

CARACTERIZACIÓN DE LA CONTINUIDAD LATERAL Y VERTICAL DE LAS ARENISCAS CONTINENTALES: EL CASO DE LA FORMACIÓN MUGROSA EN EL CAMPO LLANITO Y CASABE

Efraín Casadiego Quintero¹, Alberto Ortiz², Germán Meza², Juan Diego Colegial¹

RESUMEN

La Formación Mugrosa se formó en un ambiente de transición entre meandriforme anastomosado, conformado por una gran variación de facies, que complica el entrapamiento del hidrocarburo, es importante la caracterización lateral y vertical de los cambios petrofísicos junto con las conexiones de los canales (Ecopetrol, 2007). Este estudio busca determinar la continuidad y extensión de las areniscas de canal de la Formación Mugrosa y sus restricciones laterales por depósitos de llanura de inundación. Los resultados de estas observaciones se obtuvieron con base a la integración de análisis sedimentológico de 134.62 m de núcleos de perforación de los pozos ECE-7 y CS-1045 y aproximadamente 250 metros de afloramientos de la zona Uribe-Uribe, Valle Medio del Magdalena. Los afloramientos nos dieron las geometrías de los canales y sus espesores reales. Basado en la correlación se pueden observar y ubicar zonas de amalgamamiento, donde los canales son extensos arealmente. Las correlaciones cortan la Formación Mugrosa en todas las direcciones, lo cual se hace para conocer como es la conexión de los canales transversos y longitudinales a la dirección del paleoflujo. Se planteó la variación de espesores de arenas por horizontes, y se obtuvo un promedio de la variación de estos espesores.

Palabras Clave: Formación Mugrosa, Campo Llanito y Casabe, continuidad lateral de las areniscas de canal.

LATERAL AND VERTICAL CONTINUITY OF THE SANDS OF THE MUGROSA FORMATION ON THE LLANITO AND CASABE FIELD

ABSTRACT

Mugrosa Formation was deposited on a transitional braided-meandering with lateral lithofacies changes that complicates the hydrocarbon traps. It is important the lateral and vertical description of petrophysic changes with the channel connections (Ecopetrol, 2007). The research aim is to determinate the continuity and extension of sandstone channels of Mugrosa Formation and their lateral restrictions for floodplain deposits. The results of the observations are based in the integration of sedimentologic analysis of 111.68 ft drill core of wells ECE-7 and CS-1045, and approximately 820,21 ft of outcrops of the Uribe-Uribe zone, Middle Magdalena Valley. The outcrops show the channel geometries and its real thickness. Based in the correlation made it can be located amalgamation zones, where the channels have an extensive area. Correlations cross the Formation in all directions to know the connection of transversal and longitudinal channels in paleocurrents direction. It suggests the variation of area sands thicknesses for horizon, and it got on average of the variations of these thicknesses.

Key words: Mugrosa Formation, Llanito and Casabe field, Lateral and Vertical Continuity of Sandstone channels.

¹. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, A.A 678, Bucaramanga, Santander, Colombia. Grupo de Investigación en Estratigrafía. ecasageo@gmail.com, colegial@uis.edu.co

² ECOPETROL - Instituto Colombiano del Petróleo.

INTRODUCCIÓN

La variación vertical y lateral de la geometría de las areniscas acumuladas en ambientes continentales hace difícil predecir el entrapamiento del hidrocarburo y la extensión de los canales. La Formación Mugrosa, del intervalo cronoestratigráfico Eoceno Superior - Oligoceno Inferior según (Gómez et al., 2005), es una secuencia estratigráfica originada por la sedimentación en ambientes fluviales que varían entre anastomosado y meandriforme (Ramón y Cross, 1997; Madero, 2010), y por ello se seleccionó para este estudio. La Formación Mugrosa es una de las unidades más productivas de petróleo en la Concesión de Mares y se puede considerar como uno de los reservorios de hidrocarburos más importantes de Colombia (Clavijo y Royero, 2001).

Los reservorios de hidrocarburos de esta naturaleza presentan complejidad la cual reduce la certeza del conocimiento de propiedades petrofísicas debido a la variación litológica lateral y vertical. Estas variaciones son de interés en la exploración de hidrocarburos por lo cual se requiere profundizar el conocimiento sedimentológico, petrográfico, estratigráfico, y evolutivo de este tipo de unidades geológicas, (Santacruz, 2004).

Con el objetivo de ampliar las posibilidades prospectivas de exploración, se ha realizado un análisis enfocado a determinar la distribución de canales (continuidad lateral y vertical) al noroccidente Cuenca del Valle Medio del río Magdalena a partir de núcleos de roca de los pozos corazonados ECE 7, CS-1045, registros eléctricos de 10 pozos y los datos obtenidos en campo de la Formación Mugrosa.

