

RESERVORIOS NO CONVENCIONALES EN LATINOAMÉRICA: LA FORMACIÓN LA LUNA EN EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA-COLOMBIA

Ricardo Veiga^{1,2}, Eduardo Micucci¹, Matías Cuberes¹ y Alejandro Bande¹

1: Tecpetrol S.A. ricardo.veiga@tecpetrol.com, eduardo.micucci@tecpetrol.com, matias.cuberes@tecpetrol.com,
alejandro.bande@tecpetrol.com

2: Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires

Palabras clave: La Luna, Reservoirio No Convencional, Valle Medio del Magdalena

ABSTRACT

La Luna Formation (Cenomanian-Turonian) is considered as world-class source rock and is the main hydrocarbon source rock of the Maracaibo/Catatumbo and Middle Magdalena Valley basins in Venezuela and Colombia. The objective of the present contribution is to present a regional approach of the northern sector of the Middle Magdalena Valley basin, where La Luna Formation might have achieved conditions to be considered as an unconventional reservoir.

La Luna Formation is between 400 and 500 m thick and its divided in three (3) members: from base to top, Salada, Pujamana and Galembo. The Salada and Galembo are carbonate-rich while the Pujamana member is richer in clay minerals.

From a geochemical point of view, the Galembo member contains a 250-350 m thick organic-rich with a Total Organic Carbon (TOC) concentration mean of 3.5% and peaks of 6% homogeneously distributed. Thermally, La Luna is in the oil-generation window in the study area.

La Luna porosity range between 8 and 12%, while water saturation mean is between 24 and 28%. Hydrocarbon storage goes from 417 to 762 bo/acre*³ft and in-place resources between 19 MMbo/km² y 26 MMbo/km. From a geomechanical point of view, we identified between 2 and 4 landing zones based on the stress regime observed. We defined a 2 landing zones base case for Galembo. The developable area is around 850 km² based on depth ranging between 2100 and 3660 m (7000 and 12000 feet). The in-place calculated resources are 36 Bbo.

La Luna unconventional *play* is of great interest, but there are some critical aspects to be considered. On one side, legal regulations of hydraulic fracturing are still on debate in Colombia. Additionally, the close proximity of the Eastern Cordillera and the degree of burial reached by La Luna limit its developable area.

INTRODUCCIÓN

La Formación La Luna es la principal roca madre de las cuencas de Maracaibo, Catatumbo y Valle Medio del Magdalena (VMM). Los recursos recuperables convencionales documentados en estas 3 cuencas ascienden a 82.2 Bboe y la mayor parte se ha generado en esta unidad. El

objetivo del presente trabajo es analizar, desde un punto de vista exploratorio, la potencialidad de la Formación La Luna como reservorio no convencional en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena en Colombia.

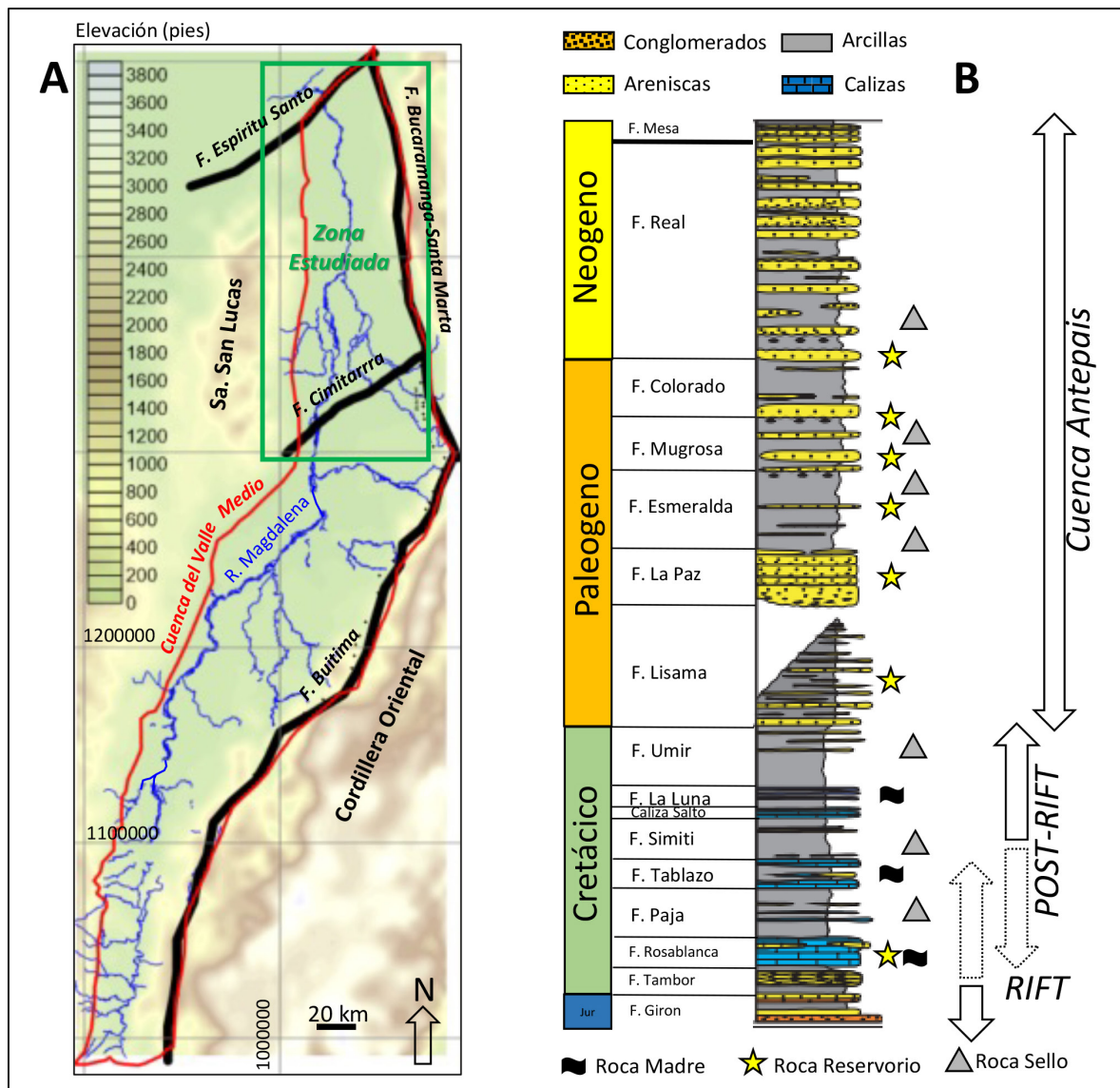


Figura 1. A) Mapa ubicación zona de estudio. B) Columna estratigráfica generalizada tomada de Barrero *et al.* (2007) y principales fases evolutivas de la cuenca.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio tiene 3700 km² y se ubica en el Norte de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena en una zona conocida como provincia Norte (Sarmiento *et al.* 2015). Se encuentra limitada por la falla de Cimitarra al Sur, la Falla de Palestina al Oeste, y la Serranía de San Lucas al Oeste,

la Falla de Espíritu Santo al Norte y el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta al Este (Fig. 1A).

EVOLUCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del Valle Medio del Magdalena forma parte de un conjunto de cuencas de antepaís que se extienden desde Colombia hasta Argentina. A manera de breve resumen se puede decir que en su desarrollo se reconocen diferentes etapas evolutivas: Rift, *Postrift* y Cuenca de Antepaís, pero no hay un acuerdo generalizado sobre la extensión temporal de cada una de estas fases de desarrollo (Fig. 1B).

Etapas de *Rift*

Se extiende desde Triásico al Jurásico Tardío -Cretácico Temprano?. Durante esta fase la cuenca se rellenó con sedimentos volcánoclasticos, continentales (fluvial) y/o costeros de la Formación Girón y la Formación Arcabuco (Córdoba *et al.* 2000).

En el Berriasiano-Valanginiano comienza la sedimentación marino somera en una cuenca de alta subsidencia conformando 2 cubetas separadas por el macizo de Floresta/Santander (Cooper *et al.* 1995). Durante el Aptiano la tasa de subsidencia se redujo y comenzó la depositación de sedimentos de plataforma alcanzando la máxima profundización durante el Albiano. Toda esta fase de desarrollo está representada principalmente por las Formaciones Rosablanca, Paja, Tablazo y Simití.

Etapas *post-Rift*

Ocurre entre el Cenomaniano-Coniaciano y representa la fase de sedimentación de la Formación La Luna la cual será desarrollada más adelante.

Etapas de levantamiento y desarrollo de cuenca de antepaís

Desde fines del Cretácico hasta el Reciente una serie de colisiones de diferentes terrenos alóctonos y cambios en la convergencia de placas tuvo lugar en la porción noroccidental de la Placa Sudamericana.

A fines del Cretácico y principios del Paleoceno se produce la colisión la Placa de Farallones contra la Placa Sudamericana (Aspden *et al.*, 1987; Gómez *et al.* 2003; Gómez *et al.* 2005; Caballero *et al.* 2010 y Horton *et al.* 2010). Esta colisión produjo el levantamiento de la Cordillera Occidental y el inicio del acortamiento estructural en la Cordillera Oriental, finalizando la depositación de

carbonatos marinos y dando lugar a depósitos de llanuras aluviales y marino restringidos asociado a las formaciones Umir y Lisama.

Desde el Eoceno hasta el Oligoceno tardío se depositaron las Formaciones La Paz, Esmeralda, Mugrosa y Colorado. Durante su depositación se registraron 2 eventos significativos asociados a cambios en la velocidad de convergencia y en los vectores de movimiento entre las placas de Nazca y Sudamericana. El primero ocurrió en el Eoceno medio (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Daly 1989) y el segundo tuvo lugar durante el Oligoceno tardío-Mioceno temprano (Pilger, 1984 y Ben-Avraham y Nur, 1987) que sumado a la colisión del Choco Terraine (Duque-Caro, 1990) produjo la reactivación de estructuras pre-existentes en la Cordillera Oriental (Horton *et al.* 2010; Mora *et al.* 2010) y generó una discordancia regional al tope del Oligoceno (Schamel, 1991).

El evento más significativo ocurrió hace 10 m.a. producto de la colisión de Panamá con la placa Sudamericana. En este periodo, la Cordillera Oriental se terminó de construir como una barrera topográfica separando la Cuenca del Valle Medio y Superior del Magdalena de la Cuenca de Llanos. Durante este periodo muchas fallas extensionales fueron invertidas (Butler y Schamel, 1989; Mora *et al.* 2006) comportándose como una fuente de sedimentos para las secuencias sinorogénicas andinas (Bande *et al.* 2012).

LA FORMACIÓN LA LUNA

La Formación La Luna está compuesta por lutitas calcáreas bituminosas y mudstones calcáreos depositados durante el desarrollo de un margen pasivo en una etapa de *postrift*. Esta cuenca marina comenzó a desarrollarse en el Berriasiano, pero durante el Cenomaniano-Coniaciano la inundación marina alcanzó su máxima expansión cubriendo gran parte de Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú. Este proceso fue coincidente con uno de los 3 eventos anóxicos globales ocurridos en el Cretácico (Jenkyns, 1980) favoreciendo la alta concentración de materia orgánica en esta unidad.

A modo de síntesis histórica se puede decir que la Formación La Luna fue definida por Garner (1926) como La Luna Limestones en la Sierra de Perijá (Venezuela), mientras que Hedberg y Saas (1937) la redefinieron como la Formación La Luna. Notestein *et al.* (1944) introdujeron el término Formación La Luna en la Cuenca de Catatumbo (Colombia). En un reporte realizado por Morales *et al.* (1958) se menciona que Wheeler (1929) definió las Formaciones Salada, Pujamana y Galembo sobre el flanco occidental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. Morales *et al.* (1958) integraron los trabajos de Garner (1926) y Wheeler (1929) definiendo que la Formación La Luna está conformada por 3 miembros que de base a techo son: Salada, Pujamana y Galembo.

