambios en el régimen de energía ya que los sedimentos parecen haberse depositado en un ambiente más tranquilo de plataforma externa por debajo de la línea de la acción de las tormentas. Debido a la alta presencia de foraminíferos bentónicos se puede indicar que era un ambiente de condiciones de salinidad normal, con gran cantidad de nutrientes disueltos en la columna de agua, además el alto contenido de materia orgánica y la presencia de pirita son evidencia de la alta productividad que favorecieron la acumulación y preservación de la materia orgánica.

Ambiente de depósito

La asociación facial realizada para los depósitos aflorantes en la Sección Quebrada La Sorda, permite proponer que los sedimentos de la Formación La

Luna se depositaron en un ambiente de plataforma externa a interna con condiciones de acumulación en fondos relativamente profundos. Hacia la parte media de la sección se reflejan condiciones de depositación marinas someras las cuales vuelven a profundizar en un ambiente de plataforma interna. Hacia el tope de la sección ocurre un aumento en el nivel energético que se evidencia por depósitos de facies Grainstone de ooides fosfáticos (Grp).

5.6 DEFINICIÓN DE CICLOS ESTRATIGRÁFICOS

El primer paso para generar el modelo de secuencias estratigráficas para la sección descrita, fue definir la asociación de facies y los tipos de depósito que predominaron. Esta interpretación parte de la descripción detallada de muestras de afloramiento y del conocimiento regional del ambiente el cual se depositaron los sedimentos durante el Turoniano – Santoniano. Este intervalo de tiempo es el que se infiere a partir de la información bibliográfica disponible (Morales *et al.,* 1958) y del resultado de algunas muestras seleccionadas y analizadas en este estudio.

Se parte del conocimiento de que la Formación La Luna es una unidad transgresiva depositada dentro de una plataforma de mar abierto que progresivamente va somerizando hasta desarrollarse en una plataforma somera. Para una mejor definición de las asociaciones faciales en la secuencia analizada, es importante aclarar los conceptos (**figura 30**) y las consideraciones que se tuvieron en cuenta para definir las superficies que la delimitan.

Superficie de Máxima inundación (*Maximun Flooding Surface* -MFS).

También conocida como la máxima superficie transgresiva (Helland- Hansen and Martinsen, 1996 en Catuneanu., 2011) o final de la superficie transgresiva

(Nummedal et al., 1993 en Catuneanu., 2011). Esta superficie se reconoce como la línea que marca el final de la transgresión de la línea de costa. Por lo tanto separa rocas depositadas a la base durante una transgresión de otras depositadas hacia el tope durante una regresión.

Dentro de la secuencia analizada, esta superficie se marca en intervalos que presenten mayor enriquecimiento de materia orgánica y mejor proporción de sedimentos muy finos, con predominio de facies depositadas en condiciones de ambientes muy tranquilos.

Ciclo Transgresivo (Transgresive Systems Tract -TST)

Un ciclo transgresivo está limitado por una máxima superficie regresiva a la base y la máxima superficie de inundación al tope. Este sistema depositacional se forma durante el aumento del nivel del mar, cuando la acomodación es mayor que la tasa de suministro de sedimento. Los depósitos transgresivos en un ambiente marino profundo se encuentran haciendo *onlap* sobre la pendiente continental (Catuneanu., 2011). En la secuencia analizada esta superficie está relacionada a la facies de litología más fina, composicionalmente son una mezcla de carbonato y cuarzo, con apariencia menos masiva y con aumento en el contenido de materia orgánica hacia el tope.

Ciclo de Alto Nivel (Highstand Systems Tract -HST)

Este ciclo se da en la etapa tardía de subida del nivel base, cuando la tasa de subida del nivel del mar cae por debajo de la tasa de sedimentación generando una regresión normal de la línea de costa. Un ciclo regresivo (HST) está dominado por la combinación de procesos agradacionales y progradacionales. En nuestro sistema depositacional este ciclo está relacionado con la presencia de facies con

mayor predominio calcáreo de apariencia masiva, así como con un bajo contenido orgánico (TOC).

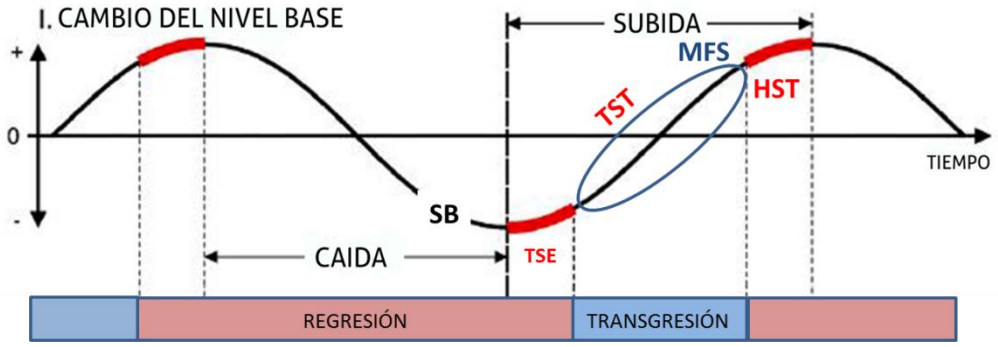
Ciclo de Bajo Nivel (Lowstand Systems Tract -LST)

Este ciclo es depositado durante una caída relativa en el nivel del mar y posteriormente una lenta subida del mismo. Durante la caída del nivel del mar la línea de costa se mueve hacia la cuenca, por lo tanto la plataforma queda expuesta y eroda sedimentos (arenas) hacia aguas profundas. Este ciclo podría ser identificado en el límite entre el Miembro Galembo y la Formación Umir.

En las sección estudiada se emplean los límites de secuencia – superficies transgresivas (términos SB-TSE) para delimitar cada secuencia depositacional. Estos SB-TSE están marcados por el cambio brusco en el contenido de TOC y por los cambios significativos en el patrón de sedimentación.

Con el fin objetivo de evaluar diferentes *sets* de datos que contribuyan a una adecuada interpretación de estratigrafía de secuencias, los datos adquiridos y evaluados en el transcurso del presente trabajo (reconocimiento de estructuras sedimentarias, morfología de las facies, definición de las mismas a nivel macro y dataciones bioestratigráficas) son integrados con los valores de TOC (Carbono Orgánico Total) recopilados del trabajo previo realizado por Rangel *et al*. (2000). Los valores de TOC, han sido utilizados en diferentes autores como un parámetro que ayuda a definir los cambios verticales de facies orgánicas (Rangel *et al.,* 2000, Torres, 2013). Por ejemplo un cambio de condiciones óxicas a anóxicas (relativo aumento del nivel del mar) estaría representado por altos valores de TOC debido a que la materia orgánica se conserva. Por el contrario un cambio de condiciones anóxicas a óxicas (relativa caída del nivel del mar), representa valores bajos de TOC.

Figura 30. Secuencias estratigráficas analizadas dentro del modelo depositacional para la Formación La Luna definidas en relación al cambio del nivel base y las curvas transgresivas-regresivas.



Fuente: Modificado de Catuneanu, 2009

En el presente trabajo se integró la tendencia de la curva de TOC propuesta por Rangel *et al.* (2000), con los diferentes conjuntos de datos ya evaluados para de intentar determinar los cambios del nivel del mar durante la depositación de la Formación La Luna en la sección de estudio. Cabe aclarar que la columna estratigráfica levantada por Rangel *et al.* (2000) muestra bastante coherencia con el intervalo definido como Miembro Galembo en el presente trabajo (**figura 31**). Así mismo, se precisa que la secuencia descrita cuenta con varios intervalos cubiertos, lo que dificulta establecer una interpretación detallada a nivel de cambios faciales principalmente hacia la base. Por lo tanto es importante aclarar que la definición de los ciclos en estos intervalos son asumidos pero guardando coherencia con lo observado en las capas infra y suprayacentes.

Se proponen cinco grandes ciclos estratigráficos de tercer orden (de 1 a 10 Ma de duración) para los depósitos analizados de la Formación La Luna en la sección aflorante Quebrada La Sorda. Los datos de edad asumidos parten de las dataciones reconocida en ámbito geológico para los depósitos de la Formación La Luna (Turoniano – Santoniano) y de los definidos a partir de los resultados obtenido en este trabajo.

A la base de la sección se representa un límite de secuencia o una superficie transgresiva de erosión (SB/TSE-1), marcado por el contacto entre arcillosas ligeramente arenosas reconocidas en el área de estudio como Formación Simití y facies de alto contenido calcáreo (WPm y Lfmo). La secuencia inicia a la base del Turoniano, con una importante transgresión y depositación de un sistema transgresivo (TST) y la primera superficie de máxima inundación (MSF1). Este TST es seguido por un sistema regresivo de alto nivel (HST), el cual también se produce dentro del Miembro Salada y se caracteriza por la depositación de capas gruesas de caliza tipo Wackestone-Packstone masiva típica de las facies (WPm). El siguiente intervalo aflorante es interpretado como un TST analizado por la depositación de facies más laminas y con mayor contenido de materia orgánica (Wl/Ml y Lfmo). En este punto se marca una segunda superficie de máxima inundación (MFS2) y el inicio de la principal superficie regresiva (HST), donde la depositación de las facies (Lm, Lms y Lf), indican la influencia de ambientes marinos menos profundos con una mayor influencia de aporte continental, interpretados como Miembro Pujamana (Turoniano superior a posiblemente Coniaciano Inferior (Morales *et al*., 1958)). . El límite entre los miembros Pujamana y Galembo es identificado como un límite de secuencia (SB/TSE-3). A partir de este punto se da el inicio de una superficie transgresiva (TST) caracterizado por la depositación de facies con alto contenido de materia orgánica (Lfmo), al tope se marca la tercera superficie de máxima inundación (MFS3). Una vez marcada la superficie MFS3, se observa el predominio de facies WPm intercaladas con Ml / Wl, estas facies con mayor contenido fosilífero y menor tendencia en el contenido de TOC son definidas como un ciclo regresivos de alto nivel (HST). Al tope de este ciclo se marca la un cuarto límite de secuencia (SB/TSE4).