Mediante un metódico examen y tratamiento de la información recolectada se estimó la continuidad de canales mediante la identificación y descripción de electrofacies, la integración de los perfiles eléctricos analizados y su correlación. Esto último requirió calibración previa de los datos de campo, de los corazones de roca y el análisis de mapas existentes de distribución de arenas petrolíferas (Figura 1).

MARCO ESTRATIGRÁFICO

Estratigrafía

El nombre de la formación Mugrosa fue dado por A. K. Gill y referenciado por Morales y otros en 1958 (Clavijo y Royero, 2001), refiriéndose a la parte inferior del grupo Chuspas. Su nombre fue tomado de la quebrada Mugrosa. El contacto inferior de la Formación

Mugrosa es discordante con la Formación Esmeraldas y el contacto superior con la Formación Colorado es concordante. El espesor varía entre 500 y 800 m y su edad se considera del Eoceno superior – Oligoceno inferior. En este intervalo de tiempo, el empuje de la placa suramericana al norte de Colombia con la placa Caribe conduce la subsidencia regional que vigoriza la sedimentación en el periodo Eoceno – Oligoceno (Pindell et al., 2005).

Según Gómez en el 2005 el desarrollo del VMM se dio en el Cretáceo tardío al Eoceno inferior con el levantamiento de la Cordillera Central al oeste y posterior transferencia de deformación a la cordillera oriental al este. Desde el Paleoceno costero a facies aluviales en la parte inferior del VMM fueron depositados en una cuenca foreland asociados a la elevación de la Cordillera Central a escala de kilómetros (Cooper et al., 1998; Gomez et al., 2005).

La unidad está compuesta en su parte inferior por areniscas gris verdosas, de grano fino a medio, con intercalaciones de lodolitas grises a azulosas y algunas capas de areniscas conglomeráticas. La parte media consta de shales moteados con algunas intercalaciones de arenisca, hacia la parte superior hay lodolitas moteadas, fosilíferas (Clavijo y Royero, 2001).

El ambiente sedimentario de tipo fluvial meandriforme, se caracteriza por presencia de canales con sedimentación granodecreciente hacia el tope en la facies de canal y granocreciente en la facies de crevasse splay (Gomez et al., 2005), A continuación se describirán dos zonas: Zona C y Zona B.

Zona C: Compuesta de arenisca gris-verdosa, grano medio a grueso, subangular a sub-redondeada, matriz arcillosa, regular a pobre selección, con delgadas intercalaciones de arcillolita gris verdosa, gris oscura, rojiza y blanca. Con un espesor promedio de 168 metros (550 pies); el historial de producción indica que esta unidad ha sido más productiva en comparación con la unidad B, que se describe enseguida, (Eecopetrol, 2003).

Zona B: Se caracteriza por presentar una secuencia limo-arcillosa de coloraciones pardas-amarillentas a grises, con intercalaciones de areniscas gris verdosa, de grano fino. La proporción de la fracción arenosa aumenta hacia la base. Su espesor promedio es de unos 427 metros (1400 pies).