Recientes trabajos de Martínez *et al.* (2012) proponen que solo el Miembro Galembo es correlacionable con la Formación La Luna. Terraza Melo (2019), prefiere mantener la categoría de Formación para las unidades Salada, Pujamana y Galembo y además propone una nueva unidad como la Formación La Renta.

A los fines prácticos, este trabajo utiliza la subdivisión de Morales *et al.* (1958) por ser ampliamente difundida en Colombia (Fig. 2) quedando pendiente aún definir la jerarquía estratigráfica de las unidades estratigráficas definidas arriba.

LA FORMACION LA LUNA EN REGISTROS DE POZO Y SÍSMICA

La Formación La Luna limita en su base con la Formación Salto (Calizas Salto, Morales *et al.* 1958) y hacia el tope con la Formación Umir (Huntley, en Julivert, 1968). El límite entre las Formaciones Salto y La Luna se caracteriza por un marcado contraste en los registros de rayos gama (GR), resistivos (RES), tiempo de tránsito sísmico (DT) e impedancia acústica (IA).

La Formación Salto es una caliza arcillosa depositada en condiciones marino someras mientras que el Miembro Salada (sección basal de la Formación La Luna) es una caliza arcillosa a micrita con foraminíferos y radiolarios depositado en condiciones marino profundas. Si bien la composición litológica no parece ser muy diferente, la respuesta en perfiles es bastante contrastante. Esta diferencia se asocia al contenido orgánico dado que el Miembro Salada muestra un abrupto cambio en el contenido de Uranio (U) indicando condiciones de depositación en un ambiente reductor (Fig. 3).

El límite superior está dado por el contraste entre el Miembro Galembo (sección superior de la Formación La Luna) y la Formación Umir. El Miembro Galembo se compone de calizas

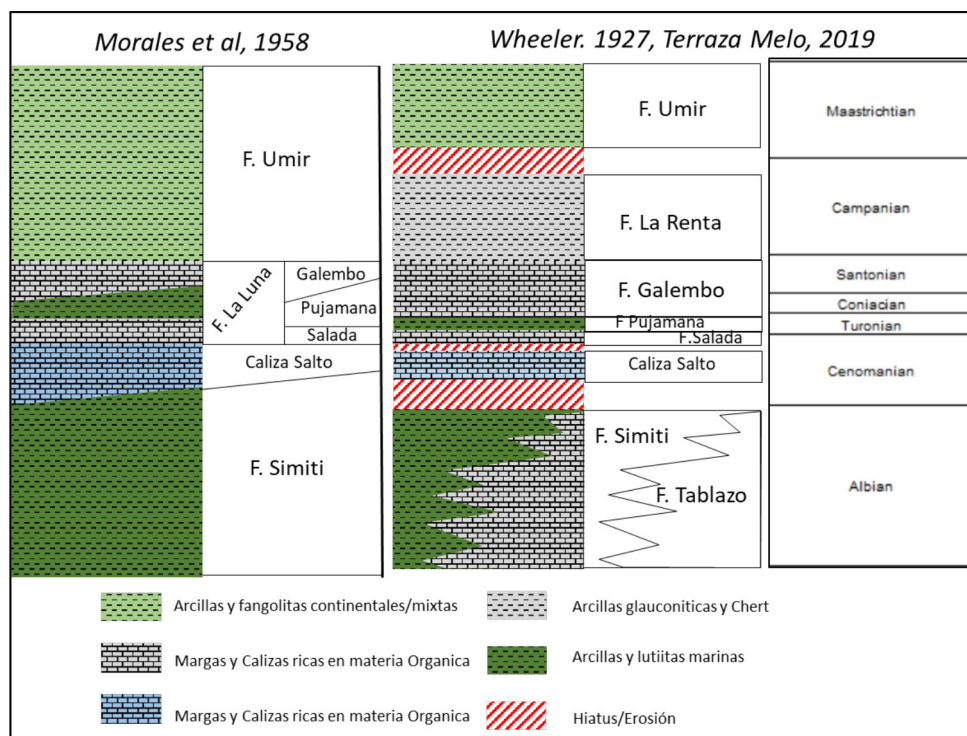


Figura 2. Esquema estratigráfico para la Formación La Luna en el Valle Medio del Magdalena.

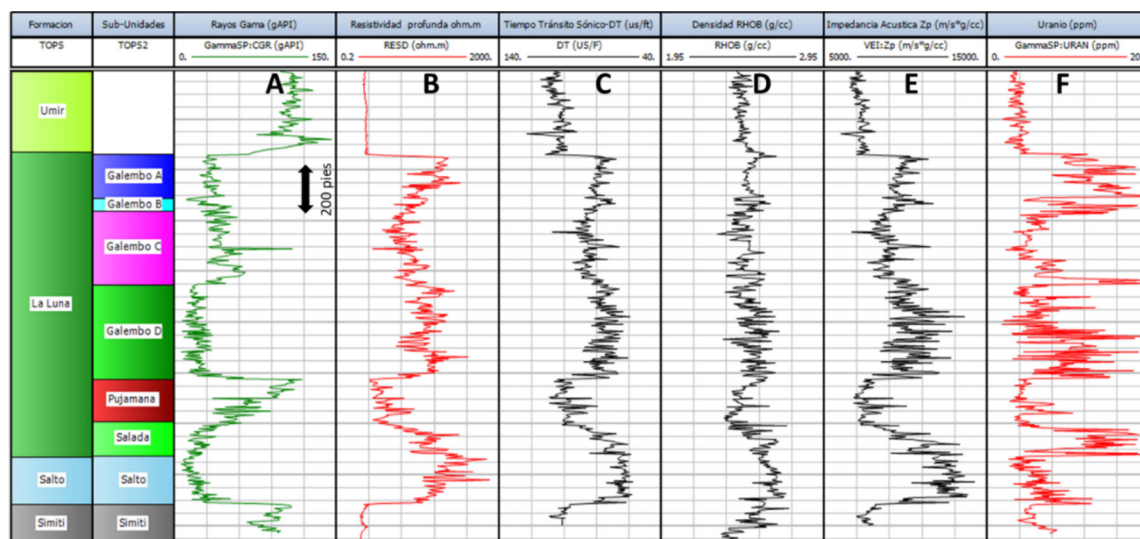


Figura 3. Características de la Formación La Luna en registros de pozo. A) Rayos Gama (GR), B) Resistividad (RES), C) Tiempo de tránsito sónico (DT), D) Densidad (RHOB), Impedancia Acústica (Zp) y Uranio (URAN). Notar cambios abruptos en los registros de GR, RES, DT, Zp y URAN observables en los límites superior e inferior de la Formación La Luna, con las Formaciones Umir y Salto respectivamente. Por otro lado, notar la subdivisión interna de la Formación La Luna en 3 miembros, de base a techo son: Salada, Pujamana y Galembo. Los Miembros Salada y Galembo son los que muestran mayor contenido de Uranio. A fines prácticos de trabajo el Miembro Galembo fue dividido informalmente en 4 ciclos que de tope a base reciben el nombre de Galembo A, B, C y D.

micritas intercaladas con niveles de chert, calizas arcillosas y niveles glauconíticos. Por otro lado, la Formación Umir se compone de fangolitas y areniscas finas depositadas en condiciones marino someras (neríticas). Este marcado contraste litológico se identifica por un abrupto cambio en la resistividad y en el tiempo de tránsito sónico.

Internamente, la Formación La Luna presenta seis (6) secciones, cuatro (4) de ellas se observan en el Miembro Galembo y muestran un arreglo estrato decreciente (Fig. 3). A estas divisiones internas dentro de Galembo se las denomina informalmente de tope a base como Galembo A, B C y D. Habitualmente los intervalos Galembo C y D se presentan como ciclos con reducción de GR hacia el tope debido a un incremento en el contenido de sílice. Por debajo del Miembro Galembo se observa un rápido cambio en los valores de GR, RES e IA y bajo contenido de U que señalan el pasaje al Miembro Pujamana. Finalmente, la Formación La Luna muestra en su sección basal un intervalo de calizas arcillosas y micritas con fauna de foraminíferos y radiolarios que corresponden al Miembro Salada. Esta sección se reconoce por un nuevo incremento en los registros de GR, U e IA.

La expresión sísmica de esta unidad es variable y depende del sector de la zona de estudio. A grandes rasgos se pueden identificar 4 regiones (Fig. 4):

- una zona oriental, de Rumbo NE-SE adyacente a la Cordillera Oriental, que presenta gran complejidad estructural debido a la influencia de la Falla de Bucaramanga (mega falla de rumbo con más de 500 km de expresión en superficie) que imposibilitarían un eventual desarrollo No Convencional.

- b) un pequeño sector central que corresponde al núcleo del sinclinal asimétrico que conforma la unidad a escala regional. En principio a una profundidad demasiado grande (> 3.500 m) para tener interés No Convencional.
- c) una zona occidental homoclinal sin deformación a gran escala pero que presenta algunas zonas falladas, visibles solamente con dato sísmico 3D. Esta estructuración está relacionada a las fallas de rumbo que afectan todo el sector norte de la cuenca del VMM. Dentro de esta zona podemos diferenciar, hacia el Este, un sector con un menor espesor de la secuencia terciaria inferior lo cual, como se verá más adelante, habría afectado la cantidad y características del petróleo generado. En general, toda esta zona es la que posee un mejor Potencial No Convencional.
- d) un sector sur complejo estructuralmente, por su cercanía a la Falla La Cimitarra, en la cual la Fm. La Luna sufre erosión parcial e incluso total en algunos sectores. Por su estructuración y existencia de lugares en los cuales se encuentra parcial o totalmente erosionado; esta zona posee poco potencial No Convencional.

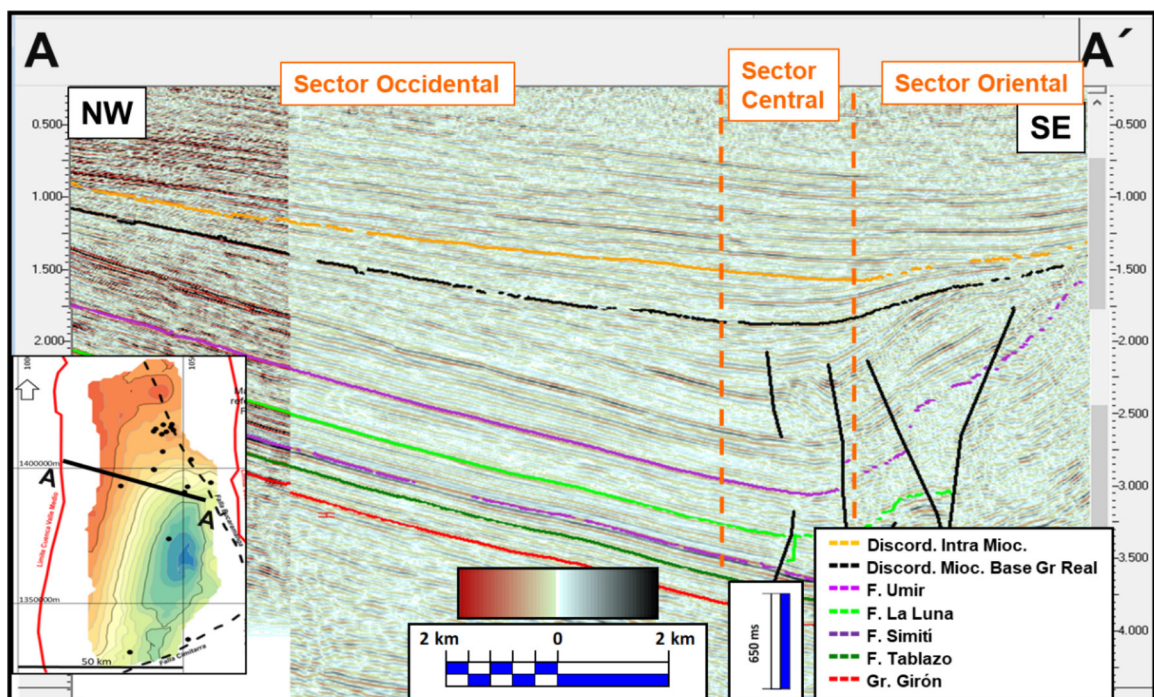


Figura 4. Línea Sísmica Traversa de Rumbo NW-SE mostrando los sectores Occidental, Central y Oriental descriptas en el texto.