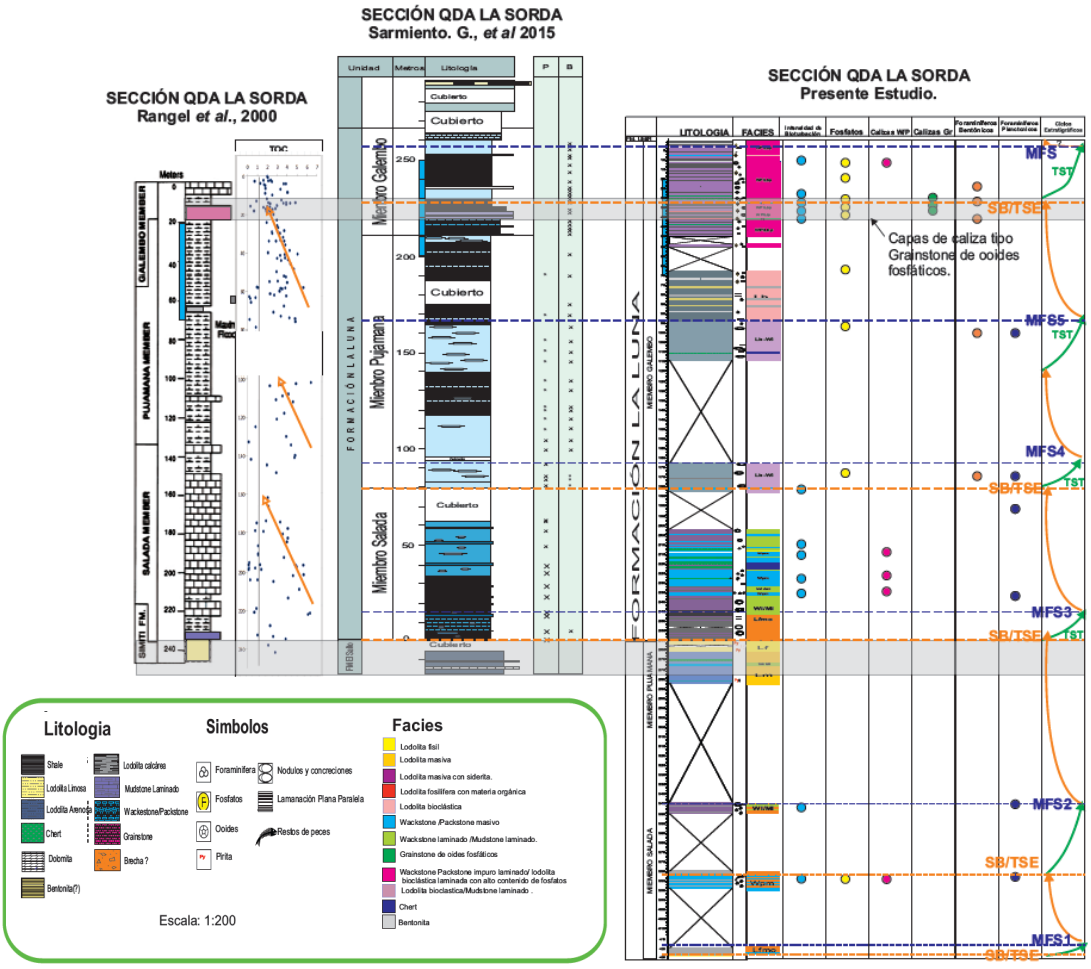
A partir de este punto la secuencia descrita presenta un importante intervalo cubierto lo que dificulta la interpretación de los ciclos, por tal motivo se compara la columna descrita por Sarmiento *et al.* (2015) en el mismo sector y se amarra a la

columna levantada en el presente trabajo (**ver figura 31**). La dos secciones son bastante coherentes en cuanto a la descripción litológica, sin embargo al igual que en los demás estudios revisados, Sarmiento *et al.* (2015) definió un menor espesor para la Formación La Luna en la sucesión que aflora en la Quebrada La Sorda.

La correlación de los datos interpretados en las tres columnas (Rangel *et al.,* 2000; Sarmiento *et al.,* 2015 y la levantada en el presente estudio) permiten inferir dos superficies transgresivas marcadas por la depositación de facies de lodolita bioclástica a Mudstone Laminado (Lb/Ml), las cuales marcan picos en el contenido de materia orgánica y son interpretadas como los puntos de máxima inundación MFS4 y MFS5. Seguido de la máxima inundación MFS5, se interpreta un ciclo progradacional (HST) hacia la parte superior del Miembro Galembo, este ciclo se interpreta con el inicio de la depositación de facies de lodolitas bioclásticas hasta el punto donde se depositan facies Grainstone de ooides fosfáticos (Grp), las cuales marcan un régimen de alta energía y la curva de tendencia de TOC indica un menor contenido de materia orgánica. En este punto se marca un sexto límite de secuencia (SB/TSE6) seguido de una superficie transgresiva.

La **figura 31** (**Anexo D**), muestra los datos que fueron integrados y el análisis realizado dentro de este estudio para soportar el modelo secuencial propuesto para la Formación La Luna, en la sección ubicada en el borde oriental del Valle Medio del Magdalena.

Figura 31. Integración de diferentes conjuntos de datos analizados para soportar el modelo secuencial propuesto para la Formación La Luna en la sección ubicada en el borde oriental del Valle Medio del Magdalena. (Anexo-D).



5.7 RESPUESTA DE REGISTROS ELÉCTRICOS.

Con la finalidad de proponer un análisis de estratigrafía de secuencias para los depósitos de la Formación La Luna que integre la información de afloramiento a subsuelo, se tomó como base la interpretación de registros eléctricos del Pozo Infantas-1623 (ANH e Ingrain, 2012). En el informe de “Integración Geológica de

la Digitalización y Análisis de núcleos" realizado por la ANH e Ingrain (2012), en el Pozo Infantras-1613, se caracteriza a la Formación La Luna a partir de interpretaciones basadas en la sísmica e integración de análisis sedimentológicos (descripción litológica detallada en muestras de núcleos, zanja y pared, petrografía, interpretación sedimentológica del núcleo, análisis convencionales y especiales, etc.), análisis bioestratigráficos, petrofísicos y los resultados de la técnica de digitalización del núcleo.

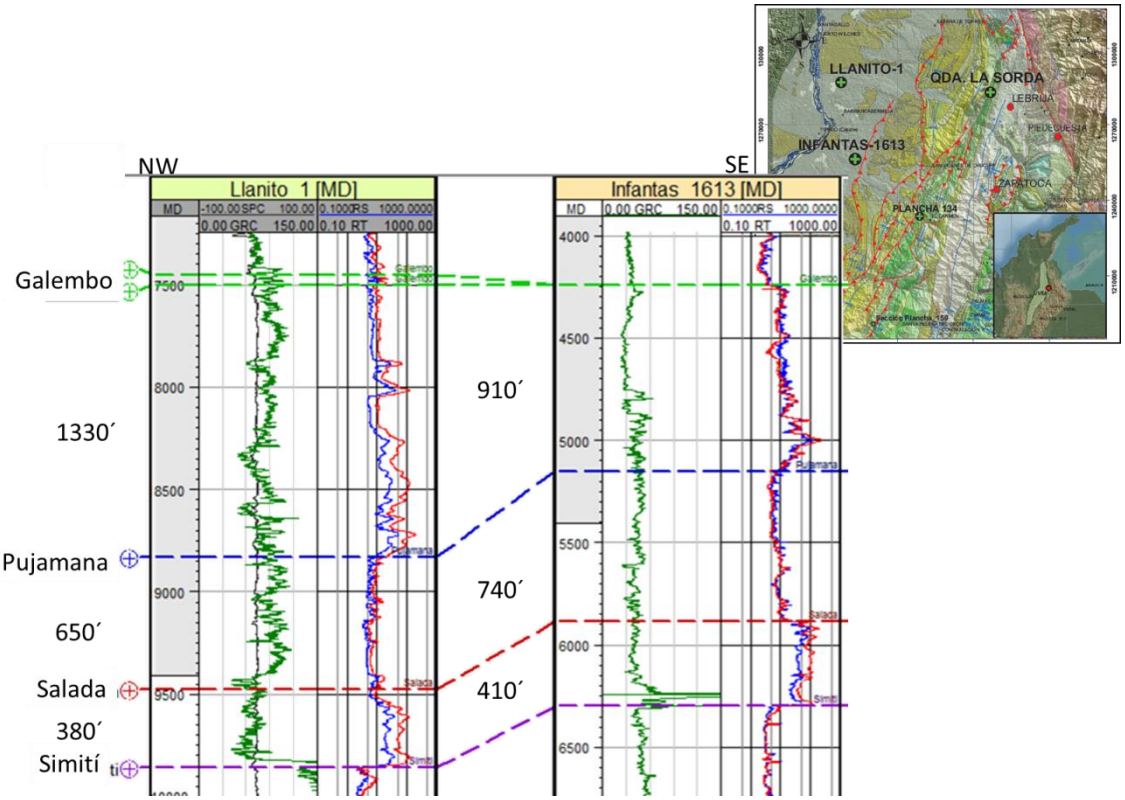
En la **figura 32**, se muestra una correlación estratigráfica en dirección noroeste-sureste entre los pozos Infantas-1613 y Llanito-1, aquí se puede observar las semejanzas en las respuestas de los registros eléctricos y en los espesores entre los dos pozos (ANH e Ingrain, 2012).

Las tendencias de las curvas permiten diferenciar a manera general los tres miembros caracterizados en afloramiento. La base de Formación La Luna, es identificada por la comparación entre la respuesta de los registros Gamma Ray (GR) y resistivo (RT). En el punto donde el RT empieza a mostrar valores altos indica que se pasa de un ambiente con muy poco contenido calcáreo a un ambiente caracterizado principalmente por la presencia de calizas con intercalaciones lutíticas y calcáreas. El registro Gamma Ray, también marca el cambio de este tipo de ambiente ya que muestran una tendencia cilíndrica en el registro.