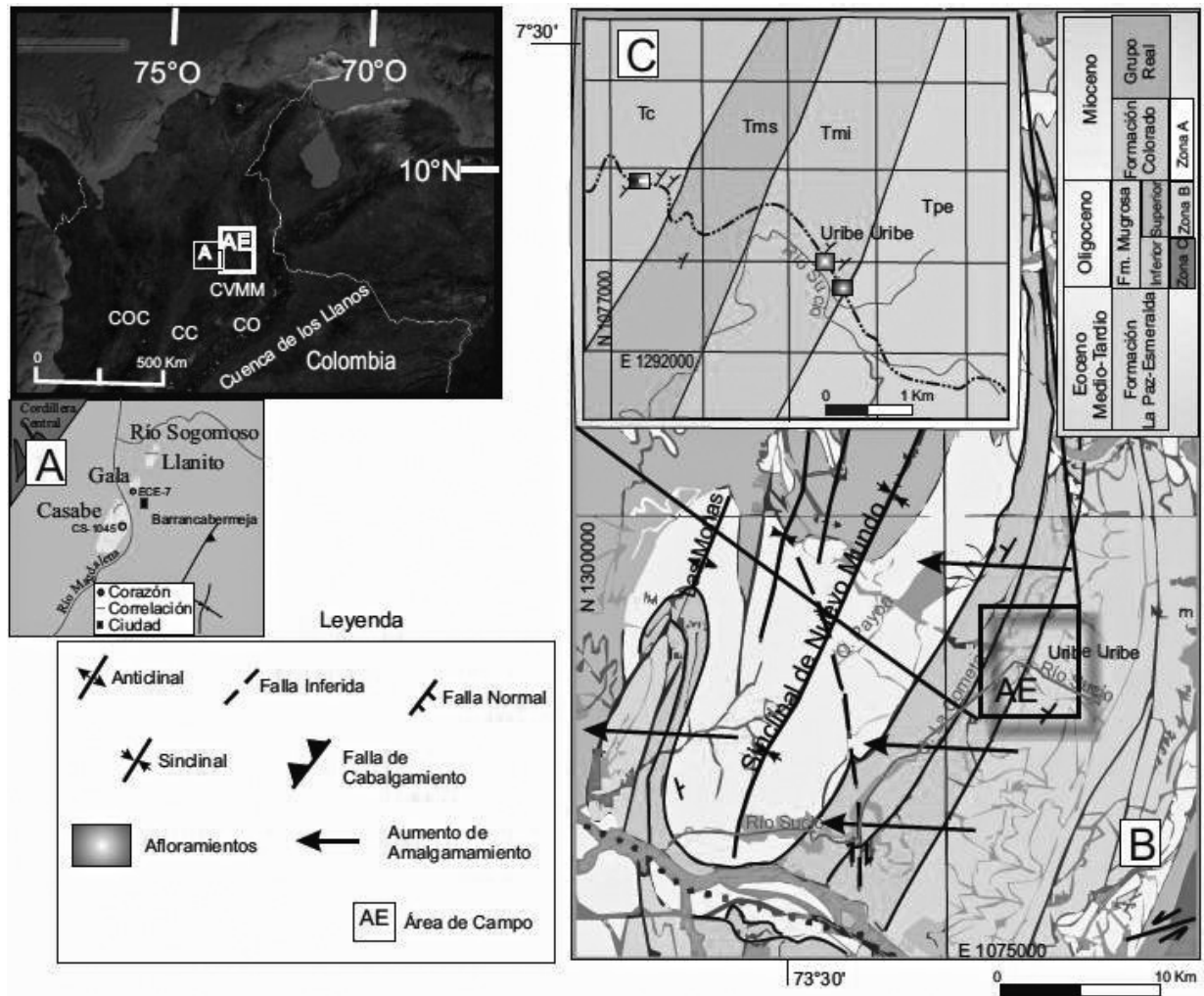


FIGURA 1. A) Mapa de ubicación de corazones y correlaciones; CC-Cordillera Central; CO-Cordillera Oriental; CO-Cordillera Occidental. B) Mapa geológico simplificado del este de la Cuenca Valle Medio del Magdalena (CVMM), las flechas muestran la dirección de aumento del amalgamamiento en el Oligoceno. C) Área de estudio donde se estudio la geometría de los canales de la Formación Mugrosa.

Los análisis sedimentológicos diferencian los depósitos de canal y los de desborde de canal, los primeros presentan migración lateral desarrollando superficies de acreción lateral y cambios relativos de dirección del flujo causando que los diferentes subambientes del sistema migren lateralmente.

Ramón y Cross, 1997, compararon el comportamiento de los registros eléctricos con núcleos de roca de unidades litológicas de ambientes fluviales, identificando e interpretando electrofacies y definiendo ciclos estratigráficos, este trabajo establece un patrón que permite guiar la interpretación de Electrofacies de la unidad en estudio.

METODOLOGÍA.

La metodología propuesta en el estudio consistió en el análisis de los perfiles eléctricos de cada pozo mediante la identificación y descripción de electrofacies, las cuales fueron posteriormente ligadas a las características distintivas de la roca con base en sus propiedades petrofísicas siguiendo los parámetros establecidos en (Selley, 1996 y Moline et al., 1994), de acuerdo a los criterios planteados por (Asquith G. y Gibson C. 1982) y (Slatt R., 2006).

El análisis litológico de núcleos de roca se realizó con una descripción a escala (Miall, 1996). En cuanto al término facies, este se refiere a las características particulares de un grupo dentro de la unidad litológica, que

permiten diferenciarlas y distinguirlas de otras unidades y capas rocosas adyacentes (IUGS, 1992) y en conjunto permite la identificación de secuencias o ciclos.

Los siguientes tipos de registros eléctricos fueron utilizados en el análisis de los 10 pozos estudiados del Campo Casabe: Gamma Ray (GR), Spontaneous Potential (SP) y Deep Induction (ILD).