DISTRIBUCIÓN DE LA FORMACIÓN LA LUNA EN LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica al norte de la Falla de Cimitarra, importante falla de Rumbo que divide en dos la cuenca y que separa dos grandes sectores:

- una zona septentrional, caracterizada por fallas de Rumbo NE-SW que llegan a tener expresión en superficie y que serían fallas antitéticas de la Mega - Falla de Bucaramanga. que puede llegar a tener un impacto negativo en el caso de un eventual Desarrollo No Convencional, ya que las zonas estructuradas normalmente se excluyen de esta actividad.
- una zona meridional, fuera de la zona de estudio, donde predominan los cabalgamientos de Rumbo NNE-SSW. En gran parte de este sector la Fm. La Luna se encuentra erosionada parcial o totalmente.

A escala regional, la zona de estudio es básicamente, un sinclinal asimétrico de rumbo meridional (Fig. 5A) donde la Formación La Luna alcanza una profundidad máxima de 6.000 m (18.000 pies) y se encuentra aflorando en el borde occidental. Este sinclinal desarrolla un flanco occidental con pendientes en el orden de 10° inclinando al Este y un flanco oriental, próximo a la Cordillera Oriental más estructurado y con pendientes de hasta 30° . El espesor de la Formación La Luna varía entre 100 y 600 m (aprox. 300 a 1800 ft) con un gradual incremento de espesor hacia el Oeste (Fig. 5B).

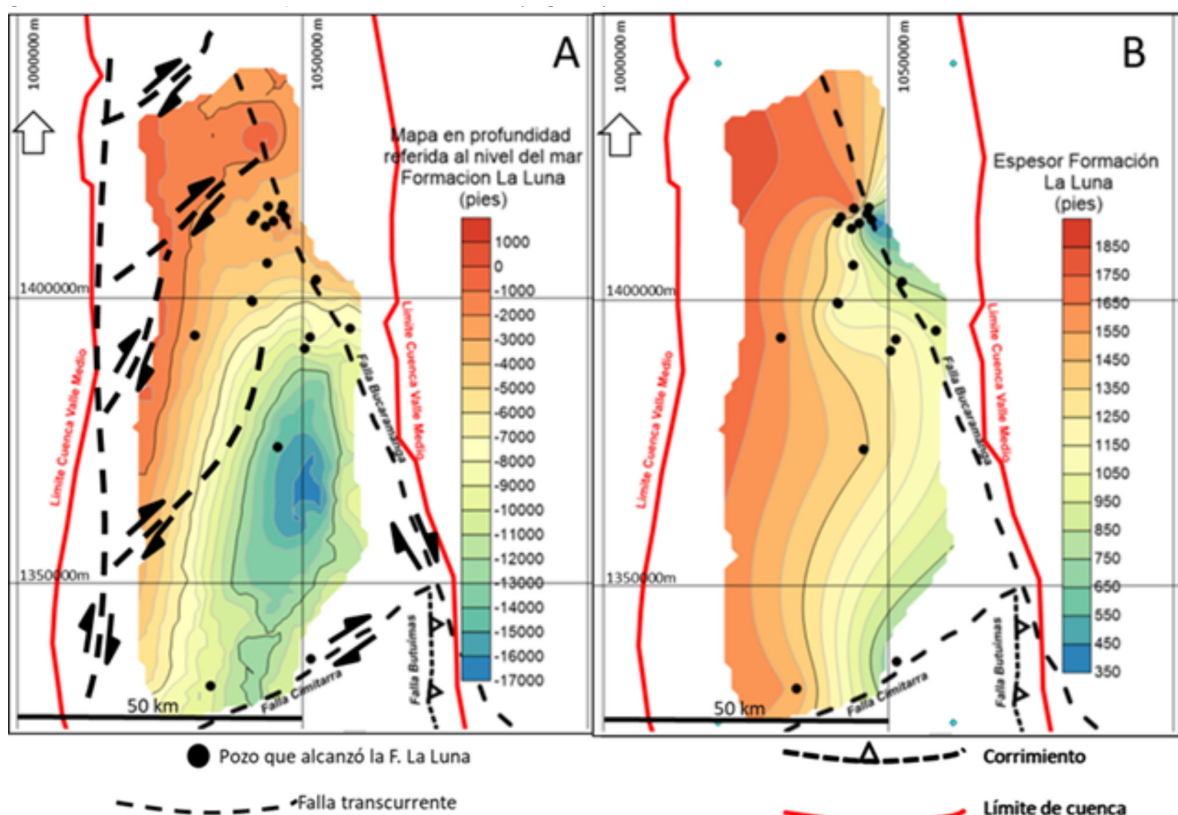


Figura 5. A) Mapa en profundidad al tope de la Formación La Luna (en pies). B) Mapa de espesor de la Formación La Luna (en pies).

CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS

Debido a su contenido en Carbono Orgánico Total (COT), hidrocarburos libres (S1), hidrocarburos remanentes (S2), potencial generador (S1+S2) e Índice de Hidrogeno (IH), la Formación La Luna es considerada una de las rocas madres más prolíficas del mundo. Por tal razón, esta unidad fue estudiada en detalle por diferentes autores: Zumberge (1984), Talukdar y Marcano (1994), Ramon *et al.* (1997), Rangel *et al.* (2017), Martínez *et al.* (2012), Veiga y Dzelalija (2014) y Torres *et al.* (2015) entre otros, realizan una descripción geoquímica de la Formación la Luna en Venezuela y Colombia. Los resultados de estos estudios se encuentran resumidos en la Tabla 1.

Los datos de subsuelo recopilados en este estudio para 4 pozos de la región indican que esta unidad muestra un COT promedio de 3.5% con máximo de hasta 6%. Los valores S1 alcanzan un promedio de 5.5 mg/g Roca y el S2 tiene un valor medio de 13.5 mg/gRoca. El IH promedio alcanza valores entre 400 y 450 mg Hc/gTOC y su potencial generador (S1+S2) alcanza un promedio de 19 mg/g Roca. Los datos de pozo muestran que el Miembro Galembo es la sección con los mejores parámetros geoquímicos, estos disminuyen en el Miembro Pujamana y luego vuelven a aumentar en el Miembro Salada.

<i>Unidad</i>	<i>COT</i> %	<i>S1</i> mgHC/gR	<i>S2</i> mgHC/gR	<i>IH</i> mgHc/gCOT	<i>Tmax</i> °C	<i>fuentes</i>
La Luna / Galembo	2.40	4.04	12.07	495	436	Rangel et al. 2000
La Luna / Pujamana	3.10	4.24	13.82	415	436	Rangel et al. 2000
La Luna / Salada	2.80	2.60	11.28	366	435	Rangel et al. 2000
La Luna	3.80			100-700	430-460	Talukdar y Marcano
La Luna / Galembo	0.88					Zumberge, 1984
La Luna / Pujamana	3.51					Zumberge, 1984
La Luna / Salada	4.51					Zumberge, 1984
La Luna	3.20-3.80			>300		Martinez et al. 2012
La Luna / Galembo	1.90-11.90					Torres et al. 2015
La Luna / Salada	2.70-10.60					Torres et al. 2015
La Luna (Galembo)	3.50	5.50	13.50	400-450	439	este trabajo

Tabla 1. Parámetros geoquímicos recopilados para las Formación La Luna y sus diferentes miembros

Se ha realizado una estimación de Carbono Orgánico Original (COT_o) tomando como dato de entrada un Índice de Hidrógeno Original (IHo) de 700 mgHC/gCOT (Talukdar y Marcano, 1994). Con esta premisa se obtiene un COT_o promedio de 5% y una tasa de transformación (TR) entre 0.6 y 0.7 para para la zona de estudio. El índice de potencial generador (SPI) calculado para esta unidad varía entre 10-16 Tn/m².

MADUREZ DE LA FORMACIÓN LA LUNA

Los datos obtenidos en 10 pozos muestran que La Formación la Luna se encuentra inmadura hacia el Oeste y a medida que se profundiza hacia la Cordillera Oriental su madurez se incrementa (Fig. 6). Resulta difícil establecer un gradiente de madurez en función de la profundidad debido a que una gran parte de la columna sedimentaria (desde la Formación Umir hasta la Formación Colorado) fue removida por erosión generando distorsiones en el gradiente de madurez. Ramon *et al.* (1997) mencionan altos valores de reflectancia de vitrinita a profundidades someras no descartando procesos de supresión de vitrinita debido al alto contenido en hidrógeno de estas rocas.

Una simulación 1D realizada sobre un pozo de la zona indica que la Formación La Luna entraría en ventana de generación de petróleo cuando se alcanza un soterramiento de al menos 7.000-8.000 ft, esto se alinea con recientes descubrimientos realizados en las cercanías del campo Totumal donde se ha logrado producir petróleo de la Formación La Luna en un rango de profundidades entre 7.000 y 8.000 ft. Para profundidades menores se estima que la Luna estaría inmadura o en un estado de madurez muy incipiente. Por otro lado, para alcanzar la ventana de generación de gas se necesitan profundidades cercanas a 18.000 ft que permitan llegar a una madurez cercana a 1.3%Ro.

TIPO DE FLUIDO ESPERABLE

El tipo de fluido esperable en este sector de la Cuenca del Valle Medio es petróleo debido a 2 razones: 1) nivel de madurez de la roca madre y 2) tipo de materia orgánica, la cual es claramente precursora de petróleo (Talukdar y Marcano, 1994, Rangel *et al.* 2017, Aguilera *et al.* 2010 en Atlas Geoquímico de Colombia-ANH, Martínez *et al.* 2012; Torres *et al.* 2015). Este petróleo muestra un rango de densidades muy amplio (entre 19 y 31°API) por mezcla de diferentes familias de fluidos, presentando diferentes características físico-químicas.

Existen diferentes estudios que realizan un pormenorizado análisis de los diferentes tipos de petróleo existentes. Estos trabajos postulan que las diferencias de fluidos se deben a variaciones en las facies orgánicas en la Formación La Luna, la presencia de otras rocas madres como la Formación Tablazo y a cambios en su nivel de madurez (Ramon *et al.* 1997; Rangel *et al.* 2017; Thompson-Butler *et al.* 2019). Los petróleos en el noroeste de la cuenca se originaron a partir de rocas con participación carbonática predominante, mientras que los petróleos de la zona oriental se habrían generado a partir de lutitas marinas con una mayor participación siliciclástica.