Hacia la base y tope de la formación los registros eléctricos indican un mayor predominio calcáreo, mientras que para la parte media se presenta una secuencia monótona con una mezcla de material silíceo/argiláceo (**Figura 32**). La interpretación de esta tendencia es confirmada a partir de los análisis "*ShaleXpert",* realizado sobre el Pozo Infantas 1613 (ANH e Ingrain, 2012) los cuales indican que los Miembros Salada y Galembo tienen mayores porcentajes de TOC y bajos contenidos de arcilla, mientras que el Miembro Pujamana

presenta una tendencia contraria (bajo porcentaje de TOC y bajo contenido calcáreo).

Figura 32. Sección estratigráfica entre los pozos Infantas -1613 y Llanito, cuenca del Valle Medio del Magdalena. Gamma Ray (verde), Resistividad Profunda (Rojo), Resistividad somera (Azul).



Fuente: Modificado de ANH e Ingrain, 2012

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 INTERPRETACIÓN DEL MARCO CRONOESTRATIGRÁFICO

Los depósitos de la Formación La Luna aflorantes en la Sección Quebrada La Sorda, ubicada en el Flanco Este del Sinclinal de Nuevo Mundo (Municipio de Lebrija, Santander) ha sido objeto de diferentes estudios debido a que el curso del agua expone un excelente afloramiento de esta formación.

La sección se encuentra a 13 km al norte de la localidad definida por Morales *et al.* (1958), como sección tipo. Basado en dataciones con amonites, pelecípedos y foraminíferos Morales *et al.* (1958), determinó una edad Turoniano Inferior a posiblemente Santoniano para los depósitos de la formación en estudio. Al presente, estos datos de edad son aceptados en el ámbito geológico para la sucesión de la Formación La Luna en Colombia.

Diversos estudios realizados sobre la sección Quebrada La Sorda y sus alrededores han enfocado sus esfuerzos principalmente en definir y reconocer el potencial como roca generadora de la Formación La Luna y su capacidad como reservorio de hidrocarburos no convencionales. Llama la atención que en ninguno de los trabajos publicados realizados sobre la sección o cercana a ella (Ward *et al.,* 1973, Rangel *et al*., 2000, Torres, 2013, Sarmiento *et al*., 2015, entre otros) se han realizado dataciones bioestratigráficas que ayuden a definir con claridad los diferentes miembros de la formación, los cuales han sido inferidos y evaluados con criterios litológicos.

Por tal motivo, en el presente trabajo se realizó un análisis micropaleontológico sobre la sección en estudio, con el fin de tener un control tanto litológico como

bioestratigráfico para definir cada uno de los miembros de la formación. Los resultados adquiridos indican un rango de edad Cenomaniano-Coniaciano para las muestras tomadas hacia la base y Santoniano?-Campaniano para las muestras analizadas hacia el tope de la sección (**ver anexo B**).

Si bien, la calidad de preservación de la microfauna es pobre, se pueden hacer algunas consideraciones de tipo bioestratigráfico con las muestras de mayor recobro. Por ejemplo la muestra **TLHR-01** es la que presenta el mayor número de especies en contraste con las muestras restantes; dicho contraste ha sido observado en el VMM para el contacto Umir-La Luna, sin embargo, la ausencia de formas características de la Formación Umir como *Pyramidulina paupercula* o *Siphogenerinoides* spp., sugiere que el punto datado pertenece a la parte más basal de la formación Umir o sobre el contacto discordante con la formación La Luna. Con estos resultados se propone un rango de edad Santoniano?-Campaniano tardío para la muestra más superior de la sección descrita (Patarroyo, 2014 para este informe).

La microfauna encontrada entre el intervalo 22.5 a 110.5 metros de profundidad estratigráfica, sugiere que las muestras analizadas (**TLHR-8 a TLHR-23**) hacen parte del miembro Galembo de la Formación La Luna (Coniaciano-Turoniano?), debido a que fueron recolectados foraminíferos *Anomalina redmondi*, A. cf. *redmondi, Anomalina* sp. y restos mal preservados asignados al suborden *Rotaliina* (zona de *Praebulimina-A. redmondi cf.* Patarroyo &Torres, 2013 en Patarroyo., 2014).

La microfauna hallada muestra coherencia con los datos de edad propuestos por Morales *et al.* (1958), quien propone *Anomalina redmondii* como un buen indicador de edad Coniaciano ya que esta especie de foraminíferos fue encontrada en asociación con las amonitas *Barroisiceras* y *Peroniceras* lo que guarda concordancia con lo reportado por Villamil (1998), quien data estas especies de

amonitas en la transición entre el Turoniano y Coniaciano (*Barroisiceras*) y el Coniaciano Superior (*Peroniceras*).

A partir de estos resultados, en el presente trabajo se propone que el miembro superior de la Formación La Luna expuesto en la Sección Qda. La Sorda, tiene un espesor mucho mayor que el definido por otros autores en los trabajos publicados en esta zona de estudio (Ward *et al.,* 1973, Rangel *et al*., 2000, Torres, 2013, Sarmiento *et al*., 2015, entre otros). Los criterios estructurales y litológicos definidos en campo (macro y micro) junto con la integración de los resultados bioestratigráficos permiten proponer que el Miembro Galembo aflorante en la sección tiene un espesor de 262 metros. El contacto con el Miembro Pujamana se marca donde la sucesión se encuentra en contacto con una litología menos competente (delta 60) que forma un valle suave sobre la quebrada.

Sobre los deltas 60 a 67 (**Ver anexo C**), se encuentra expuesta una sucesión de lodolitas físiles a masivas con evidencia de aporte de material terrígeno, la cual ha sido reconocida en estudios previos como depósitos de la Formación Simití. Con el fin de corroborar el espesor propuesto para el Miembro Galembo y definir si la secuencia expuesta entre los deltas 60 y 67 es parte de la Formación Simití como se propone en los diferentes estudios realizados en la zona, se analizaron dos muestras (**TLHR-55a y TLHR-58b**) para dataciones palinológicas. Los resultados obtenidos presentan buen recobro de palinoflora, representado principalmente por quistes de dinoflagelados de origen marino, con predominio de quistes de *Palaeohystrichophora infusorioides*, entre otros. Esta especie presenta un rango cronoestratigráfico amplio dentro del Cretácico superior, sin embargo las asociaciones que se recuperaron de estas dos muestras muy posiblemente corresponden a sedimentitas de la Formación La Luna (Rueda. M, comunicación personal).

Con los datos obtenidos se puede llegar a proponer que las capas descritas por debajo de los 262 metros en la sección de estudio (Qda La Sorda) forman parte del Miembro Pujamana.

Esta interpretación guarda coherencia con los análisis realizados por y Juliao (2012) y Galvis–Portilla *et al.* (2014), quienes proponen a partir de estudios a nivel de subsuelo que el Miembro Pujamana es el nivel más argiláceo/silíceo y con menor contenido calcáreo de la formación, los cuales fueron depositados en ambientes marinos poco profundos.

Hacia la base de la sección entre los deltas 68 y 73, se analizaron las muestras TLHR-60, TLHR-62, TLHR-68, TLHR-69. En las dos primeras se observa un recobro moderado a bajo de foraminíferos planctónicos, los ejemplares corresponden a los géneros *Hedbergella* y *Heterohelix* (presencia conspicua) al igual que restos de la superfamilia *Rotaliporacea* y el suborden *Globigerinina* y a escasas fragmentos del género *Whiteinella* (**Ver Anexo B**).

Si bien el recobro obtenido de estas muestras impide la definición de los miembros Pujamana y Salada, el tipo de microfauna hallado y el grado de preservación si son similares a lo observado tanto en pozo como en secciones de afloramiento de La Luna (Duque-Caro, 2012; Patarroyo & Torres, 2013; Patarroyo *et al*., 2013 en Patarroyo, 2014 para este informe).

Para las muestras basales **TLHR-68 y TLHR-69**, la ausencia de taxa característicos de la Formación Simití como *Ticinella* spp. y *Praebulimina wyomingensis* , indicarían que esta formación no está presente, ya que dichas formas son muy comunes en estas sedimentitas y han sido reportadas en distintos pozos del VMM (Duque-Caro, 2004; Mantilla *et al*., 2006; Rodríguez *et al*., 2008; Patarroyo & Torres, 2013; Patarroyo *et al*., 2013 en Patarroyo., 2014).

Aunque existe incertidumbre con los rangos de edad propuestos en los resultados bioestratigráficos y es necesario realizar un muestreo más detallado y sistemático sobre la sección; con los datos obtenidos en el presente trabajo se puede llegar a considerar nuevas interpretaciones para la definición de los miembros de la formación en la sección de estudio. Cabe aclarar que el levantamiento estratigráfico se realizó siguiendo el curso de la quebrada, teniendo en cuenta el control estructural hasta el punto donde el Mapa Geológico del Cuadrángulo H12 (Ward *et al.,* 1977) indica el contacto inferido con la Formación Simití. El control sistemático de datos de rumbo y buzamiento muestran que la sección no ha sido afectada por fallamiento o plegamiento.

Por lo tanto, las observaciones y análisis realizados en el trabajo de campo integrado con los resultados obtenidos del muestreo bioestratigráfico permiten proponer una nueva interpretación para la secuencia descrita de la Formación La Luna en el sector de la Quebrada La Sorda. Se define para el Miembro Galembo un espesor de 262 metros el cual descansa concordantemente sobre el Miembro Pujamana, el espesor de esta unidad al igual que el del miembro Salada son inferidos debido a que parte de la secuencia no está expuesta. Por lo tanto se proponen espesores promedio entre 83 y 80 metros para los miembros Pujamana y Salada respectivamente en el área de estudio.

6.2. CONTROLES ESTRATIGRÁFICOS Y ANÁLISIS DEPOSITACIONAL DE LA FORMACIÓN LA LUNA

Durante el Cretácico las Cuencas del Valle Medio, Valle Superior, Putumayo, Cordillera Oriental y los Llanos fueron parte de una gran cuenca y estuvieron sometidas a una evolución geológica similar (Ramón *et al*., 2000). Los depósitos de la Formación La Luna en la cuenca del Valle Medio del Magdalena estuvieron controlados por el desarrollo de barreras estructurales; los macizos de Santander,

Perijá y la Cordillera Central causaron la pobre circulación del mar lo que promovió el desarrollo de anoxia en “el Mar La Luna”. (Erlich *et al*., 2000).