En la fase de campo se realizó un reconocimiento geológico de la Formación Mugrosa, la descripción y caracterización de los lentes arenosos, datos de orientación de los estratos y el levantamiento de una columna estratigráfica compuesta en escala 1:100 en la carretera La Azufrada - Uribe Uribe - Sabana de Torres (Departamento de Santander); se tomaron 18 muestras de roca las cuales fueron debidamente localizadas en la columna estratigráfica y geográficamente utilizando GPS.

Para el análisis litológico se describieron las muestras recolectadas en campo y 121,92 m de núcleos de roca de los pozos CS-1045 y ECE-7, estableciendo litofacies de acuerdo a lo delineado por (Miall, 1996).

La integración de datos tiene el propósito de modelar la distribución espacial de capas arenosas que puede ser generada a través del análisis de cada uno de los registros eléctricos teniendo en cuenta características tales como tipo de contactos, espesores arenosos y número de intercalaciones por capa; el modelado de la variabilidad lateral se consigue mediante la correlación de las electrofacies obtenidas en cada uno de los pozos y que han tenido una calibración con base en las descripciones litológicas realizadas a núcleos de roca y muestras recolectadas en el trabajo de campo.

Se examinaron las muestras recogidas en campo con el objeto de obtener datos sobre las características petrográficas que complementaron la descripción de los núcleos y registros. Durante esta fase de interpretación se analizaron todos los datos geológicos recolectados, con el propósito de estudiar la continuidad de las arenas de la Formación Mugrosa.

RESULTADOS

Se levantaron 3 columnas estratigráficas en la vía desde el puente sobre el río Sucio del corregimiento de Uribe-Uribe hacia el municipio de Sabana de Torres, el rumbo medido de las capas varía entre N42E a N52E y buzamiento de 46NW a 56NW, los afloramientos estudiados estaban expuestos en intervalos que van

desde los 10 hasta los 16 m de largo y presentan fracturamiento predominante con rumbo N40E a N50E y buzamientos en dirección NW.

Las principales facies determinadas en los afloramientos y corazones, se calibraron con registros GR, SP e ILD para reconocer la respuesta de las litologías y diferenciar electrofacies en la Formación Mugrosa.

Descripción de Afloramientos

En la sección afloramiento (ver mapa y columna en figuras 2, 3 y 4) se identificó el contacto de las Formaciones Esmeraldas y Mugrosa sobre el río Sucio. En la Formación Esmeralda hacia el tope predominan sedimentos limo-arcillosos de coloración gris a gris claro, con delgadas intercalaciones hacia el tope de areniscas blancas, de grano medio a fino, subredondeados, de regular a buena selección y presencia de materia orgánica. Las limolitas presentan huellas de raíces y se encuentran en contacto irregular con la secuencia basal de la Formación Mugrosa. La base de esta formación consistente en capas de areniscas de grano fino a medio, de color blanco y espesor variable entre 2 y 3 metros e intercaladas con lodolitas pardas de 1 metro de espesor.

En la primera columna levantada de la Formación Mugrosa se observan superficies de acreción del canal y acuñamiento lateral de estratos, observándose más gruesos hacia el Este y con dirección de migración de canal en dirección Oeste (Afloramiento cortado por el Río Sucio, Figura 2). La segunda columna de la Formación Mugrosa que está 200 m al norte de donde desemboca la Quebrada Aguas Blancas al Río Sucio, evidencia el cambio de ambiente de deposición observándose en la sección. La base la segunda columna consiste de lodolitas relacionadas con ambientes de llanura de inundación, con intercalaciones de areniscas de grano fino, cuarzosas, pardas, acuñadas lateralmente lo cual expresaría el aumento del nivel base de los canales y su consecuente abandono (Figuras 3 y 5b). Estas areniscas exponen paleocorrientes con dirección de azimuth de 274 grados, presentan rumbo N47E y buzamiento 46NW, el fracturamiento predominante es de dirección N85E con buzamiento 31SE y se encuentran intercaladas con lodolitas negras. Se evidenciaron superficies de reactivación que se caracterizan por la presencia de intraclastos de arcilla en lentes de conglomerados con partículas con tamaños entre 2mm hasta 1cm. y lentes lodosos formados al reactivarse los canales (Figura 4 y 5a).

Las capas tienen un rumbo de N35E y un buzamiento de 47NW. En muestras de mano las rocas de la Formación Mugrosa presentan colores pardos con buena a moderada calibración, de grano medio a fino; corresponden con depósitos de canal tipo meandriforme.

Se levantó tercera columna en la base de Zona C (Figura 5c) de la Formación Mugrosa, areniscas pardas de grano medio a fino hacia la base de mala selección con conglomerados de 2mm, de matriz arenosa, en el tope se observa madrigueras rellenas de grano fino. Las areniscas de geometría tabular se encuentran intercaladas con lodolitas grises fisiles.