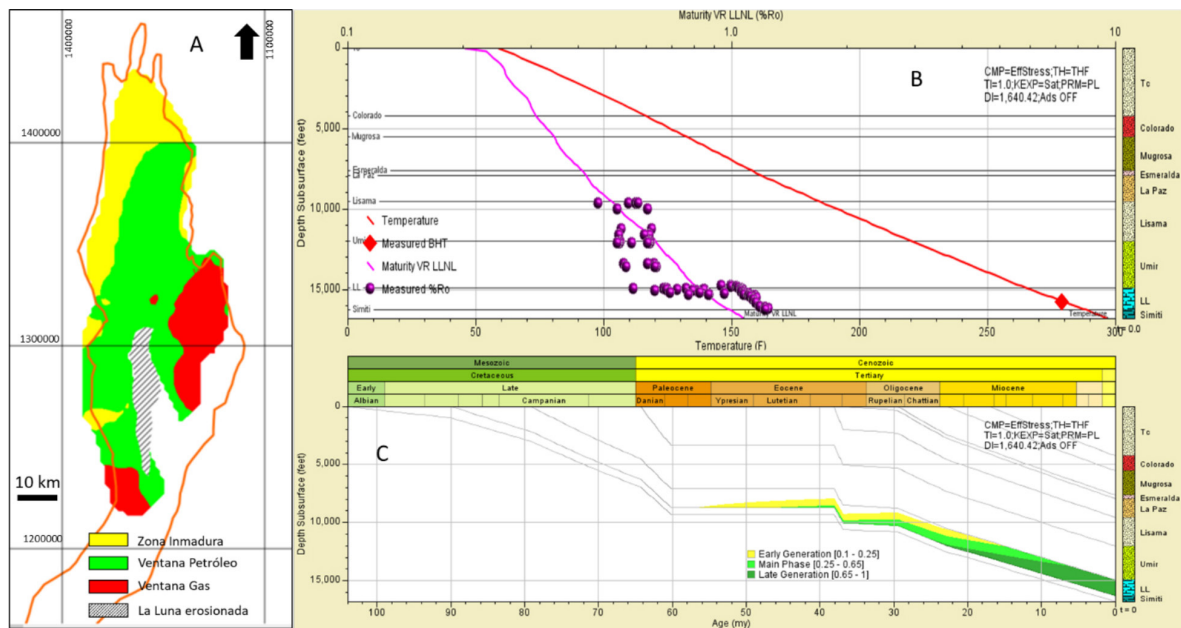


Figura 6. A) Mapa de madurez modelizado al tope de la Formación La Luna. B) Modelo 1D con datos de Temperatura y Reflectancia de Vitrinita. C) Curva de subsidencia mostrando las diferentes etapas de generación de hidrocarburos.

A todo lo antes mencionado, la interpretación sísmica y el modelado 1D permiten ver que los petróleos pesados y con filiación genética en la Formación La Luna, están localizados en zonas con un importante espesor erosionado de la columna sedimentaria Cretácico Superior a Oligoceno Superior, mientras que los petróleos más livianos, se ubican en zonas donde este espesor fue mayormente preservado (Fig. 7). Por lo tanto, la hipótesis aquí postulada plantea que las zonas con mejor calidad de fluido (más liviano) deberían ser aquellas con mayor espesor preservado de la sección comprendida entre el Cretácico superior y Oligoceno superior (espesor comprendido entre base de la Formación Umir y Tope de la formación Colorado).

EVALUACIÓN PETROFÍSICA COMO RESERVORIO NO CONVENCIONAL

Para la evaluación de la Formación La Luna se ha contado con registros de rayos gama (GR), resistivo (RES), sónicos compresionales (DTC) y densidad (RHOB) en cuatro (4) sondeos. Asimismo, tres (3) de estos sondeos contaban con información de COT que permitió hacer las calibraciones y corregir los valores de densidad modificados por la presencia de materia orgánica. La metodología de análisis empleada es una modificación a la utilizada por Veiga *et al.* (2018) la cual consiste en los siguientes pasos: 1) Determinación de COT, 2) Estimación de Volumen de Kerógeno, 3) Corrección de densidad por efecto de la materia orgánica (RhoCorr), 4) Calculo de Porosidad Total (PHIT), 5) Estimación de resistividad del agua de formación (Rw), 6) Calculo de saturación de agua (Sw), 7) Estimación de factor de volumen (Bo) y 8) Calculo de la capacidad de almacenamiento (STOOIP).

Determinación de COT

Para la determinación sintética de COT se usó el método de Passey *et al.* (1990) y su resultado fue ajustado con los datos de laboratorio. Paralelamente se aplicaron otras determinaciones sintéticas de COT (Lobo *et al.* 2017) pero las mismas no tuvieron una buena regresión con los datos medidos en laboratorio.

Estimación del Volumen de Kerógeno (Vker)

Posteriormente, se procedió a calcular el volumen de kerógeno (Vker) a partir de la ecuación (1). Para la definición de la densidad del kerógeno (RhoK) se utilizó un método empírico el cual hace variable la RhoK en función de la madurez según se muestra en la ecuación (2) adaptada de Craddock *et al.* (2018).

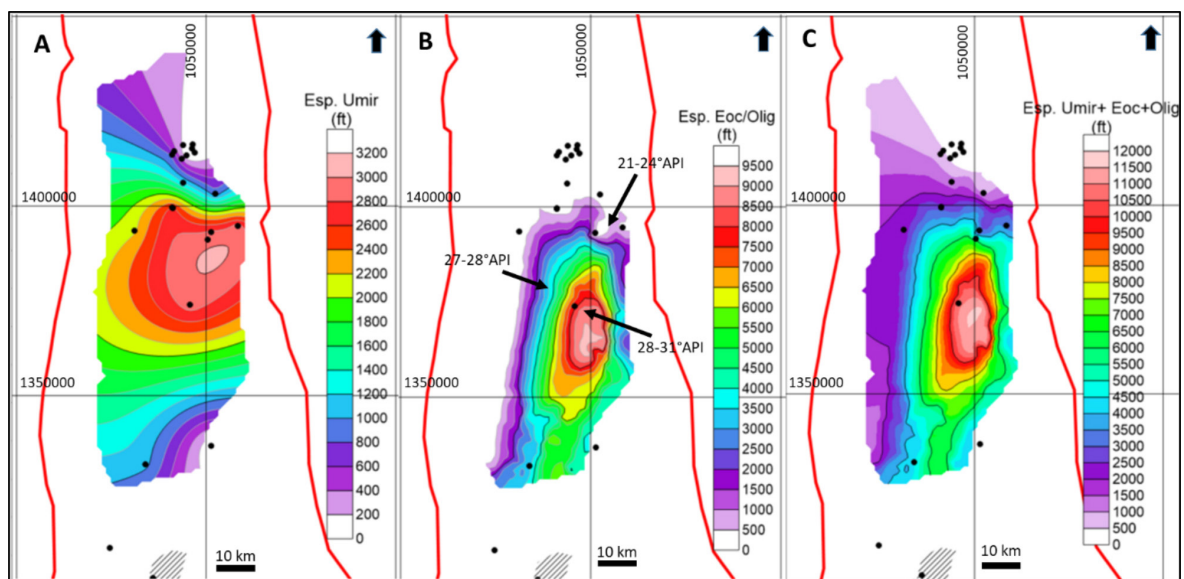


Figura 7. A) Mapa de espesor Formación Umir. B) Mapa de espesor de la secuencia Eocena/Oligocena que incluye las Formaciones Lisama, La Paz, Esmeralda, Mugrosa y Colorado. C) Mapa de espesor sumatoria A+B. Notar que los petróleos pesados se localizan en zonas donde el espesor de la secuencia Eocena/Oligocena fue parcialmente removida, mientras que los petróleos más livianos se localizan en zonas donde el espesor fue preservado

$$V_{ker} = \frac{\%COT'' \cdot RHO_B}{100 \cdot RhoK} \quad (ec.1)$$

$$RhoK = 0.2329 \cdot \ln(Ro) + 1.2983 \quad (ec.2)$$

Cálculo de Densidad Corregida (RhoCorr)

El objetivo de este cálculo es remover el efecto del kerógeno en la roca, dado que la materia orgánica tiende a bajar la densidad de la roca y con ello a sobrestimar su porosidad. Para ello se aplica la ecuación (3).

$$\text{RhoCorr} = \frac{\text{RHOB} - (\text{VTOC} * \text{RhoK}) - (\text{VHM} * \text{RhoHM})}{1 - \text{Vker} - \text{VHM}} \quad (\text{ec.3})$$

Para el caso estudiado se ha considerado dos simplificaciones: 1) el $\text{VHM}=0$ y 2) el VTOC se considera igual al Vker . Por lo tanto, la ecuación (3) queda reducida a la siguiente forma (ecuación 4).

$$\text{RhoCorr} = \frac{\text{RHOB} - (\text{VKer} * \text{RhoK})}{1 - \text{VKer}} \quad (\text{ec.4})$$

Estimación de Porosidad Total (PHIT)

Para la estimación de la porosidad total (PHIT) se utiliza la ecuación (5).

$$\text{PHIT} = \frac{\text{RhoMtz} - \text{RhoCorr}}{\text{RhoMtz} - \text{RhoF}} \quad (\text{ec.5})$$

Para la estimación de la densidad de matriz se han usado rangos entre 2.66 a 2.71 g/cc tomando en cuenta la composición mineralógica observada a partir de estudios de difracción de rayos x (DRX), estos valores se alinean con los usados por Lobo *et al.* (2017) en la Cuenca de Maracaibo. En cuanto a la densidad del fluido, se ha tomado un valor constante de 1.07 g/cc.

Los valores de PHIT obtenidos en la Formación La Luna son variables según su profundidad de soterramiento. Para posiciones donde La Luna alcanza una profundidad de 4.500-5.000 m la porosidad media se encuentra en el orden de 8% a 9%, pero en posiciones donde el soterramiento de La Luna es de 2.700-2.800 m esta podría alcanzar el orden del 11-12%. A partir de esto se construyó una curva de variación de la porosidad en función de la profundidad teniendo en cuenta los cambios de soterramiento que presenta esta unidad en toda la cuenca. En términos generales las zonas de mejor porosidad fueron identificadas hacia el tope de los ciclos Galembo A, C, D y al Tope del Miembro Salada (Fig. 8).

Estimación de la resistividad del agua de formación

Para la estimación de la resistividad del agua de formación se utilizó los resultados arrojados por el pozo Infantas 1613 en un estudio publicado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos

de Colombia (2012). En este sondeo se obtuvo una muestra de agua de formación del Miembro Galembo con 70.000 ppm en Cloruros.

Para la evaluación realizada en este trabajo, se adoptó un valor promedio de 100.000 ppm equivalente de NaCl, lo cual representa una resistividad de agua de formación igual a 0.09142 ohm.m a una temperatura de 59°F (temperatura de referencia). Asimismo, se confeccionó un mapa de temperatura al tope de la Formación La Luna para corregir la variación de la resistividad del agua con la temperatura según la ecuación (6) (Arps, 1953).

$$R_w = R_{ref} \frac{T_{ref} + 6.77}{T_f + 6.77} \quad (ec.6)$$

Cálculo de saturación de agua (S_w)

Para el cálculo de S_w se utilizó la fórmula de Archie (1942) según la ecuación (7). Para el presente trabajo se han considerado que los exponentes de cementación (m) y saturación (n) tienen un valor de 2 y la constante de tortuosidad (a) es igual a 1 tomando similares criterios a los utilizados en la evaluación del sondeo Infanta 1613 (ANH, 2012). Por lo tanto, la fórmula original queda simplificada a la ecuación (8).

$$S_w = (a \cdot R_w / (R_t \cdot PHIT^m))^{1/n} \quad (ec.7)$$

$$S_w = (R_w / (R_t \cdot PHIT^m))^{1/n} \quad (ec.8)$$

Los valores de S_w obtenidos por este método promedian entre el 24 y 28 %, solo en un caso se han obtenido valores cercanos al 50%. Cabe mencionar que los valores de S_w reportados por estudios de laboratorio se ubican en torno cerca del 24%.