Aunque en este estudio no fue preciso determinar la edad a la base de la Formación La Luna, los componentes estructurales, la morfología de los contactos, las diferentes asociaciones de facies y las dataciones bioestratigráficas, permiten inferir que sobre la sección Quebrada la Sorda se presenta la secuencia completa de la formación. Partiendo de este análisis se analiza el comportamiento y los controles estratigráficos que dominaron durante el intervalo de tiempo propuesto por Morales *et al.* (1958), para los diferenes miembros de la Formación La Luna (Turoniano –Santoniano) ya que estos son las edades actualmente aceptadas por el gremio geológico;

Varios elementos del sistema despositacional de la Formación La Luna (Turniano – Santoniano) han sido descritos en la literatura y fueron nombrados en el capítulo dos de este trabajo. Entre los más importantes se citan: 1) El relleno de la cuenca Cretácica comprende principalmente de una megasecuencia dominantemene marina depositada en una cuenca back – arc (Rolón, 2004) . 2) Los sedimentos estan representado principalmente por shales ricos en materia orgánica cíclicamente intercalados con calizas hemipelágicas (Villamil 1998), 3) Las corriente *Upwelling* mejoraron la productividad primaria implicando que las corrientes en lo océanos provocaran aguas ricas en nutrientes. 4) La fuente de sedimento estaba localizada principalmente al este de la cuenca. 5) Regionalmente los espesores del Cretácico son relativmamente uniformes y las facies no muestras cambios dramáticos de espesores. (Villamil, 1998).

Las curvas relativas del nivel del mar determinadas a partir del análisis detallado de facies sugieren que un evento transgresivo se dio en el límite Cenomaniano - Turoniano. La superficie transgresiva (TST) está representada por el cambio de facies de shale carbonos suaves depositados en ambientes marinos poco

profundos de la Formación Simití a faices calizas duras, densas, grises con intercalaciones de lodolitas laminadas con foraminíferos planctónicos con alto contenido de materia orgánica del Miembro Salada de la Formación La Luna. Este cambio de facies sustenta el episodio transgresivo generalizado y alcanza su pico de máxima transgresión (MFS) en la mitad del Turoniano Inferior (Morales, 1958; Villamil, 1998).

Esta superficie es documentada como un evento paloeceanográfico de importante reconocimiento regional y global llamado Evento Anóxico Oceánico (OAE 2 – Schlanger and Jenkyns, 1996 en Villamil., 1998); donde el agotamiento de oxígeno se extiende en el límite Cenomaniano – Turoniano (93 Ma).

La abundancia de foraminíferos planctónicos organizados en láminas observados en el Miembro Salada, demuestra que las rocas fueron depositadas en un ambiente marino de muy baja energía (por debajo del nivel de acción de las olas), con fondos de agua poco ventilados evidenciado por la alta preservación de la materia orgánica. Hacia la base parece hacer ocurrido condiciones con mayor deficiencia de oxígeno ya que decrece el contenido de foraminíferos planctónicos, los cuales aumentan su productividad hacia el tope indicando que se dieron condiciones con mayor aporte de nutrientes que controlaron la productividad de la materia orgánica marina. Juliao *et al.,* 2012, interpreta ambientes de depositación de plataforma externa a interna para este miembro a partir de reconstrucciones paleoambientales basadas en el estudio de palinofacies.

Un ciclo de alto nivel (Highstand Systems Tract –HST) ocurrió después de la superficie de máxima inundación. La gradual progradación y somerización se daría desde el Turoniano Medio al Coniaciano tardío (Villamil, 1998) y estaría representada por el Miembro Pujamana, donde hacia el tope de este miembro se propone el trazo de un límite se secuencia (SB/TSE). El cambio vertical de facies que representan este ciclo se evidencia por el paso de lodolitas y calizas

laminadas con alto contenido de materia orgánica depositadas en ambientes profundos, a facies que muestran una relativa pérdida de profundidad en la plataforma en la que alcanza a llegar material terrígeno proveniente del continente.

En la sección descrita a 282 metros de profundidad, se observa una capa densa de color rojizo de treinta centímetros de espesor, intercalada con capas de shale no calcáreo, a nivel petrográfico en esta capa se identifica la presencia de cristales de siderita, indicando posiblemente que esta parte de la secuencia estuvo influenciada por ambientes pantanosos y reductores de agua someras. Juliao *et al.,* 2012, interpreta condiciones de depósito de ambientes marinos poco profundos debido a la mezcla de material terrígeno (cutículas, polen y esporas) y marino que se evidencia en este miembro.

Seguido del trazo del tope del Miembro Pujamana (SB/TSE), se marca una superficie transgresiva que va somerizando hacia finales del Santoniano. Esta unidad es interpretada como el Miembro Galembo, las características y expresiones morfológicas citadas por Morales *et al. (*1958), indican que este miembro fue depositado en condiciones de ambientes marinos profundos, sin embargo, la secuencia va somerizando hacia la parte superior donde se depositaron facies de ambientes marinos de mayor energía caracterizadas en este trabajo como facies Grainstone de ooides fosfáticos (Grp), las cuales se depositan entre el Coniaciano Temprano – Santoniano y se correlacionan con las evidencias reportadas por Villamil *et al.* (1998), para definir el evento anóxico OAE 3.

Este evento anóxico se caracterizó por la presencia de una zona de *“upwelling”,* la cual aportó nutrientes como fosfatos que propiciaron una gran producción de organismos, los cuales al agotar el oxígeno del medio tornan el ambiente anóxico lo que favorece la depositación y preservación de la materia orgánica. Este evento ha sido datado de finales del Coniaciano a principios del Santoniano y puede ser usado como un límite cronoestratigráfico (Villamil, *et al*., 1998).

Las facies Grainstone de ooides fosfáticos (Grp) reflejan condiciones físicas y propias del ambiente depositacional; la estructura concéntrica observada en sección delgada indican estas rocas se depositaron en ambientes de alta energía (Flügle, 2004), posiblemente depositadas dentro del régimen de sedimentación más alto analizado en la sección descrita. Por esto, hacia el intervalo de facies (Grp) se define una superficie de mínima acomodación y un límite de secuencia (SB/TSE) el cual debería ser identificado a nivel regional.

Seguido, se da la sedimentación de delgadas capas de Wackestone laminado impuro (ocurrencia de granos de cuarzo) con alto contenido de fosfato, intercalados con lodolitas bioclásticas y delgadas capas de chert marcando una tendencia transgresiva con ligeros aumentos en el contenido de materia orgánica. Los análisis de geoquímica orgánica (Torres, 2013), indican condiciones marinas anóxicas, hipersalinas (Materia orgánica tipo II).

6.3 ANÁLISIS DE SECUENCIAS DE AFLORAMIENTO A SUBSUELO

Los aspectos litológicos identificados principalmente hacia la base y tope de la Formación La Luna reflejan cambios abruptos en la condiciones paleoceanográficas, estas tendencias son analizadas a partir de la respuesta de los registros eléctricos en dos pozos (Infantas-1613 y Llanito-1) ubicados hacia la zona axial del Valle Medio del Magdalena, con el fin de definir superficies cronoestratigráficas a nivel regional. Entre los pozos y la sección de superficie (ubicada en el borde oriental del VMM) hay un distanciamiento considerable, lo que puede causar incertidumbre en la definición de los cambios laterales de esta formación, sin embargo, antes de pretender establecer modelos concluyentes, este trabajo presenta una aproximación de datos correlacionados de afloramiento a subsuelo que busca constituirse como una primera propuesta, a partir de la cual se continúen realizando estudios que contribuyan a reconstruir con mayor

precisión la historia evolutiva a nivel regional de los depósitos de la Formación La Luna en el Valle Medio de Magdalena.

Para delimitar y definir las superficies estratigráficas a nivel de subsuelo se contó con la interpretación del análisis de secuencias realizada por Galvis-Portilla *et al.* (2014), en un Pozo Estudio ubicado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, en este trabajo se realiza un amarre detallado roca –registro (**figura, 33**), a partir del cual se definieron tres secuencias depositacionales de baja frecuencia que son diferenciables dentro de la Formación La Luna (**figura 34**).

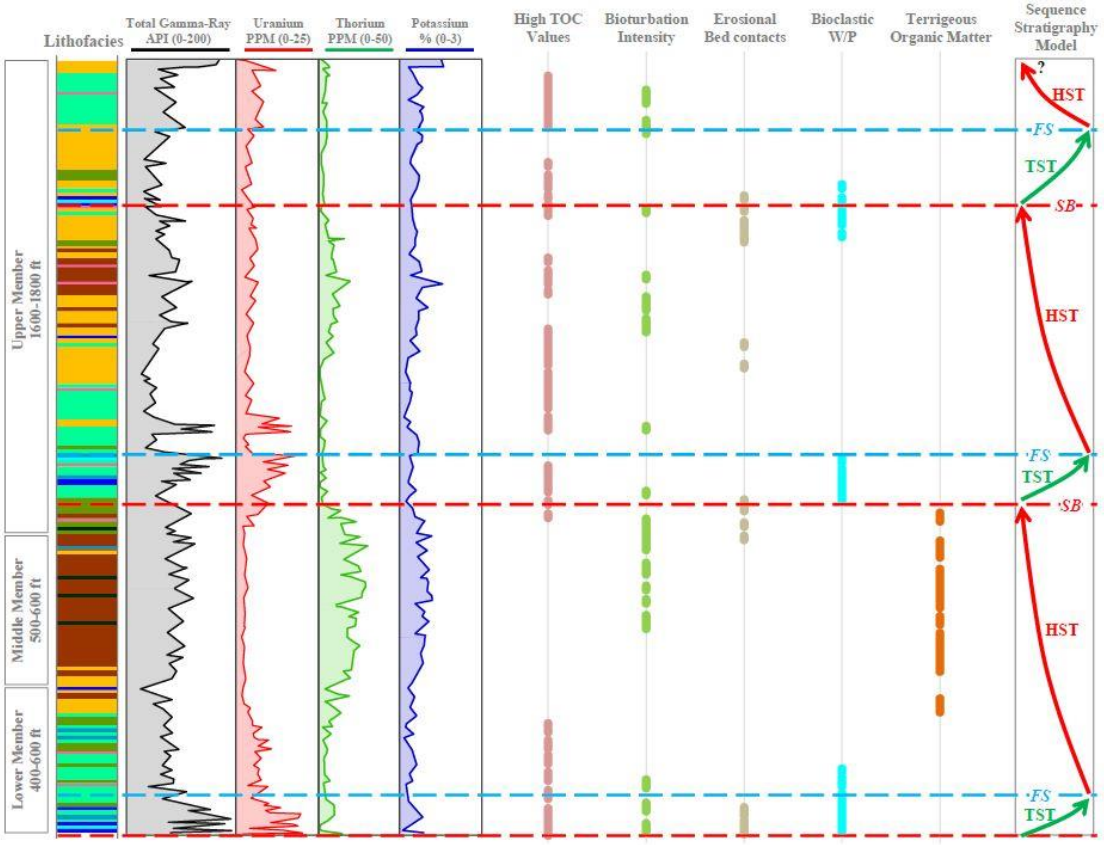
Las características físicas, químicas y biológicas presentes en la roca, se ven reflejadas de manera general en los registros eléctricos; por ejemplo, las superficies transgresivas son identificadas por alza en los valores del registro GR, donde el valor más alto estaría indicando enriquecimiento de materia orgánica y por la tanto una máxima superficie de inundación (MFS). La forma de embudo del registro GR y los altos valores de resistividad son una respuesta característica para diferenciar la presencia de un importante contenido de carbonatos.