En la figura 5b se encuentran areniscas cuarzosas pardas de grano fino a muy finos subredondeados suprayaciendo en contacto neto e infrayaciendo unas lodolitas grises oscuras en contacto ondulado de estratificación ondulosa con paleocorrientes N274W, estas lodolitas infrayacen unas areniscas de grano fino de estratificación cruzada planar en la base. En el tope del afloramiento se observa unas lodolitas gris oscuro no fisiles con fósiles de ostrácodos según (Pemberton, 1991).

La secuencia de la Formación Mugrosa Superior presenta mejor preservación de canales de pequeña a mediana escala sedimentaria (Figura 4) y disminución de las facies de granos finos hacia arriba (arenita y lodolitas). En la secuencia de la Formación Mugrosa Inferior se observan facies de granos finos granodecrecientes hacia arriba en canales de pequeña escala (ver Gomez et al., 2005 y Ramón, 1998).

En la columna 5a se observan una serie de canales amalgamados con lodolitas grises fisiles que se acuñan, en la base se encuentra una arenisca de grano medio conglomerática de estratificación cruzada. En la base de los canales se evidencia retrabajamiento de estos ("canibalismo"), se observa intraclastos de lodos grisáceos en conglomerados con partículas de tamaños entre 2mm y 1 cm (Figura 5).



FIGURA 2. Migración de canales en la Formación Mugrosa



FIGURA 3. Areniscas cuarzosas intercaladas con lodolitas negras fisiles.



FIGURA 4. Afloramiento de la Formación Mugrosa en la carretera La Azufrada Uribe-Uribe, en la base de la Formación Mugrosa, con arenisca de color pardo intercalado con lodolitas.

Análisis de Núcleos

Se describieron dos intervalos corazonados de los pozos: ECE-7 y CS-1045 dentro del intervalo de la Formación Mugrosa, donde se enfatizó en la litología, las texturas y estructuras sedimentarias (físicas y biogénicas), la impregnación, las fracturas y el modelado de facies (Figura 6); posteriormente se calibraron los corazones con los registros de pozo; las descripciones y análisis se realizaron de base a tope de la columna y están basados en los criterios de clasificación textural, composicional y la distribución de estructuras de (Folk, 1974).