Estimación de factor de volumen (B_o)

Para el presente estudio no se contaron con datos de PVT que permitieran conocer una medida directa del factor de volumen (B_o). Por lo tanto, para su estimación se ha utilizado los datos de la relación gas petróleo (GOR) recolectada de campos vecinos y a partir de la ecuación (9) se estimó el B_o . Por otro lado, también se utilizó la correlación de Standing (1951) como un doble control.

$$B_o = 1.05 + [(GOR/100) \cdot 0.05] \quad (ec.9)$$

Los datos de GOR en campos vecinos varían desde 36 a 1626 scf/bo. Los petróleos alojados en la Formación La Luna suelen tener un GOR entre 150 a 350 scf/bo, quedando definidos

dentro de la categoría de petróleo negro (*black oil*) con un GOR menor a 900 scf/bo. Con los datos recopilados, el Bo varía de 1.07 a 1.34 con una media situada en 1.13

Cálculo de la capacidad de almacenamiento (STOOIP)

A partir de los valores de PHIT, Sw y Bo calculados previamente es posible estimar la capacidad de almacenamiento en la Formación La Luna a partir de la ecuación (10).

$$\text{STOOIP} = \frac{7758 * \text{PHIT} * (1 - \text{Sw})}{\text{Bo}} \quad (\text{ec.10})$$

Los valores obtenidos para la Formación La Luna varían entre 417 a 762 bo/acre*ft resultando levemente mayores a los obtenidos en la Formación Vaca Muerta cuyo rango varía de 292 a 696 bo/acre*ft (Veiga *et al.* 2020).

Los niveles con mayor retención se sitúan en el Miembro Galembó (Galembó A, C y D) y al tope del Miembro Salada. Por lo tanto, es posible definir que La Luna contiene entre 2 y 4 niveles de navegación para el área de estudio (Fig. 8).

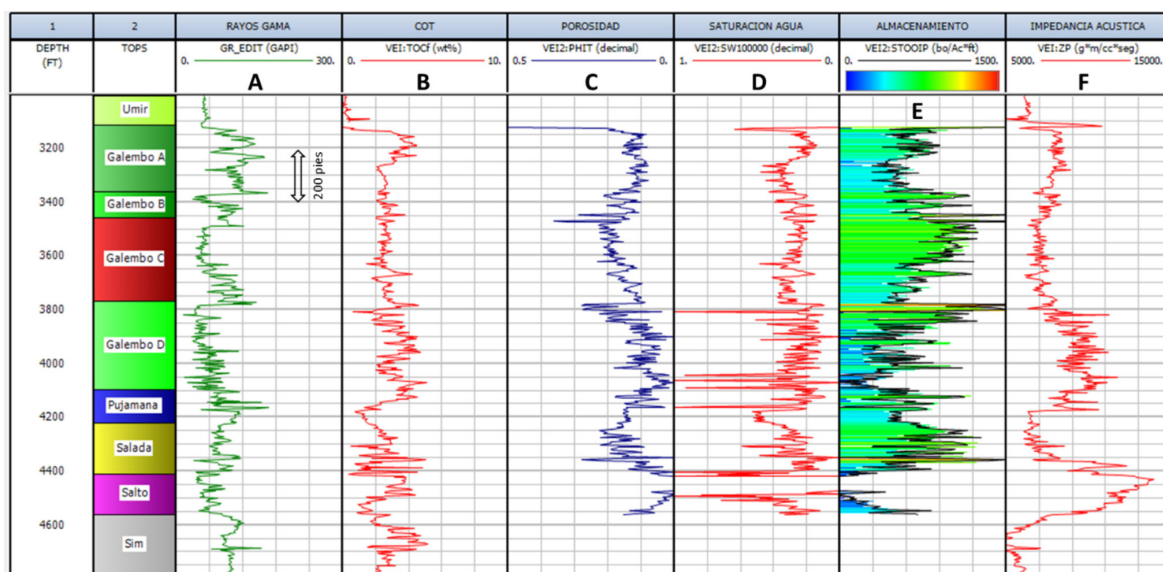


Figura 8. Ejemplo de interpretación petrofísica en un sondeo de la región. A) Rayos Gama (GR), B) Carbono Orgánico Total (COT), C) Porosidad (PHIT), E) Saturación de agua (SW), E) Capacidad de almacenamiento (STOOIP) y F) Impedancia Acústica (Zp). Notar que las secciones con mejor capacidad de almacenamiento se localizan en el Galembó A, C, D y el Miembro Salada. Estas secciones coinciden con caídas en la Zp

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FORMACIÓN LA LUNA

Para el análisis de las constantes elásticas de la Formación la Luna se contó con la información de 1 pozo con perfiles sínicos de onda P (DTC) y onda S (DTS) que sumado a los datos de densidad permitió realizar un análisis de las constantes elásticas dinámicas. Dado que no se cuentan con ensayos de laboratorio, se han utilizado las correlaciones descriptas por Lobo *et al.* (2017) para pasar de valores dinámicos a estáticos. Por lo tanto, este análisis tiene un valor preliminar hasta que nueva información permita ajustar los cálculos realizados.

Relación de Velocidades entre Ondas Compresionales y Transversales

La relación de velocidades entre las ondas compresional (V_p en m/s) y transversales (V_s en m/s) sigue una ecuación lineal a lo largo de la columna estratigráfica con una regresión del 74% (ecuación 11).

$$V_s = 371 + 0.46 \cdot V_p \quad (\text{ec.11})$$

La velocidad de la onda compresional (V_p) en la Formación La Luna está en el orden de 3.700 m/s a 3.800 m/s siendo más elevada en los Miembros Galembo y Salada (casi 4.000 m/s) y más lenta en el Miembro Pujamana (3.000 m/s). Por otro lado, la velocidad de la onda S tiene un promedio de 2.100 m/s mostrando una distribución de velocidades similar a la observada en la onda compresional, con registros más altos en Galembo y Salada y una menor velocidad en Pujamana. Finalmente, la relación V_p/V_s tiene un promedio 1.79 y los mayores valores se registran en el Miembro Pujamana con casi 1.84 observándose una tendencia general de reducción de la relación V_p/V_s de base a tope de la unidad.

Módulo de Poisson (PR)

El módulo de Poisson dinámico (PR_{dyn}) promedio alcanza un valor de 0.26. Los mayores valores se observan en el Miembro Pujamana con 0.28 mientras que los valores de PR_{dyn} más bajos se registran en el Galembo A con 0.23. Asimismo, se observan caídas localizadas al tope Miembro Salada y al tope del Galembo D (Fig. 9). No se cuenta con datos de laboratorio para correlacionar las constantes elásticas dinámicas (PR_{dyn}) y estáticas (PR_{est}), por lo tanto, se han asumido correlaciones realizadas por Lobo *et al.* (2017) como modelo preliminar según ecuaciones (12), (13) y (14).

$$PR_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (\text{ec.12})$$

$$PR_{v_{est}} = 0.91 * PR_{dyn} \quad (ec.13)$$

$$PR_{v_{est}} = PR_{h_{est}} = PR_{sta} \quad (ec.14)$$

Módulo de Young (YM)

La Formación La Luna presenta un módulo de Young dinámico (YM_{dyn}) promedio de 4.14 MM PSI (28.6 GPa) sin embargo, se observan cambios significativos a lo largo de la unidad. Las secciones identificadas como Galembo A y D son la que alcanzan valores más elevados con promedios de 4.6 MM PSI (31.7 GPa) y 4.9 MM PSI (33.8 GPa) respectivamente, mientras que el Miembro Pujamana tiene los valores más bajos con 2.6 MM PSI. Para el cálculo del YM_{dyn} y su homólogo estático YM_{est} se utilizaron las ecuaciones (15) y (16), esta última es la ecuación propuesta por Lacy (1997).

$$YM_{dyn} = \frac{\rho B * V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (ec.15)$$

$$YM_{sta} \text{ (en MM PSI)} = 0.0428 * YM_{dyn}^2 + 0.233 * YM_{dyn} \quad (ec.16)$$

Para el presente caso, se ha considerado que el YM_{sta} es equivalente al módulo de Young vertical estático (YM_{vest}). Para obtener el módulo de Young horizontal estático (YM_{hest}) se utilizó la fórmula de Zhang (2019) expresado por la ecuación (17) (Fig. 9).

$$\frac{YM_{hest}(GPa)}{YM_{vest}(GPa)} = 10.06 * YM_{vest}(GPa)^{-0.594} \quad (ec.17)$$

Análisis de fragilidad (Br)

Para el análisis de fragilidad se utilizó la fórmula de Rickman *et al.* (2008). Para ello se normalizaron el YM y la PR según las ecuaciones (18) y (19). Finalmente se procedió al cálculo de Br según la ecuación (20). Este análisis permitió observar que la Formación La Luna presenta un valor Br promedio de 0.39 obteniendo los valores de fragilidad más altos en el Galembo A, con un promedio de 0.47, mientras que la zona con menor fragilidad se ubica en el Miembro Pujamana con un valor medio de 0.24

$$YM_n = \frac{YM - YM_{min}}{YM_{max} - YM_{min}} \quad (ec.18)$$

$$PRn = \frac{PR_{max} - PR}{PR_{max} - PR_{min}} \quad (ec.19)$$

$$Br = \frac{YMn + PRn}{2} \quad (ec.20)$$

Régimen de esfuerzo

Un análisis del régimen de esfuerzo requiere de una calibración de los esfuerzos calculados con datos de campo (*Leak-Off Test*, *Extended Leak-Off Test*, *Step Rate Test*, *Pump In/Flowback*, *Diagnostic Fracture Injection Test*, etc.). Estos estudios de campo no estaban disponibles para el presente estudio, por lo tanto, los resultados aquí obtenidos revisten carácter preliminar y solo sirven para ilustrar el comportamiento en diferentes escenarios posibles.

Para la estimación de la presión poral (PP) se usó método de Bowers (1995) el cual fue contrastado con los datos de peso de lodo para lograr un mejor ajuste. Se estimó el esfuerzo efectivo (S_{eff}) según la ecuación (21) y utilizando las constantes A y B obtenidas por Lobo *et al.* (2017) en la cuenca de Maracaibo. Luego se obtuvo la PP (ecuación 22) y finalmente el gradiente de presión poral (GRADPP) mediante la ecuación (23). En la zona de estudio se observa que la Formación La Luna tendría un GRADPP medio de 0.66 psi/ft con un rango que varía entre 0.54 y 0.79 psi/ft y registrando un GRADPP máximo de 0.86 psi/ft.