Figura 33. Principales componentes de facies caracterizados por Galvis-Portilla et al., 2014 para la Formación La Luna en un pozo ubicado en el VMM. El código de color depende de los elementos de la composición dominantes.

	Symbol	Lithofacies	Interpretation
Quartz Dominated Lithofacies Qtz > 65%		Massive Siliceous Mudstone	Marine suspension settling
		Laminated Foraminiferal Siliceous Mudstone	Marine suspension settling
		Benthic Foraminiferal Siliceous mudstone	Marine suspension settling
		Slightly Borrowed Siliceous Mudstone	Storm-influence, oxigenated bottom
		Siliceous Phosphatic Mudstone	Winnowing and reworking
		Laminated to Wavy Fossiliferous Siltstone	Storm-wave deposits (traction?)
		Slightly Borrowed Siltstone with Glauconite	Storm-wave deposits (traction?)
		Very fine- to silt-grained sandstone	Storm-wave deposits (traction?)
Carbonate Dominated Lithofacies Cal+Dol > 65%		Massive Lime Mudstone	Marine precipitates
		Laminated Foraminiferal Wackestone	Marine suspension settling (rhythmic)
		Laminated Foraminiferal Packstone	Marine suspension settling (rhythmic)
		Thinly Interlaminated Foraminiferal Wackestone-Packstone	Marine suspension settling (rhythmic)
		Calcitic Shelly/Bioclastic Wackestone/Packstone	Insitu reworking of shell material
		Wackestone/Packstone with Dolomite	Diagenetically altered
		Crystalline Carbonate	Post-depositional modification
		Dolostone	Diagenetically altered
Argillaceous Dominated Lithofacies Clay > 65%		Laminated Argillaceous Claystone	Marine suspension settling
		Silty Claystone	Suspension settling, storm influence
		Fossiliferous Claystone	Marine suspension settling
		Volcanic Ash/Pyroclastics/Tuff	Ashfall deposits
Mixed Lithofacies Subequal admixture of Clay, Qtz, Carb		Laminated Siliceous/Argillaceous Mudstone	Marine suspension settling
		Borrowed Silty Siliceous/Argillaceous Claystone	Storm-influence, oxigenated bottom
		Massive Siliceous/Calcareous Mudstone	Marine suspension settling
		Siliceous/Calcareous Phosphatic Mudstone	Winnowing and reworking
		Slightly Borrowed Siliceous/Calcareous Mudstone	Storm-influence, oxigenated bottom
		Laminated Foraminiferal Siliceous/Calcareous Mudstone	Marine suspension settling
		Siliceous/Calcareous/Argillaceous Mudstone	Marine suspension settling

Fuente: Tomado de Galvis-Portilla *et al.,* 2014.

Figura 34. **Secuencias estratigráficas de baja resolución interpretadas para la Formación la Luna en un pozo ubicado en el VMM.**



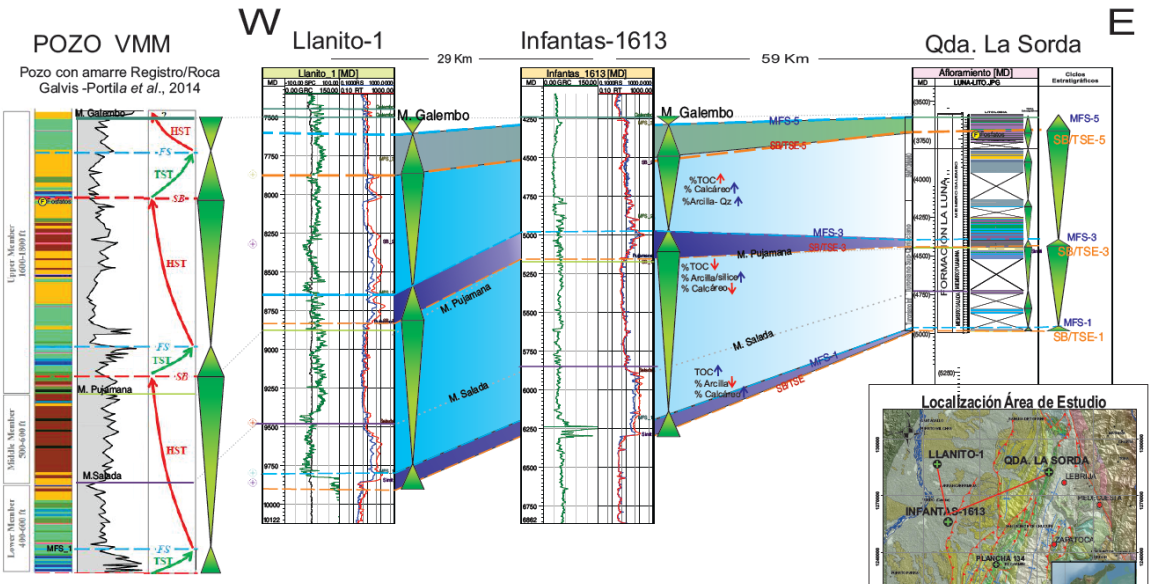
Fuente: Tomado de Galvis-Portilla *et al.,* 2014.

El amarre registro – roca analizado del estudio realizado por Galvis-Portilla *et al. (*2014), junto con la respuesta de los registros de los Pozos Infantas-1613 y Llanito -1, comparadas con la descripción de la sección (Qda. La Sorda) permitió llevar de subsuelo a afloramiento las siguientes superficies de correlación (**figura 35 – Ver Anexo E**).

Se correlacionó la primera superficie transgresiva más notable del Cretácico en el Valle Medio del Magdalena, la cual finaliza con una superficie de máxima inundación reconocida en el presente estudio como (MFS-1); se marca a la base del Miembro Salada e indica depósitos de ambientes marinos de plataforma

externa, esta superficie es seguida por una importante superficie regresiva (HST) marcada por secuencias de ambientes transicionales los cuales somerizan hasta desarrollarse en ambientes de aguas someras con aporte de material terrígeno, en este punto se propone un límite de secuencia (SB/TSE-3), seguido se refleja una superficie de inundación a la base del Miembro Galembo (MSF3) con depósitos de lodolitas fosilíferas con alto contenido de materia orgánica. En esta superficie de máxima inundación se pauta el inicio de un HST que finaliza con una superficie de máxima regresión (SB/TSE-5) marcada hacia el tope y que es evidenciada por la presencia de facies depositadas bajo un régimen de energía alto,seguido un TST que revela el final de la superficie transgresiva con un (MFS-3).

Figura 35. Análisis de secuencias estratigráficas de baja frecuencia analizadas a nivel regional en el Valle Medio del Magdalena (Anexo E).



CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA W-E (VMM)
POZO LLANITO-1 - POZO INFANTAS-1613 -QDA LA SORDA
Amarre Registo -Roca con POZO VVM (Galvis *et al.*, 2014)

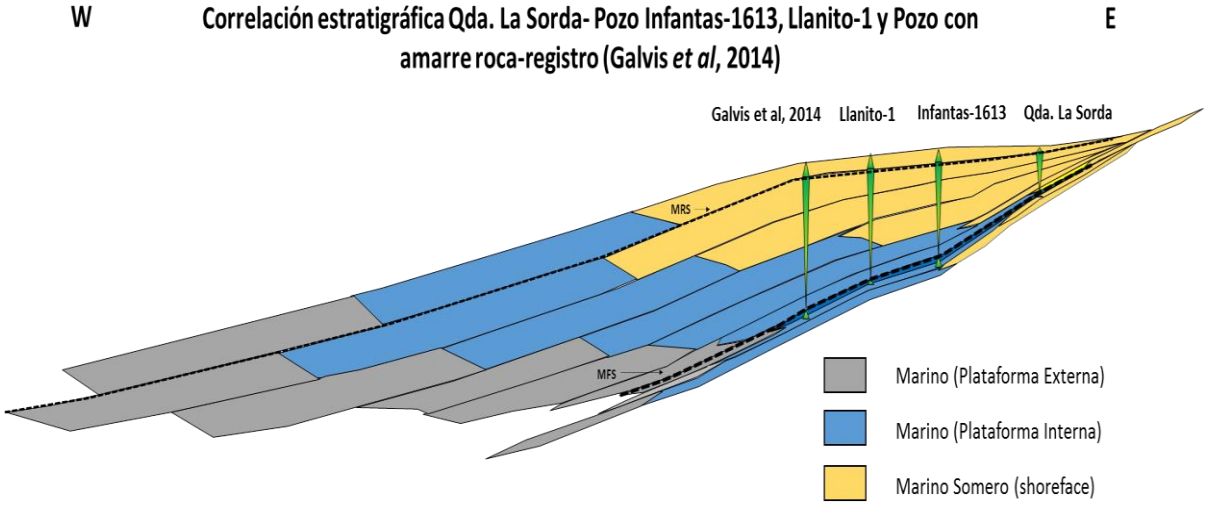
Las descripciones de los tres miembros definidos en afloramiento presentan características litológicas y propiedades de materia orgánica muy similares a las analizadas en el Pozo Infantas-1613 (ANH - Ingrain, 2012) y las descritas en el

pozo Estudio del Valle Medio del Magdalena. En cuanto a las secuencias depositacionales identificadas, se observa que la primera superficie de máxima inundación es un evento a nivel regional que se ve claramente marcado en toda la cuenca. El límite de secuencia trazado hacia el tope se correlacionó por las capas fosfáticas que son evidentes en afloramiento y que son reportadas en el Pozo Estudio VMM (Galvis-Portilla *et al.,* 2014) como un importante intervalo dominado por calizas tipo Wackestone- packstone de fosfatos.