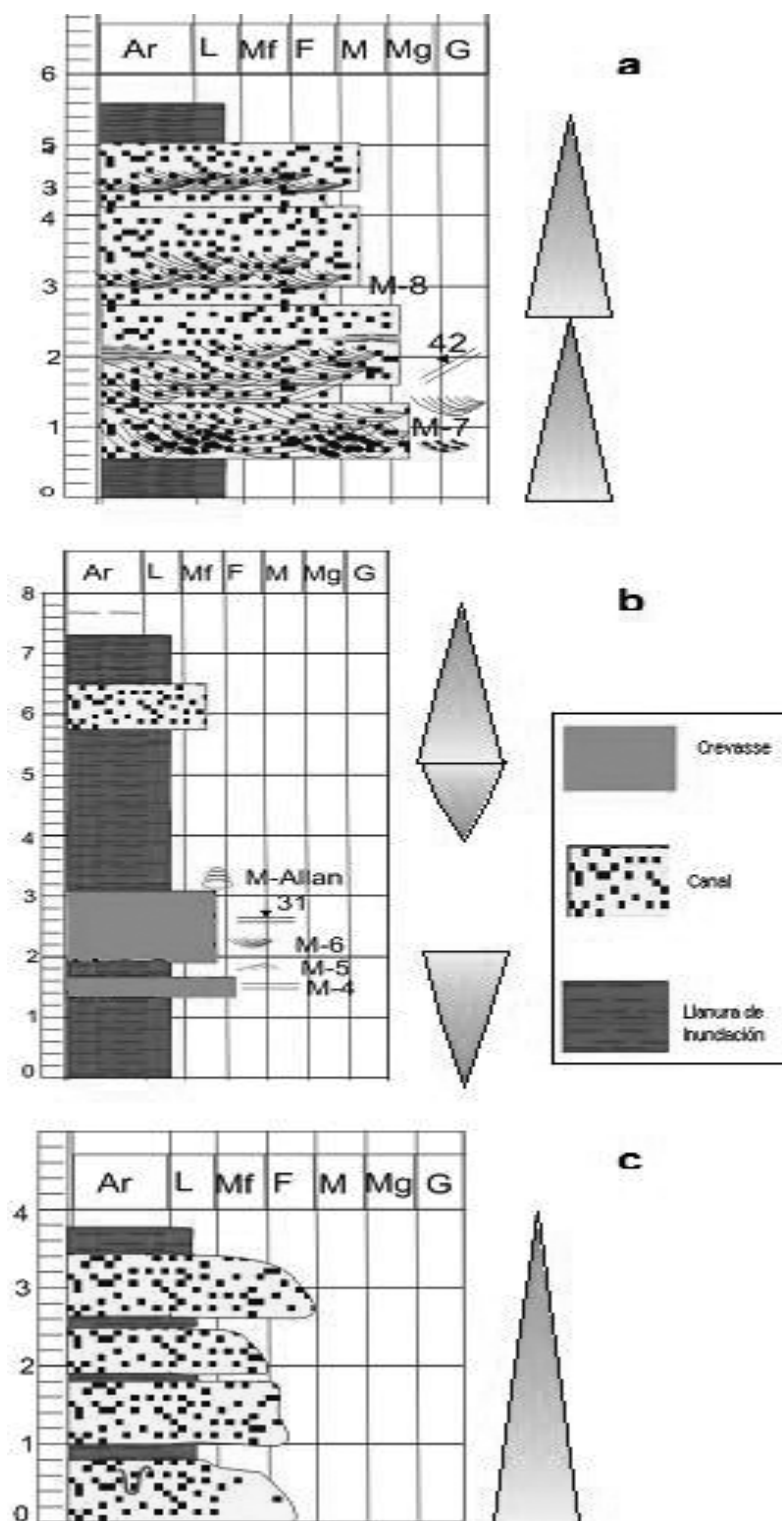


FIGURA 5. Columnas de los afloramientos de la Formación Mugrosa en la carretera La Azufrada Uribe-Uribe, en la base de la Formación Mugrosa.