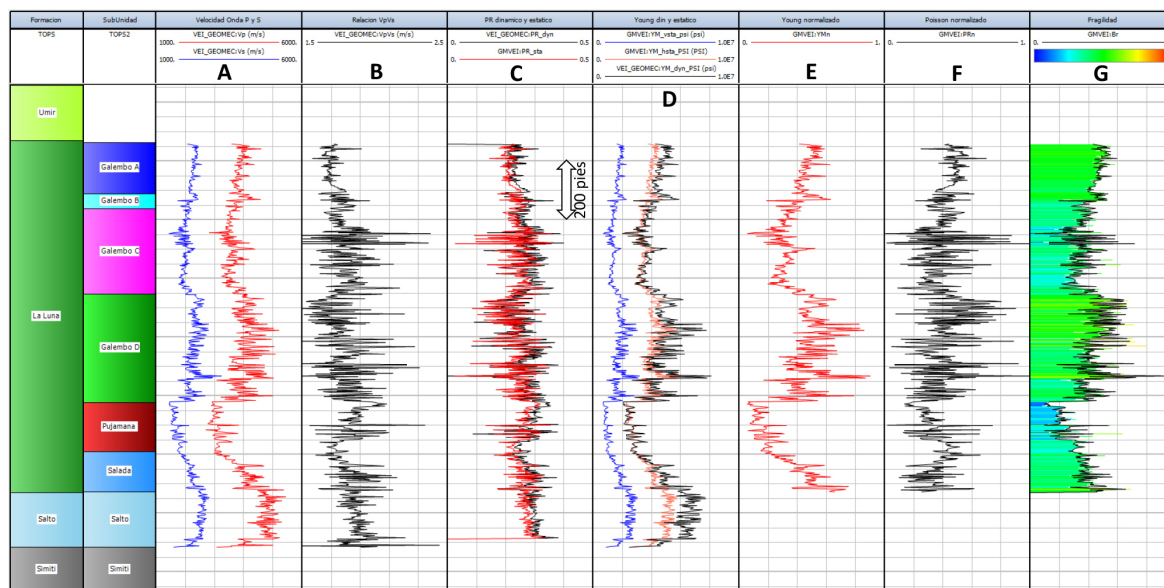


Figura 9. Análisis de constantes elásticas y fragilidad en la Formación La Luna. A) Velocidad onda P (Vp) y onda S (Vs), B) Relación Vp/Vs, C) Módulo de Poisson dinámico (PRdyn) y (PRsta), D) Módulo de Young dinámico (YMdyn), Módulo de Young vertical estático (YMvsta) y Módulo de Young horizontal estático (YM hsta), E) Módulo de Young normalizado (YMn), F) Módulo de Poisson normalizado (PRn) y G) Fragilidad (Br) Notar que las secciones identificadas como Galemba A, D y Salada son las que presentan una mayor fragilidad, mientras que el intervalo más dúctil se observa al tope del Miembro Pujamana.

$$Seff \text{ (en PSI)} = \left(\frac{\frac{10^6}{DT \left(\frac{usec}{ft} \right)} - \frac{10^6}{DT_{ml} \left(\frac{usec}{ft} \right)}}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (ec.21)$$

$$PP \text{ (en PSI)} = Sv - Seff \quad (ec.22)$$

$$GRADPP \left(\text{en} \frac{PSI}{ft} \right) = \frac{PP \text{ (psi)}}{\text{Profundidad (en pies)}} \quad (ec.23)$$

Para el cálculo del esfuerzo vertical (S_v), el esfuerzo horizontal mínimo (Sh_{min}) y el esfuerzo horizontal máximo (SH_{max}) se utilizaron las ecuaciones (24), (25) y (26). El gradiente de esfuerzo vertical ($GRAD_{Sv}$) obtenido en la zona, alcanza un valor de 1 psi/ft. Por otro lado, para la estimación del Sh_{min} y del SH_{max} se optó por correr diferentes escenarios de presión poral (PP) con gradientes comprendidos entre 0.6 y 0.9 psi/ft. Asimismo, se asumieron deformaciones horizontales máximas (ϵ_H) y mínimas (ϵ_h) comprendidas entre 970 microstrains (μstr) y 80(μstr) respectivamente, de acuerdo a las observaciones realizadas por Dolinar (2003). El objetivo de este análisis era comparar la relación de esfuerzos y establecer el régimen tectónico a la que estaba sometida la Formación La Luna bajo diferentes escenarios posibles debido a la falta de datos de calibración.

$$S_v = \int_0^z \rho_{HOB} * g * dz \quad (ec.24)$$

$$Sh_{min} = \frac{Y_{Mhsta}}{Y_{Mvsta}} * \frac{PR_{sta}}{1-PR_{sta}} * (S_v - \alpha PP) + \alpha PP + \frac{Y_{Mhsta}}{1-PR_{sta}^2} * \epsilon_{hmin} + \frac{PR_{sta} * Y_{Mhsta}}{1-PR_{sta}^2} * \epsilon_{Hmax} \quad (ec.25)$$

$$SH_{max} = \frac{Y_{Mhsta}}{Y_{Mvsta}} * \frac{PR_{sta}}{1-PR_{sta}} * (S_v - \alpha PP) + \alpha PP + \frac{PR_{sta} * Y_{Mhsta}}{1-PR_{sta}^2} * \epsilon_{hmin} + \frac{Y_{Mhsta}}{1-PR_{sta}^2} * \epsilon_{Hmax} \quad (ec.26)$$

El análisis realizado revela que si el gradiente de presión poral en la Formación La Luna tiene un gradiente igual o inferior a 0.6 psi/ft los niveles Galembo A y D se encontrarían en un régimen de esfuerzos normal ($S_v > SH > Sh$), el miembro Pujamana se encuentra en un régimen compresivo ($SH > Sh > S_v$) y el resto de la unidad se encuentre en un régimen predominantemente transcurrente ($SH > S_v > Sh$). A medida que la presión poral aumenta, las zonas con régimen de esfuerzo normal disminuyen su espesor hasta desaparecer y toda la Formación La Luna se encontraría en un régimen transcurrente a compresivo. Cuando el gradiente de presión poral es de 0.9 psi/ft sólo las secciones Galembo A y D y la infrayacente Caliza Salto se encuentran en régimen transcurrente y todo el resto de la unidad se encuentra en régimen compresivo. Un incremento en los valores de ϵ_H y ϵ_h similar al postulado por Dolinar (2003) en zonas de alta deformación conducen a que toda la Formación La Luna se ubique en un régimen compresivo. La relación Sh/S_v considerada

para un gradiente de presión poral intermedio de 0.8 psi/ft revelan que el Galembo A y Galembo D serían las zonas con régimen de esfuerzo más favorable. En todos los escenarios planteados las arcillas del Miembro Pujamana se encuentra en un régimen compresivo. (Fig. 10).

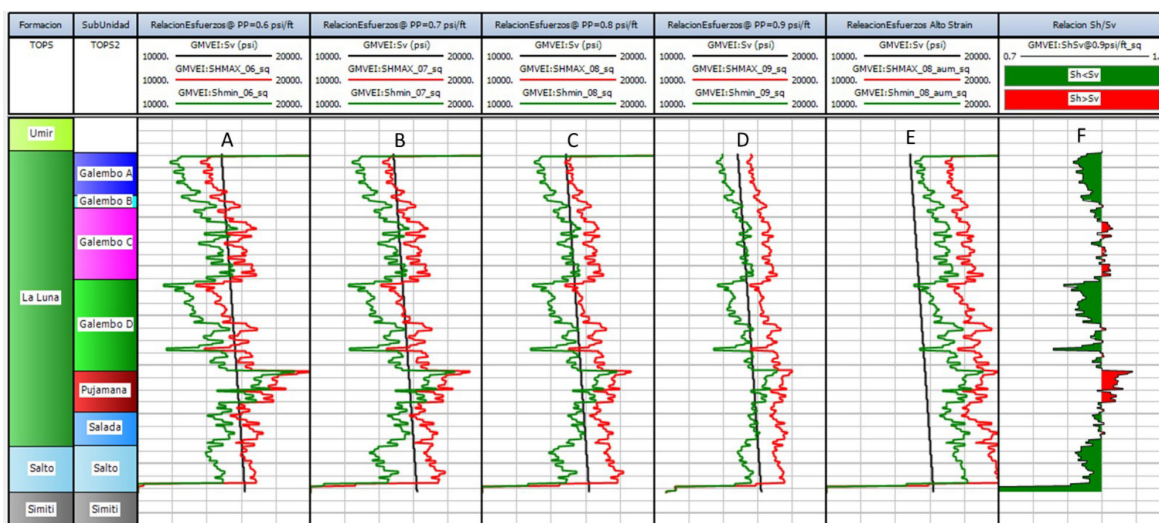


Figura 10. Variación del régimen de esfuerzos presentes en la Formación La Luna a diferentes escenarios de presión poral. A) 0.6 psi/ft, B) 0.7 psi/ft, C) 0.8 psi/ft y D) 0.9 psi/ft. E) Relación de esfuerzos en un escenario de 0.8 psi/ft pero con aumento de ε_H y ε_h similar al postulado por Dolinar (2003) en zonas de alta deformación. F) Relación Sh/Sv para el escenario de C mostrando la presencia de 2 zonas en régimen transcurrente en la Formación La Luna (en Galembo A y D) y una tercera sección en la Caliza Salto.

PROSPECTIVIDAD DEL PLAYLA LUNA

A partir de diferentes planos preparados (estructural, soterramiento, espesor y madurez) más la integración de los análisis petrofísicos y geomecánicos se trató de definir 2 aspectos claves: número de niveles aptos para ser desarrollados como reservorio no convencional (niveles navegables) y recursos del *play* en la zona de estudio.

Número de niveles navegables

Para definir la cantidad de niveles navegables se superpuso el análisis petrofísico y geomecánico, seleccionando los intervalos donde se observan los mayores valores de STOOIP y que la relación de esfuerzos fuera normal ($S_v > SH_{max} > SH_{min}$) y/o transcurrente ($SH_{max} > S_v > SH_{min}$). Los intervalos que no cumplieran esta doble condición fueron rechazados, ya sea porque su STOOIP fuera bajo o porque la zona estuviera sometido a un régimen de esfuerzo compresivo ($SH_{max} > SH_{min} > S_v$). Este criterio de aceptación/rechazo es cumplido casi siempre por 2 niveles: Galembo A y Galembo D. Ocasionalmente se pueden añadir un tercer y cuarto nivel en el Galembo C y el Miembro Salada. Por lo tanto, se toma como caso base la presencia de dos (2) niveles de navegación (Fig. 11).

Extensión del *play*

Este es uno de los aspectos claves en un *play* no convencional, dado que al tratarse de un entrapamiento continuo la definición del área desarrollable tiene un valor primordial. Esta superficie dependerá de la continuidad del reservorio en subsuelo, pero también estará en función de las limitaciones observadas en superficie (ej. áreas cultivadas, cursos de agua, centros poblados, etc.). Las áreas que se definen en este trabajo representan superficies calculadas en subsuelo. No incluyen las limitaciones que pudieran ocurrir en superficie por restricciones medioambientales y/o comunitarias.

Los mapas de madurez y soterramiento indican que La Luna necesita al menos 7.000 ft de cobertura sedimentaria para alcanzar condiciones mínimas de madurez. Por otro lado, esta unidad alcanza profundidades de hasta 18.000 ft. Según criterios del EIA (2015) un *play* no convencional es desarrollable hasta profundidades de 5.000 m (16400 ft). Una recopilación de profundidades promedio de diferentes shales muestran que las profundidades máximas desarrollable oscilan entre 12.000 ft en Haynesville y 15.250 ft en Mancos shale. Por lo tanto, para el presente estudio se delimitó un área comprendida entre 7000 ft (entrada en la ventana de madurez) y 12.000 ft (soterramiento promedio de Haynesville) como una primera aproximación. Esta franja prospectiva tiene una superficie de 1.172 km², pero solo la porción occidental de esta franja es la que se encuentra menos afectada por la estructuración generada por el alzamiento de la Cordillera Oriental y por la actividad de la Falla de Bucaramanga, por lo tanto, el área disponible en subsuelo se limita a una superficie entre 800 a 850 km² (Fig. 12).