Como se observa en la correlación propuesta, los espesores de las secuencias se hacen ligeramente más gruesos hacia el sector donde se encuentran ubicados los pozos Infantas-1613 y Llanito-1, esto debido posiblemente a que en las condiciones originales del depósito se encontraban ubicados hacia el depocentro de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Hacia el borde oriental de la cuenca los espesores tienden a disminuir ligeramente debido a que posiblemente sedimentación de la Formación La Luna estuvo controlada por la paleotopografía, ya que el Macizo de Santander el cual se encontraba sumergido actuó como una barrera depositacional hacia el este.

Finalmente a partir de toda la información recopilada y analizada se propone un modelo secuencial para el intervalo de tiempo Turoniano Santoniano en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, tiempo en el cual se registra la principal superficie transgresiva del Cretácico en la cuenca (**figura 36**). Los sedimentos de la Formación La Luna se interpretan como una unidad transgresiva depositada sobre una plataforma externa distal que progresivamente fue somerizando hasta desarrollarse en ambientes marinos someros. El Miembro Salada marca el final de un sistema transgresivo (TST) y los miembros suprayacientes (Pujamana y Galembo) se depositan durante un descenso del High Systems Tract (HST).

Figura 36. Modelo secuencial para la Formación La Luna depositada en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.



7. DISCUSIÓN

La Sección Quebrada La Sorda se encuentra ubicada a aproximadamente 13 km al norte de la localidad definida por Morales *et al.* (1958), como sección tipo.

Wart *et al.* (1973), presenta la descripción de una secuencia estratigráfica de 260 metros de espesor de la Formación La Luna levantada sobre este mismo sector (Qda La Sorda).

En esta sección se caracterizan litologías como calizas arcillosas a silíceas, chert con intercalaciones de shale calcáreo y se definen los tres miembros reconocidos para la formación La Luna. El Miembro Salada se encuentra suprayaciendo los depósitos de la Formación Simití y el Miembro Galembo se encuentra en contacto discordante con la Formación Umir (Wart *et al.,* 1973).

Hacia la parte inferior del miembro Galembo se caracterizan unas capas fosfáticas color amarillo oscuro, dura muy calcárea las cuales presentan importancia por su potencial económico y su extensión lateral. Los espesores propuestos para cada uno de sus miembros son: Galembo 43 metros, Pujamana 156 metros y Salada 61 metros, aquí se discute que las capas han sido altamente fracturadas debido a la deformación regional por lo que las capas tienden a contorsionarse (Wart *et al.,* 1973). .

En la presente discusión se resalta la interpretación descrita en Ward *et al.* (1973), debido a que en los estudios previos realizados sobre esta misma sección o en sus alrededores (Rangel *et al*., 2000; Torres, 2013; Sarmiento *et al*., 2015; entre otros) se ha tomado como base esta descripción para caracterizar litológicamente los depósitos de la Formación La Luna. Sin embargo, llama la atención que

ninguno de estos estudios cuenta con dataciones bioestratigráficas para definir los miembros de la formación, por lo que se toma como referente los datos de edad propuestos por Morales *et al*. (1958).

Con el fin de delimitar los diferentes miembros que constituyen a la Formación La Luna, se revisó en detalle el artículo publicado por Morales *et al*. (1958), quien describe las características de esta formación en la sección tipo.

En el trabajo de campo se analizaron las diferentes litológicas, morfologías y contactos tanto de los miembros de la Luna como de las unidades supra (Umir) e infrayacente (Simití), descritas por Morales *et al*. 1958. Según las descripciones evaluadas sobre la sección Quebrada La Sorda la secuencia aflorante de la formación La Luna tiene un espesor aproximado de 425 metros y no menor como se muestra en la sección descrita por Ward *et al.* (1973) y en los diferentes trabajos publicados (Rangel *et al*., 2000; Torres, 2013; Sarmiento *et al*., 2015; entre otros).

Partiendo de este análisis y con el objetivo de verificar que efectivamente la sección levantada no muestra ningún problema estructural que esté afectando el espesor de las capas, se realizó un muestreo sistemático de datos de rumbo y buzamiento de tope a base sobre toda la secuencia aflorante. Mediante este control se puede observar que los dominios tanto de rumbo como de buzamiento se mantienen constantes a lo largo de la secuencia, los cuales varían en promedio de 25 a 35 grados (rumbo de las capas) con dirección de buzamiento noroeste (NW). Por lo tanto, se concluye que la sección levantada es una secuencia continua sin variaciones importantes en superficie, dato que confirma en primera medida que la sección aflorante de la Formación La Luna es mayor que la propuesta en otros trabajos.

Dada la incertidumbre en la delimitación de los diferentes miembros que constituyen a la Formación La Luna en este sector, se acudió a un análisis bioestratigráfico con el fin de tener un control tanto litológico como bioestratigráfico para definir cada uno de los miembros de la formación. De los resultados obtenidos es importante resaltar la presencia de la microfauna encontrada (*Anomalina redmondi*, A. cf. *redmondi, Anomalina* sp.) entre el intervalo 22.5 a 110.5 metros de profundidad estratigráfica. La microfauna hallada muestra coherencia con los datos de edad propuestos por Morales *et al.* (1958), quien propone *Anomalina redmondii* como un buen indicador de edad Coniaciano ya que esta especie de foraminíferos fue encontrada en asociación con las amonitas *Barroisiceras* y *Peroniceras* lo que guarda concordancia con lo reportado por Villamil (1998).

Estos datos confirman aún más la interpretación planteada en el presente trabajo, donde de se propone que el miembro superior de la Formación La Luna expuesto en la Sección Qda. La Sorda, tiene un espesor mucho mayor (262 metros) que el definido por otros autores (43 a 55 metros) en los trabajos publicados en esta zona de estudio (Ward et al., 1973; Rangel *et al*., 2000; Torres, 2013; Sarmiento *et al*., 2015; entre otros).

A partir de este análisis se realiza una reinterpretación de los miembros descritos en la sección aflorante, las nuevas interpretaciones se soportan con el análisis con datos bioestratigráficos y correlacionados con datos del subsuelo. Por ejemplo, para el Miembro Pujamana Morares *et al.* (1958) interpreta una secuencia de shales finamente laminado calcáreo depositado en ambientes marinos profundos. Sin embargo, los nuevos estudios realizados a nivel de subsuelo (Julio *et al.,* 2012 y Galvis-Portilla *et al.,* 2014) reflejan que este miembro presenta una predominancia de materia orgánica continental (cutículas, polen y esporas) con menor contenido calcáreo, indicando que se depositó en ambiente marino menos profundo.

A nivel de afloramiento, otro dato que corrobora esta interpretación es la presencia de sedimentitas de la Formación La Luna en el intervalo ahora propuesto como Miembro Pujamana, datos palinológicos obtenidos entre los 262 y 283 metros de profundidad indican una asociación de palinomorfos que se aproxima más a depósitos de la Formación La Luna y no de la Formación Simití como se propone en otros estudios (Ward *et al*., 1973; Rangel *et al*., 2000; Torres, 2013; Sarmiento *et al*., 2015; entre otros).

A nivel de subsuelo, se analizó la respuesta de los registros eléctricos de los Pozos Infantas-1613 y Llanito-1 (ANH - Ingrain, 2012) y se amarró con la interpretación realizada por Galvis-Portilla *et al., 2014* en un pozo estudio ubicado en la Cuenca del Valle Medio de Magdalena, con el fin de establecer tendencias que permitan definir los límites de secuencia desde el costado oriental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, hasta la zona central de la cuenca. A manera general se observa gran similitud en las características litológicas, geoquímicas y composicionales descritas entre los pozos y el afloramiento: El Miembro Salada es un nivel rico en materia orgánica, que consiste de una mezcla de lodolita y lodolita calcárea con capas de caliza tipo Wackestone-packstone con predominio de foraminífero planctónicos. El Miembro Pujamana es el que presenta menor influencia calcárea y predomina la mezcla de material terrígeno y arcilloso. El Miembro Galembo es nivel rico en materia orgánica el cual consiste de intercalaciones de mudstone laminado a lodolita calcárea con la presencia de un importante intervalo de fosfatos caracterizado hacia el tope en el pozo Estudio descrito por Galvis-Portilla *et al.,* (2014); este mismo intervalo es característico al tope de la sección levantada, así como lo define Morales *et al.* (1958) en su artículo y no a la base del miembro como se describe es los diferentes trabajos previos realizados sobre la sección.

Debido a los argumentos anteriormente expuestos, se propone en el presente trabajo que la sección descrita en la Quebrada La Sorda presenta un mayor

espesor de la sucesión de la Formación La Luna, por lo tanto la definición de sus miembros deben ser reinterpretados para lo cual se propone realizar un muestreo más sistemático y denso para dataciones bioestratigráficas que permita definir con mayor resolución los miembros de la formación.

8. CONCLUSIONES

La secuencia descrita a nivel de afloramiento en la “Quebrada La Sorda” tiene un espesor aproximado de 425 metros de la Formación La Luna; la capas aflorantes presentan dominios de rumbo entre 25 a 35 grados con buzamiento hacia el noroeste (NW). Estos datos se mantienen constantes a lo largo de la secuencia, lo que indica que las capas medidas representan una sucesión continua que no se encuentra afectada por fallamiento o plegamiento.