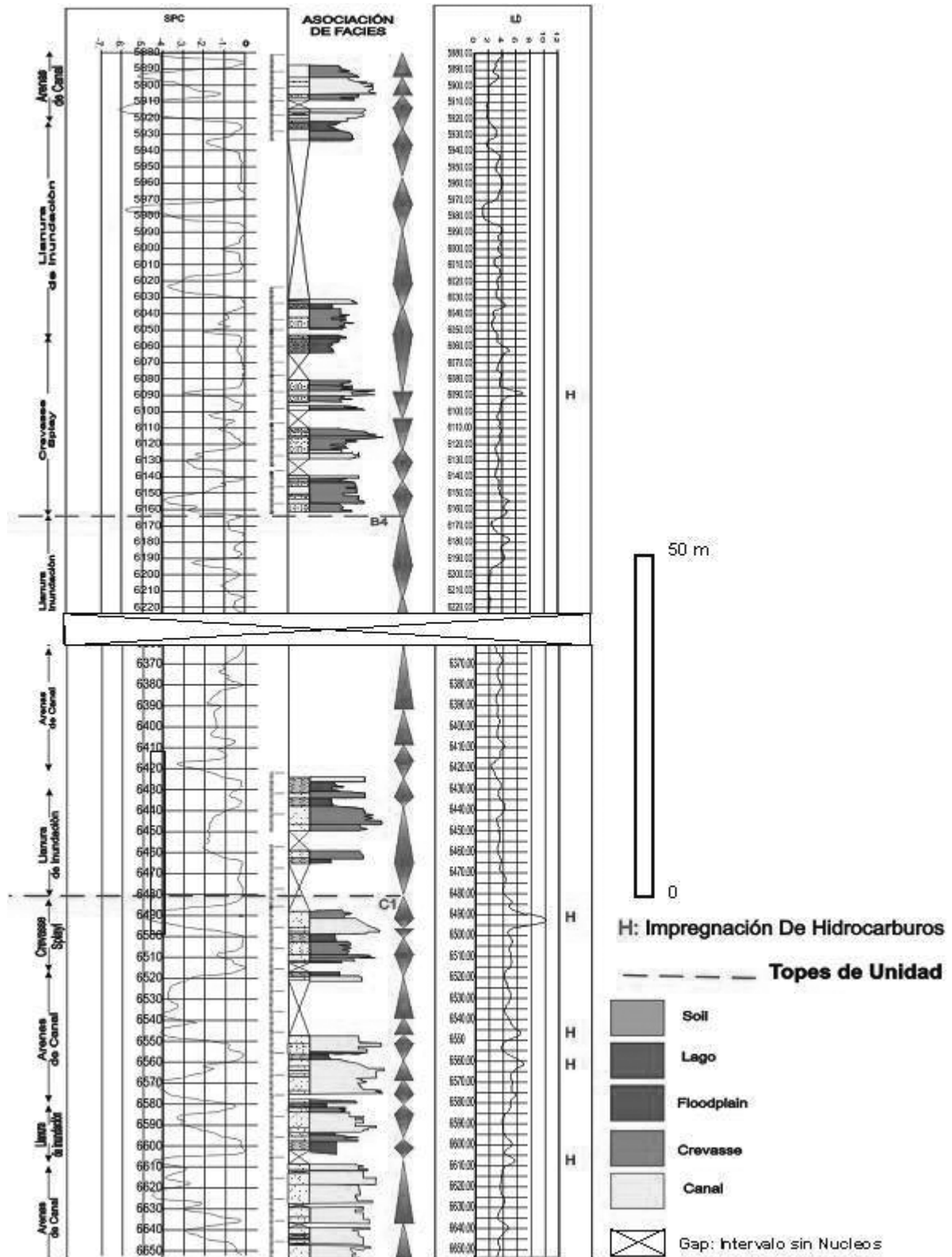


FIGURA 6. Calibración del corazón ECE-7 con registros SPC e IL. Ciclos de nivel base de pequeña escala junto con asociación de facies.

El intervalo de 6652 a 6605 pies se caracteriza por tener arenisca cuarzosa, feldespática y líticos negros, una granulometría de granos medio a fino, granos subredondeados, moderado calibrado, color gris verdoso, presencia de bioturbación, estratificación cruzada en artesas, y niveles de conglomerado; tanto en la base como en el techo de este intervalo se observan intraclastos (Figura 7).

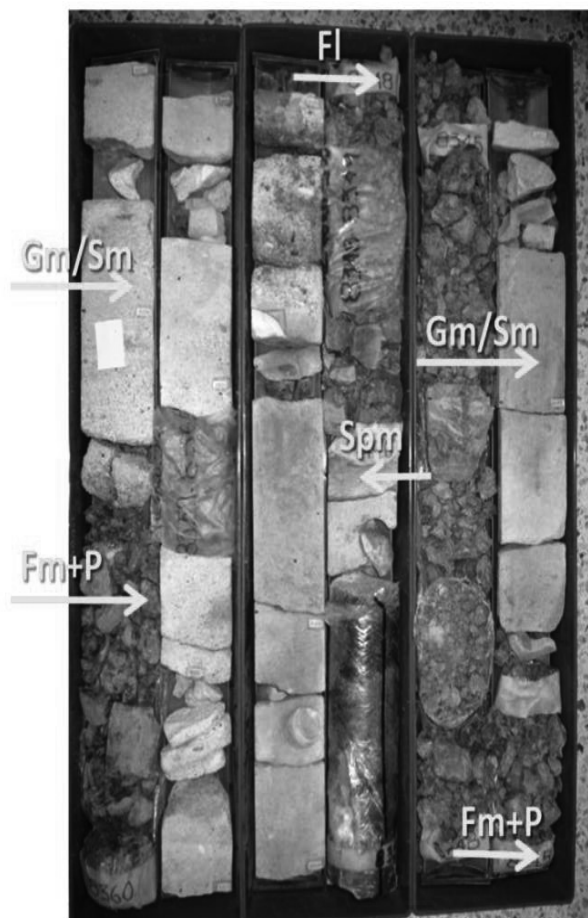


FIGURA 7. Descripción del Corazón ECE-7, y variación de sus facies.

Se observaron estructuras sedimentarias de origen orgánico como Skoyenia, Gryolithes, Rhizocorallium, paleophycus, Skolithos, madrigueras no identificadas y paleosuleos, además de estratificación cruzada en artesas, laminación ondulosa e intraclastos. En el corazón CS-1045 se analizaron 163 pies del intervalo de profundidad 4756 a 4720 pies de la Formación Mugrosa; se caracteriza por presentar areniscas cuarzosas intercaladas con lodolitas abigarradas y arenosas, se observan pocas estructuras sedimentarias por la presencia de impregnaciones, las areniscas son de matriz lodosa con moderada a mala selección (figura 8).

El intervalo de 4526 a 4458.5 pies, se caracteriza por presentar areniscas cuarzosas de mala selección y presenta entre moderada y alta impregnación, se intercalan areniscas lodosas cuarzosas de mala selección con impregnación moderada.