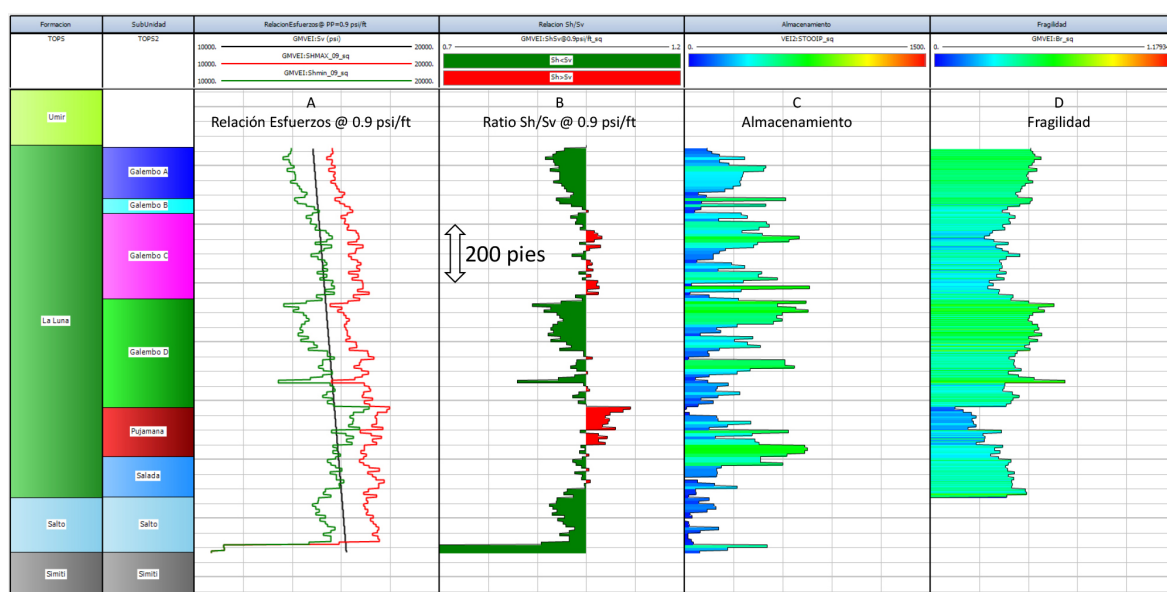


Figura 11. Identificación de niveles de navegación a partir de la combinación del análisis petrofísico y geomecánico. A) Relación de esfuerzos estimada con un gradiente de 0.9 psi/ft, B) Relación Sh/Sv a un gradiente de 0.9 psi/ft C) Capacidad de almacenamiento (Storage) y D) Fragilidad. Notar que el Galembos A y Galembos D muestran la mejor combinación de almacenamiento, relación de esfuerzos y fragilidad. El Galembos C y el Miembro Salada muestra zonas de alto almacenamiento, pero la relación de esfuerzos no es tan favorable. A partir de este análisis se estima 2 niveles de navegación como un caso base para desarrollo.

La evaluación petrofísica indica que el STOOIP de la Formación La Luna varía entre 417 y 762 bo/ac-ft. Si se toma este rango como una relación P90/P10 entonces resulta un *mean* de 580 bo/ac-ft. Por otro lado, los espesores que cumplen con una relación de esfuerzos ($Sh/Sv < 0.95$) varía entre 150 y 200 ft para el Galembo A y entre 200-250 ft para el Galembo D. Tomando como base el STOOIP calculado y el espesor medido que cumple con un régimen de esfuerzo normal la transcuriente se obtienen que la riqueza del *play* ronda entre 18.6 y 25.8 MMbo/km² in place para los niveles Galembo A y D respectivamente.

Finalmente, teniendo en cuenta las áreas consideradas, se estima que los recursos in place existentes en el Galembo A varían entre 11 y 19 Bbo (P90/P10) con una media de 15 Bbo y para el Galembo D se calcula entre 15 y 28 Bbo (P90/P10) con una media de 21 Bbo. Asumiendo una eficiencia comprendida entre el 6 y 9% se calcula que los recursos recuperables en el Galembo A alcanzarían 1.236 MMboe y en el Galembo D ascendería a 1.720 MMboe (Tabla 2)

CONCLUSIONES

1. La Formación La Luna presenta buenas características como *play* no convencional. La capacidad de retención es igual o inclusive mejor que la observada en la Formación Vaca Muerta.
2. El tipo de petróleo de la Formación La Luna en el VMM parece estar influenciada no solo por diferentes características geoquímicas de la materia orgánica y su profundidad de soterramiento, sino también por la preservación de la secuencia Cretácico superior - Oligoceno que habría ayudado para que la Formación La Luna estuviera enterrada por más tiempo y alcanzando un mayor grado de evolución termal.
3. Los niveles con mejores condiciones petrofísicas se observan en el Galembo A, C, D y Miembro Salada. Las zonas de mayor fragilidad se observan en el Galembo A y Galembo D.
4. Se identifican 2 a 4 niveles de navegación. Los más habituales se desarrollan en Galembo A y D, pero también se agregan niveles en el Galembo C y el Miembro Salada.
5. El régimen de esfuerzo observado es de tipo transcuriente para rangos de presión poral entre 0.7 y 0.9 psi/ft pero a presiones más bajas hay zonas que podrían caer dentro de la zona de régimen normal.
6. La relación de esfuerzos parece ser un elemento crítico dado que algunos niveles con elevada capacidad de almacenamiento podrían estar comprometidos por encontrarse en un régimen compresivo.
7. Se estiman recursos recuperables de 1.2 Bbo para el Galembo A y 1.7 Bbo para el Galembo D en la zona de estudio como un caso base con 2 niveles de navegación.
8. La principal limitación del *play* es el área desarrollable, la cual ronda en 850 km². A esto hay que añadirle otras restricciones de carácter medioambiental-social que podrían reducir aún más el área desarrollable.

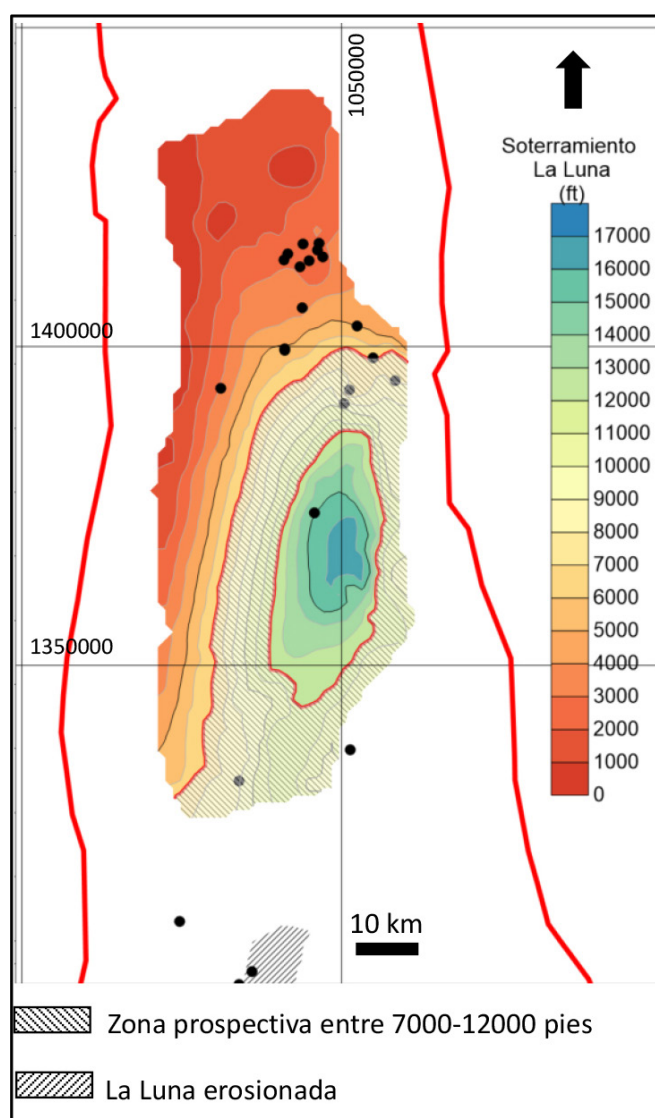


Figura 12. Mapa de soterramiento mostrando el área prospectiva ubicada entre 7.000 y 12.000 pies que abarca 1.172 km². La porción oriental de esta franja se encuentra afectada por la estructuración de la Cordillera Oriental, por lo tanto, se estima que la zona occidental es la que presenta mayor valor prospectivo.

Volumetría Galembo A												
Escenarios	Area km2	Espesor pies	Porosidad %	Saturación Hidrocarburos %	Eficiencia %	Bo rb/stb	GOR scf/bo	OOIP MMBo	Recuperable Petróleo MMBo	Recuperable Gas Bcf	Total Hidrocarburos MMboe	
P90	800	120	11	60	6.00	1.15	300	11197	689	264	747	
Mean	825	130	12	70	7.50	1.20	480	15051	1147	533	1236	
P10	850	140	14	80	9.00	1.25	700	19231	1680	888	1808	
Volumetría Galembo D												
Escenarios	Area km2	Espesor pies	Porosidad %	Saturación Hidrocarburos %	Eficiencia %	Bo rb/stb	GOR scf/bo	OOIP MMBo	Recuperable Petróleo MMBo	Recuperable Gas Bcf	Total Hidrocarburos MMboe	
P90	800	150	11	60	6.00	1.15	300	14825	919	356	1001	
Mean	825	180	12	70	7.50	1.20	480	20952	1595	742	1720	
P10	850	215	14	80	9.00	1.25	700	27759	2389	1250	2579	

Tabla 2. Volumetría calculada por nivel de navegación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen a las autoridades de Tecpetrol (Lic. Daniel Valencio e Ing. Horacio Marín) el permiso para la publicación del presente trabajo. A Claudia Galarza, Darío Siehankiwicz, y Yoseberling Castillo por su aporte en la organización de la base de datos y a los miembros del jurado que con sus comentarios permitieron mejorarlo sustancialmente.