El análisis integrado de diferentes conjuntos de datos como: mediciones de datos estructurales, reconocimiento de estructuras sedimentarias, morfología de las facies, definición de las mismas a nivel macro/micro y dataciones bioestratigráficas, permiten proponer que en la Sección Quebrada La Sorda aflora una sucesión de la Formación La Luna de mayor espesor que la propuesta en trabajos previos en el área de estudio, por lo tanto la definición de sus miembros son reinterpretados en el presente trabajo.

Las características composicionales y texturales descritas a nivel petrográfico revelan cambios importantes que permiten diferenciar la sucesión de sedimentos ricos en materia orgánica de apariencia monótona propios de la Formación La Luna. Se definieron doce facies, de ellas, las que se encuentran influenciadas por intercalaciones de lodolitas bioclásticas a ligeramente calcáreas y mudstone laminado son las que se presentan con mayor frecuencia.

La laminación, el carácter calcáreo, la ausencia de microfauna bentónica y la abundancia de foraminíferos planctónicos demuestran que las rocas ubicadas la base de la Formación La Luna (Miembro Salada) fueron depositadas en un ambiente marino de muy baja energía, en fondos de agua poco ventilados. Los

eventos post-depositacionales que caracterizan estas facies está dado por procesos de presión disolución haciendo que la materia orgánica presente en la roca se organice en forma de estilolitos y migre a los espacios porosos de la roca.

El Miembro Pujamana presenta menor influencia de contenido calcáreo en relación con los otros dos miembros de la formación. La ocurrencia de facies con predominio de lodo silíceo indica muy posiblemente que este miembro se depositó en un ambiente marino transicional con influencia terrestre.

Facies Grainstone de ooides fosfáticos identificados hacia el tope Miembro Galembo, indican el régimen de flujo de mayor energía dentro de toda la secuencia descrita de la Formación La Luna. La presencia de granos de cuarzo tamaño limo dentro del intervalo superior de este miembro, indican ambientes marinos poco profundos depositados por encima del nivel de acción de las olas.

Resultados micropaleontológicos obtenidos al tope de la sección, indican que la muestra TLHR -01 presentó el mayor número de especies, en contraste con las muestras restantes donde el número de especies fue más bajo o mono específicas. Dicho contraste ha sido observado en el VMM para el contacto Umir-La Luna, sin embargo la ausencia de formas características del Umir como *Pyramidulina paupercula* o *Siphogenerinoides* spp., sugeriría que esta muestra corresponde o bien a su parte más basal, o sobre el contacto discordante con la Formación La Luna.

La presencia microfauna *Anomalina redmondi*, A. cf. *redmondi, Anomalina* sp., (Coniaciano-Turoniano?), encontrada entre el intervalo 22.5 a 110.5 metros de profundidad estratigráfica, muestra coherencia con los datos de edad propuestos por Morales *et al.* (1958), quien propone *Anomalina redmondii* como un buen indicador de edad Coniaciano (Miembro Galembo) ya que esta especie de

foraminíferos fue encontrada en asociación con las amonitas *Barroisiceras* y *Peroniceras*.

Dataciones palinológicas realizadas sobre el intervalo 262 y 283 muestran buen recobro de palinomorfos de origen marino con predominio de quistes de *Palaeohystrichophora infusorioides*, entre otros. Aunque esta especie presenta un rango cronoestratigráfico amplio dentro del Cretácico superior, las asociaciones palinológicas indican que muy posiblemente corresponden a sedimentitas de la Formación La Luna. A partir de este criterio y de la correlación de datos de subsuelo a afloramiento esta secuencia es reinterpretada y caracterizada como el Miembro Pujamana.

Características morfológicas, litológicas y datos bioestratigráficos analizados a la base de la sección permiten proponer la presencia de un intervalo aflorante del Miembro Salada. Los datos micropaleontológicos analizados muestran un recobro moderado a bajo de foraminíferos planctónicos, los ejemplares corresponden a los géneros *Hedbergella* y *Heterohelix* al igual que restos de la superfamilia *Rotaliporacea* y el suborden *Globigerinina* y a escasas fragmentos del género *Whiteinella*. Aunque no se puede definir con certeza el Miembro Salada y Pujamana, el tipo de microfauna hallado y el grado de preservación si son similares a lo observado tanto en pozo como en secciones de afloramiento de La Luna.

Se proponen cinco grandes ciclos estratigráficos de tercer orden (de 1 a 10 Ma de duración) para los depósitos analizados de la Formación La Luna en la sección aflorante Quebrada La Sorda. Los datos de edad asumidos para el análisis de secuencias parten de las dataciones reconocida en ámbito geológico (Morales *et al.,* 1958) para los depósitos de la Formación La Luna (Turoniano – Santoniano) y de los definidos a partir de los resultados obtenido en este trabajo.

A nivel regional se identificaron y siguieron los principales eventos marcan tendencias depositacionales en la cuenca del Valle Medio del Magdalena: la primera superficie de máxima inundación (MFS) identificada a la base del Miembro Salada es un evento a nivel regional que se ve claramente marcado en toda la cuenca. La máxima superficie regresiva (SB/TSE) se traza hacia el tope, por la presencia de capas fosfáticas evidentes en afloramiento y que son reportadas en el pozo de Estudio (Galvis-Portilla *et al.,* 2014) como un importante intervalo dominado por calizas tipo Wackestone/Packstone de fosfatos.

Los sedimentos de la Formación La Luna se interpretan como una unidad transgresiva depositada sobre una plataforma externa distal que progresivamente fue somerizando hasta desarrollarse en ambientes marinos someros ubicados por encima del nivel de acción de las olas. El Miembro Salada marca el final de un sistema transgresivo (TST) y los miembros suprayacientes (Pujamana y Galembo) se depositaron durante un descenso del High Systems Tract (HST).

Cualquier reconstrucción evolutiva requiere del análisis integrado de múltiples conjuntos de datos (afloramiento, sísmica, núcleo, registro de pozo, bioestratigrafía y geoquímica). En este caso específico, con la información recopilada durante el desarrollo de este trabajo se presenta una propuesta de un modelo de estratigrafía secuencia que busca constituirse en un punto de referencia, a partir de la cual se continúen realizando nuevos estudios multidisciplinarios y sistemáticos que contribuyan a reconstruir con mayor precisión la historia evolutiva de los sedimentos depositados durante el intervalo de tiempo Turoniano – Santoniano en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar un mayor número de muestras para análisis micropaleontológicos y paleontológicos dentro de la sección descrita en la Quebrada La Sorda, con el fin obtener datos más concluyentes en cuanto a la edad de depositación de la Formación La Luna.

- Debido a la dificultad de establecer con certeza las características composicionales de una roca depositada en un ambiente de plataforma mixta, con alto contenido de materia orgánica, se recomienda realizar análisis de DRX (Difracción de Rayos X) sobre las muestras analizadas con el fin de establecer el origen de la matriz de las rocas y evitar errores al momento de su clasificación.

- Se recomienda incorporar interpretaciones sísmicas en el borde oriental del Valle Medio del Magdalena, en áreas cercanas al sector donde se levantó la sección en afloramiento, con el fin de seguir los reflectores de las Formaciones Simití y La Luna y así poder conocer e interpretar la paleotopografía al momento de su depositación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS - ANH, 2008. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal, p. 92

AGENCIA NACIONAL D HIDROCARBUROS (ANH), INGRAIN., 2012. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Pozo: Infantas-1613. Evaluación Petrofísica ShaleXpert Pozos: Catalina-1 y Cocuyo. Cuenca Valle Medio del Magdalena.

BERNAL, L., 2009. Caracterización Estratigráfica y Petrográfica de la Formación La Luna en el Sector de El Tablazo, Valle Medio del Magdalena. Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. X Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas Cartagena, Colombia.

COOPER, M.A., ADDISON, F.T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, A.B., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A.J., AND TABORDA, A., 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, p. 1421–1443.

CATUNEANU, O., 2006. Principles of Secuence Stratigraphy. Department of Earth and Atmospheric Sciences. Elsevier. University of Alberta.

CATUNEANU, O. et al., 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy. Earth-Science Reviews, 92 . 1–33.

CATUNEANU, O. et al., 2011. Sequence Strratigraphy: Methodology and Nomenclature. Newsletters on Stratigraphy, Vol. 44/3, 173–245 Article Stuttgart, Nov.

GARCÍA, D., PARRA, P., 2003. Áreas con Mayor Potencial de Carga de Petróleo: Cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM) y Occidente de la Cordillera Oriental, Colombia. VIII Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas. p. 253 – 265.

GARETH, T. G., 2000. Characterization and high resolution sequence stratigraphy of storm-dominated braid delta and shoreface sequences from the Basal Grit Group (Namurian) of the South Wales Variscan peripheral foreland basin. Marine and Petroleum Geology 17 445 – 475.

GONZÁLEZ, D; SÁNCHEZ, C., 1999. Potencial de Generación de la Formación La Luna y la Formación Umir en el flanco oriental del Valle Medio del Magdalena. Universidad Industrial de Santander. Colombia.

GOMEZ, E, JORDAN, E, ALLMENDINGER, R, HEGARTY, H, KELLY, S, HEIZLER, M., 2003. Controls on Architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic Southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. USA: GSA Bulletin.

ERIK FLUGLE, 2004. Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. Springer Berlin Heidelberg New York.

ERLICH, R.N.,MACSOTAY, O., NEDERBRAGT, A.J., AND LORENTE, M.A., 2000. Birth and death of the Late Cretaceous ‘‘La Luna Sea’’, and origin of the Tres Esquinas phosphorites: Journal of South American Earth Sciences, v. 13, p. 21–45.

GALVIS-PORTILLA H.A, MARFISI N., *et al.,* 2014. Regional Sequence Stratigraphy of the Upper Cretaceous La Luna formation in the Magdalena Valley Basin, Colombia. reserach gate. Conference Paper.

HORTON, B. K.,. SAYLOR, JE., NIE, J., MORA, A., PARRA, M., REYES-HARKER, A.,, AND STOCKLI, D.F., 2010. Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia: GSA. Bulletin; September/October 2010; v. 122; no. 9/10; p. 1423–1442.

INGEOMINAS., 1999. Geología del departamento de Santander. Instituto de investigación e información Geocientífica, Minero–Ambiental y Nuclear.