NOMENCLATURA

ft: pies	Rt: resistividad profunda leída en registros (ohm.m)
MM: millones (10^6)	Bo: factor de volumen (condiciones de fondo/condiciones de superficie)
B: billones (10^9)	STOOIP: capacidad de almacenamiento (bo/acre*ft)
scf: pies cúbicos en condiciones de P y T de superficie	Vp: velocidad onda P (m/s)
bo: barriles de petróleo	Vs: velocidad onda S (m/s)
1 GPa: GigaPascal $\Rightarrow 10^9$ Pa $\Rightarrow 145037.73$ PSI	VpVs: relación Vp/Vs
usec/ft: microsegundos/pies	PRdyn: Módulo de Poisson dinámico (decimal)
COT: Carbono Orgánico Total en % en peso,	PRvest: Módulo de Poisson vertical estático (decimal)
S1: Hidrocarburos libres en mgHC/gRoca,	PRhest: Módulo de Poisson horizontal estático (decimal)
S2: Hidrocarburos remanentes en mgHC/gRoca,	YMdyn: Módulo de Young dinámico (GPa)
S1+S2: Potencial generador en mgHC/gRoca	YMest: Módulo de Young estático (GPa)
IH: Índice de Hidrógeno en mgHC/gCOT	YMvest: Módulo de Young vertical estático (GPa)
COTo: Carbono Orgánico Original en % en peso	YMhest: Módulo de Young horizontal estático (GPa)
TMax: Temperatura pico S2 en °C	YMn: Módulo de Young normalizado
TR: Tasa de Transformación (decimal)	YMmax: Módulo de Young Máximo
Ro: reflectancia de vitritina (%)	YMmin: Módulo de Young Mínimo
VKer: Volumen Kerogeno (decimal)	PRn: Módulo de Poisson normalizado
RHOB: Densidad medida perfil de densidad (g/cc)	PRmax: Módulo de Poisson máximo
RhoK: Densidad kerogeno (g/cc)	PRmin: Módulo de Poisson mínimo
RhoCorr: Densidad roca corregida por efecto de materia organica (g/cc)	Seff: Esfuerzo efectivos (psi)
VCOT: Volumen de COT (decimal)	A: constante=15
VHM: Volumen minerales pesados (decimal)	B: constante=0.725
RhoHM: Densidad Minerales Pesados (g/cc)	DT: tiempo de transito sónico (usec/ft)
PHIT: Porosidad Total (decimal)	DTml: tiempo de transito sónico en mud log =200 usec/ft
RhoMtz: Densidad Matriz (g/cc)	PP: presión de poros (psi)
Rhof: Densidad fluido (g/cc)	GRADPP: Gradiente de presión de poros (psi/ft).
Rw: Resistividad agua de formación (ohm.m)	Sv: Esfuerzo vertical (psi)
Rref: Resistividad agua a temperatura de referencia (59°F)	g: aceleración gravedad (m/s^2)
Tref: Temperatura de referencia=59°F	Shmin: Esfuerzo horizontal mínimo (psi)
Tf: Temperatura de reservorio (°F)	SHMax: Esfuerzo horizontal máximo (psi)
Sw: saturación de agua (decimal)	α : cte, de Biot
a: tortuosidad=1	ϵ_{hmin} : Deformación horizontal mínima (microstrains)
m: factor cementación=2	ϵ_{hMAX} : Deformación horizontal máxima (microstrains)
n: factor saturación=2	

REFERENCIAS CITADAS

- Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2012. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. Pozo Infanta -1613.
- Aguilera, R.C., Sotelo, V.A. Burgos, C.A., Arce, C., Gómez, C., Mojica, J., Castillo, H., Jimenez, D. y Osorno, J., 2010. Organic Geochemistry Atlas of Colombia Second Edition. Agencia Nacional de Hidrocarburos. Earth Sciences Research Journal.
- Archie, G., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146/1
- Arps, J.J., 1953. The Effect of Temperature on the Density and Electrical Resistivity of Sodium Chloride Solutions, Petroleum Transactions of the AIME, Vol. 198, Technical Note 195.
- Aspden, J.A., McCourt W.J. y Brook, M., 1987. Geometrical control of subduction related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic Plutonic History of Western Colombia. Journal Geological Society. Londres, 144: 893-905.
- Bande, A., Horton, B.K., Ramirez-Arias, J.C., Mora, A., Parra M., y Stockli D.F., 2012. Clastic deposition, provenance, and sequence of Andean thrusting in the frontal Eastern Cordillera and Llanos foreland basin of Colombia: Geological Society of America Bulletin 124:59-76.
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. y Martinez, J., 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).
- Ben-Avraham, Z. y Nur, A., 1987. Effects of collisions at trenches on oceanic ridges and passive margins, in J. W. H. Monger y J. Francheteau, eds., Circum-Pacific orogenic belts and evolution of the Pacific Ocean basin: American Geophysical Union, Geodynamics Series, v. 18, p. 9-18.
- Bowers. G. L., 1995. Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressures mechanism besides undercompaction. Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion. V. 6, 89-95.
- Butler, K. y Schamel. S., 1989. Upper Crustal control of deformation and hydrocarbon traps along the Upper Magdalena Valley, Colombia (abs.): AAPG Bulletin, v. 73, p. 339.
- Caballero, V., Parra, M. y Mora, A.R., 2010. Levantamiento de la Cordillera Oriental durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. Boletín de Geología 32. 45-77.
- Córdoba, F., Rolón, F., Buchelli, F. y Suarez, M., 2000. Provincia petrolífera del Valle Medio del Magdalena, Colombia. VII Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuenas Subandinas. Caracas, Venezuela, septiembre 10-13. 2000, 603-609.
- Cooper, M. A., F. T. Addison, R. Alvarez, M. Coral, R. H. Graham, A. B. Hayward, S. Howe, J. Martinez, J. Naar, R. Penas, A. J. Pulham, y A. Taborda, 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia: AAPG Bulletin, v. 79, no. 10, p. 1421-1443
- Craddock, P.R., Bake, K.D. y Pomerantz, A. E., 2018. Chemical, Molecular, and Microstructural Evolution of Kerogen during Thermal Maturation: Case study from the Woodford Shale of Oklahoma. Energy & Fuels DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b00189.

- Daly, M.C., 1989. Correlations between Nazca/Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador: *Tectonics*, v. 8, p. 769–790.
- Dolinar, D.R., 2003. Variation of horizontal stress and strain in mines in bedded deposits in the eastern and midwestern United States. In: *Proc. 22nd International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown.
- Duque-Caro, H., 1990. The Chocó block in the northwestern corner of South America; structural, tectonostratigraphic and paleogeographic implications: *Journal of South American Earth Science*, v. 3, p. 1–14.
- Garner, A.H., 1926. Suggested nomenclature and correlation of the geological formations in Venezuela: *Petroleum development and technology in 1925. Symposiums of the Petroleum Division/American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*.
- Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., Kelley, S. y Heizler, M., 2003. Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. *GSA Bulletin*, v. 115, p. 131–147.
- Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W. y Cardozo, N., 2005. Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 117, 1272–1292.
- Hedberg, H.D. y Sass, L.C., 1937. Synopsis of the geologic formations of the western part of the Maracaibo Basin, Venezuela. *Boletín de Geología y Minería de Venezuela*, tomo I: 72–112.
- Horton, B.K., Saylor, J.E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes, A. y Stockli, D., 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: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 122, p. 1423–1442.
- Jenkyns, H.C., 1980. Cretaceous anoxic events: from continents to oceans. *Journal of the Geological Society*, 137(2):171.
- Julivert, M., 1968. “Colombie (première partie), Précambrien, Paléozoïque, et intrusions d’âge mésozoïque-tertiaire”. En *Lexique Stratigraphique International V. Amérique Latine*, dirigido por R. Hoffstetter, fascicule 4a. Paris: Centre National De La Recherche Scientifique.
- Lacy, L., 1997. Dynamic Rocks Mechanics testing for optimized fracture design. Paper SPE 38716. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio. Texas. USA
- Lobo, C., Molina, A., Faraco, A., Mendez, J. y Delgadillo, J., 2017. Methodology for petrophysical and geomechanical analysis of shale *plays*. Case Study: La Luna and Capacho Formation, Maracaibo Basin. Society of Petroleum Engineers. SPE-185606-MS.
- Martínez D.A., Mendoza C.R., Clavijo J., Juliao T.M. y Márquez R., 2012. Caracterización Geoquímica de la Formación La Luna en la Parte Noreste de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena a Partir de Datos de Afloramiento. XIII Congreso Latinoamericano de Geoquímica Orgánica. DOI: 10.13140/RG.2.2.23566.72005
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimate, C. y Rodríguez, F., 2006. Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia: *Tectonics*, v. 25, p.
- Mora, A., Horton, B.K., Mesa, A., Rubiano, J., Ketcham, R. A., Parra, M., Blanco, V., García, D. y Stockli, D., 2010. Migration of Cenozoic de-

- formation in the eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems: American Association of Petroleum Geologist Bulletin, V94, pp 1543-1580.
- Morales, L.G., Podesta, D.J., Hatfield, W.C., Tanner, H., Jones, S.H., Barker, M.H., O'Donoghue, D.J., Moler, C.E., Dubois, E.P., Jacobs, C. y Goss, C. R., 1958. General geology & oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia: Habitat of Oil. Symposium, American Association of Petroleum Geologists. P. 641-695.
- Notestein, F.B., Hubman, C.W. y Bowler, J. W., 1944. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Bulletin Geological Society of America, 55 (10) 1165-1216. Geological Society of America (GSA) Boulder, CO, United States.
- Pardo-Casas, F. y Molnar, P., 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time: Tectonics, v. 6, p. 233-248
- Passey, Q., Creaney S., Bulla J., Moretti F. y Stroud J., 1990. A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. American Association of Petroleum Geologists Bulletin V.74.
- Pilger, R.H., 1984. Cenozoic plate kinematics subduction and magmatism: South American Andes: Journal of the Geological Society of London, v. 141, p. 793-802
- Ramon, J. C., Dzou, L. y Giraldo, B., 1997. Geochemical Evaluation of the Middle Magdalena Basin, Colombia. Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 1 N°3.
- Rangel, A., Osorno, J.F., Ramirez, J.C., De Bedout, J., Gonzalez, J.L. y Pabón, J.M., 2017. Geochemical assessment of the Colombian oils based on bulk petroleum properties and biomarker parameter. Marine and Petroleum Geology 86, 1291-1309.
- Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., Grieser, B. y Kundert, D., 2008. A practical use of shales petrophysics for stimulation design optimization: All shale *plays* are not clones of the Barnett shale. Society of Petroleum Engineers. SPE. 115258.
- Sarmiento, G., Puentes, J. y Sierra, C. 2015. Evolución geológica y estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. Geología Norandina 12: 51-82.
- Standing, M.B., 1951. Volumetric and phase behavior of oil field hydrocarbon systems: PVT for engineers. California Research Corporation
- Talukdar, S.C. y Marciano, F., 1984. Petroleum Systems of the Maracaibo Basin, Venezuela. En Magoon, L. B. y Dow, W. G., eds. The petroleum system- from the source to trap. American Association of Petroleum Geologists Memoir 60.
- Terraza Melo, R., 2019. Formación La Luna: expresión espuria en la geología colombiana”. En Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia vol. XXIII. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Thompson-Butler, W., Peters, K.E., Magoon, L.B., Scheirer, A.H., Moldowan, J.M., Blanco, V.O., Gonzalez, R.E., Graham, S.A., Zumberge, J.E. y Wavrek, D. A., 2019. American Association Petroleum Geologists Bulletin V. 103 N°12. 3003-3034.
- Torres, E.J, Slatt, R.M., Philp, P., O'Brien, N.R. y Rodriguez, H.L., 2015. Unconventional Resources Assessment of La Luna Formation in the Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Search and Discovery Article #80469.

- Veiga, R. y Dzelalija, F., 2014. A Regional Overview of the La Luna Formation and the Villeta Group as Shale Gas/Shale Oil in the Catatumbo, Magdalena Valley and Eastern Cordillera Regions, Colombia, American Association of Petroleum Geologists, Search and Discovery Article #10565,
- Veiga, R., Bande, A., Micucci, C., Mosquera, A. y Macellari, C., 2018. Análisis en la capacidad de almacenamiento de gas a partir del uso de registros de pozo. Ejemplos en la Formación Vaca Muerta. Cuenca Neuquina. Argentina. Simposio de Recursos No Convencionales. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos.
- Veiga, R., Vergani, G.D., Brissón, I.E., Macellari, C. E. y Leanza, H. A., 2020. The Neuquén Super Basin. American Association Petroleum Geologist Bulletin, v.104, N° 12, 2521-2555.
- Wheeler, O.C., 1929. Report on the Palmira Series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama y La Paz Formations near the eastern part of De Mares Concession. Informe Geológico 37. Ecopetrol.
- Zhang, J.J., 2019. Applied Petroleum Geomechanics. Gulf Professional Publishing. Elsevier. 536 p
- Zumberge, J.E., 1984. Source rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley, Colombia. En Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks, editado por James G. Palacas, 127-133. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/St18443C9>