JULIAO, T.M, M. CARVALHO, S. CRUZ, R.E. MÁRQUEZ., 2012. Paleoenvironmental reconstruction based on palynofacies analyses of La Luna Formation (Upper Cretaceous), Middle Magdalena Basin, Colombia. 29th Annual Meeting of TSOP, Beijing.

MICHAEL, A., BRADLEY, S., 2012. Sea-level control on source-rock development: perspectives from the holocene black sea, the mid-cretaceous western interior basin of North America, and the late Devonian Appalachian basin. Society for Sedimentary Geology (SEMP).

MORALES, L., 1958. General Geology and Oil Occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: South America. AAPG. Volume SP 18: Habitat of Oil, Pages 641 – 695.

NICHOLS, Gary. 2009. Sedimentology and Stratigraphy. Second Edition. Wiley-Blackwell.

PARRA. A, BALLESTEROS. C., 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. Universidad Industrial de Santander. Colombia.

RANGEL A., PARRA P., 2000. The La Luna formation: Chemostratigraphy and organic Facies in the Middle Magdalena Basin. Organic Geochemistry 31. p 1267 – 1284.

ROYERO, J., CLAVIJO, J., 2001. Memoria Explicativa. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Instituto de investigación e información Geocientífica, Minero–Ambiental y Nuclear. Ingeominas. Colombia.

ROLON, L., 2004. Structural Geometry of the Jura-Cretaceous Rift of the Middle Magdalena Valley Basin – Colombia. [MsC. thesis]: Eberly College of Arts and Sciences at West Virginia University. Morgantown, WV.

PATARROYO., 2014. Análisis micropaleontológico preliminar Sección Quebrada La Sorda (Valle Medio del Magdalena). En este informe.

RAMÓN. J.C, DZOU. L.I, Hughes. W. B, Holba. A.G., 2000. Evolution of the Cretaceous organic facies in Colombia: Implications for oil composition. South America Eath Sciences 14 (2001) 31 -50.

SARMIENTO, F., 2001. Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, inferences from tectonic models. Ecopetrol 2001 and Vrije Universiteit Amsterdam.

SARMIENTO, F., 2011. Petroleum Geology of Colombia. Geology and Hydrocarbon Potencial. Magdalena Basin Colombia. Agencia Nacional de Hirdrocarburos, Volumen 11.

SARMIENTO, G., PUENTES. E., SIERRA. C., 2015. Estratigrafía y Petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena. Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Geología Norandina Colombiana.

TORRES E., 2013. Unconventional Resources Assessment of La Luna Formation in the Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Posted August 31, 2015.

WARD, E., GOLDSMITH, R., CRUZ, J. AND RESTREPO, H., 1973. Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona. Departamento de Santander. U.S. Geolgical Survey. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras. Boletín Geológico, Volumen XXI, No 1-3.

WARD, E., GOLDSMITH, R., JIMENO , A., CRUZ, J. AND RESTREPO, H AND GÓMEZ E., 1977. Mapa Geológico del cuadrángulo H12, Bucaramanga. Ingeominas.

VILLAMIL, T., 1998. Chronology, Relative sea-level history and new sequence stratigraphic model pro basinal cretaceous facies of Colombia. Paleogeographic Evolution and Non Glacial Eustasy, Northern South America. Publicación especial SEPM No 58. p. 161.

ZUMBERGE, E., 1984. Source Rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley Colombia. AAPG Volume SG 18: Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks, Pages 127 – 133.

PETROLERAS DE VENEZUELA. PDVSA. Código Estratigráfico de las Cuencas ën línea] disponible en: http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL D HIDROCARBUROS (ANH), INGRAIN., Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Pozo: Infantas-1613. Evaluación Petrofísica ShaleXpert Pozos: Catalina-1 y Cocuyo. Cuenca Valle Medio del Magdalena. 2012.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS - ANH, Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal, 2008. p. 92

BERNAL, L., Caracterización Estratigráfica y Petrográfica de la Formación La Luna en el Sector de El Tablazo, Valle Medio del Magdalena. Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia. X Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en Cuencas Subandinas Cartagena, Colombia. 2009.

CATUNEANU, O. et al., Sequence Strratigraphy: Methodology and Nomenclature. Newsletters on Stratigraphy, Vol. 44/3, 173–245 Article Stuttgart, Nov. 2011.

CATUNEANU, O. et al., Towards the standardization of sequence stratigraphy. Earth-Science Reviews, 92 . 2009. 1–33.

CATUNEANU, O., Principles of Secuence Stratigraphy. Department of Earth and Atmospheric Sciences. Elsevier. University of Alberta. 2006.

COOPER, M.A., ADDISON, F.T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R.H., HAYWARD, A.B., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A.J., AND TABORDA, A., Basin development and tectonic history of the Llanos

basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, 1995. p. 1421–1443.

ERIK FLUGLE, Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. Springer Berlin Heidelberg New York. 2004.

ERLICH, R.N.,MACSOTAY, O., NEDERBRAGT, A.J., AND LORENTE, M.A., Birth and death of the Late Cretaceous ‘‘La Luna Sea’’, and origin of the Tres Esquinas phosphorites: Journal of South American Earth Sciences, v. 13, 2000. p. 21–45.

GALVIS-PORTILLA H.A, MARFISI N., *et al.,* Regional Sequence Stratigraphy of the Upper Cretaceous La Luna formation in the Magdalena Valley Basin, Colombia. reserach gate. Conference Paper. 2014.

GARCÍA, D., PARRA, P., Áreas con Mayor Potencial de Carga de Petróleo: Cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM) y Occidente de la Cordillera Oriental, Colombia. VIII Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas. 2003. p. 253 – 265.

GARETH, T. G., Characterization and high resolution sequence stratigraphy of storm-dominated braid delta and shoreface sequences from the Basal Grit Group (Namurian) of the South Wales Variscan peripheral foreland basin. Marine and Petroleum Geology 17 2000. 445 – 475.

GOMEZ, E, JORDAN, E, ALLMENDINGER, R, HEGARTY, H, KELLY, S, HEIZLER, M., Controls on Architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic Southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. USA: GSA Bulletin. 2003.

GONZÁLEZ, D; SÁNCHEZ, C., Potencial de Generación de la Formación La Luna y la Formación Umir en el flanco oriental del Valle Medio del Magdalena. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 1999.

HORTON, B. K.,. SAYLOR, JE., NIE, J., MORA, A., PARRA, M., REYES-HARKER, A.,, AND STOCKLI, D.F., Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia: GSA. Bulletin; September/October 2010; v. 122; no. 9/10; 2010. p. 1423–1442.

INGEOMINAS., Geología del departamento de Santander. Instituto de investigación e información Geocientífica, Minero–Ambiental y Nuclear. 1999.

JULIAO, T.M, M. CARVALHO, S. CRUZ, R.E. MÁRQUEZ., Paleoenvironmental reconstruction based on palynofacies analyses of La Luna Formation (Upper Cretaceous), Middle Magdalena Basin, Colombia. 29th Annual Meeting of TSOP, Beijing. 2012.

MICHAEL, A., BRADLEY, S., Sea-level control on source-rock development: perspectives from the holocene black sea, the mid-cretaceous western interior basin of North America, and the late Devonian Appalachian basin. Society for Sedimentary Geology (SEMP). 2012.

MORALES, L., General Geology and Oil Occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia: South America. AAPG. Volume SP 18: Habitat of Oil, 1958. Pages 641 – 695.

NICHOLS, Gary. Sedimentology and Stratigraphy. Second Edition. Wiley-Blackwell. 2009.

PARRA. A, BALLESTEROS. C., 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. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 2012.

PATARROYO., Análisis micropaleontológico preliminar Sección Quebrada La Sorda (Valle Medio del Magdalena). En este informe. 2014.

PETROLERAS DE VENEZUELA PDVSA. Código Estratigráfico de las Cuencas [en línea] disponible en: http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm

RAMÓN. J.C, DZOU. L.I, Hughes. W. B, Holba. A.G., Evolution of the Cretaceous organic facies in Colombia: Implications for oil composition. South America Eath Sciences 14 (2001) 31 -50. 2000.

RANGEL A., PARRA P., The La Luna formation: Chemostratigraphy and organic Facies in the Middle Magdalena Basin. Organic Geochemistry 31. 2000. p 1267 – 1284.

ROLON, L., Structural Geometry of the Jura-Cretaceous Rift of the Middle Magdalena Valley Basin – Colombia. [MsC. thesis]: Eberly College of Arts and Sciences at West Virginia University. Morgantown, WV. 2004.

ROYERO, J., CLAVIJO, J., Memoria Explicativa. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Instituto de investigación e información Geocientífica, Minero–Ambiental y Nuclear. Ingeominas. Colombia. 2001.

SARMIENTO, F., Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes, inferences from tectonic models. Ecopetrol 2001 and Vrije Universiteit Amsterdam. 2001.

SARMIENTO, F., Petroleum Geology of Colombia. Geology and Hydrocarbon Potencial. Magdalena Basin Colombia. Agencia Nacional de Hirdrocarburos, 2011. Volumen 11.

SARMIENTO, G., PUENTES. E., SIERRA. C., Estratigrafía y Petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena. Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Geología Norandina Colombiana. 2015.

TORRES E., Unconventional Resources Assessment of La Luna Formation in the Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. 2013. Posted August 31, 2015.

VILLAMIL, T., Chronology, Relative sea-level history and new sequence stratigraphic model pro basinal cretaceous facies of Colombia. Paleogeographic Evolution and Non Glacial Eustasy, Northern South America. Publicación especial SEPM No 58. 1998. p. 161.

WARD, E., GOLDSMITH, R., CRUZ, J. AND RESTREPO, H., Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona. Departamento de Santander. U.S. Geolgical Survey. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras. Boletín Geológico, Volumen XXI, No 1-3. 1973.

WARD, E., GOLDSMITH, R., JIMENO , A., CRUZ, J. AND RESTREPO, H AND GÓMEZ E., Mapa Geológico del cuadrángulo H12, Bucaramanga. Ingeominas. 1977.

ZUMBERGE, E.,. Source Rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley Colombia. AAPG Volume SG 18: Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks, 1984 Pages 127 – 133.

ANEXOS