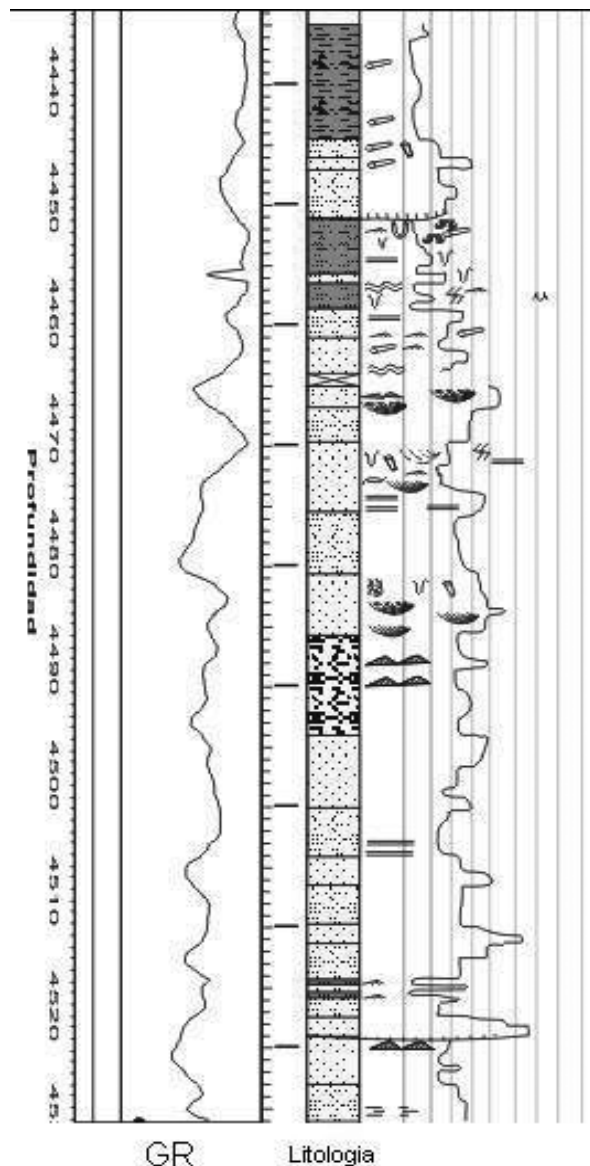


FIGURA 8. Intervalo del corazón de CS-1045 calibrado con el registro GR.

Facies, sucesión de facies y ambiente deposicional.

Para la representación de los ambientes sedimentarios específicos se organizaron las principales características litofaciales en cuanto a litología, tamaño de grano, estructuras sedimentarias de origen físico y químico, color, composición y finalmente en donde fuera posible, las biofacies y las icnofacies.

El tope de las unidades litológicas en la Formación Mugrosa es, para la Zona B, el intervalo de 5886 a 6480 ft, en el tope de esta zona predominan las arcillolitas color gris claro, gris verdoso, gris oscuro, pardo amarillo y pardo rojizo, con intercalaciones de arenisca arcillosa color gris verdoso, de grano fino a muy fino. Para la Zona C, el intervalo de 6480 a 6652 pies, se caracteriza por estar conformada de areniscas color gris claro, gris verdoso, de grano fino a medio, subredondeado, buena selección, arcillosa, ligeramente calcárea, con inclusiones de materia orgánica carbonosa, con intercalaciones arcillosas de color gris claro, pardo amarillo, parcialmente limosa y blandas. En los corazones del pozo ECE-7 se pueden encontrar las siguientes facies (Miall, 1996 y 2006):

Facies de crevasse splay: Tendencia granocreciente hacia el tope con contactos concordantes hacia la base.

Facies de llanura de inundación: Lodolitas, lodolitas arenosas, interlaminares arenosas de tonalidad gris verdosa a gris azulosa, con ondulitas, laminación plano paralela, intensamente bioturbada y grietas de desecación.

Facies de paleosuelos: Arcillolitas y limolitas varicoloreadas con paleosuelos y bioturbación no determinada.

Facies de canal: Tendencia granodecreciente hacia el tope, superficie erosiva con estratificación cruzada a gran escala y localmente planar

Facies de lago: Lodolitas gris a negra con gran contenido de materia orgánica con acumulaciones de pirita y grietas de desecación.

El intervalo 6652 ft a 5886 ft en el pozo ECE-7 y el intervalo 4744 ft a 4227 ft en el pozo CS-1045 corresponden a un ambiente fluvial meandriforme, caracterizado por una variación lateral y vertical en el que se observa los distintos depósitos y cambios de granulometría tanto crecientes como decrecientes, en algunos casos se observan cambios bruscos en la litología. La heterogeneidad vertical de la litología de los corazones es un buen criterio para la caracterización petrográfica de la zona B y C de la Formación Mugrosa. En la base de los canales se observa estructuras estratigráficas de reactivación de canal interclastos lodosos. A profundidad de 4485 ft, se observa estratificación cruzada suprayacida por trazas de paleosuelo como madrigueras.

En el intervalo de 4458.5 ft a 4435 ft se encuentran lodolitas grisáceas un alto porcentaje de trazas de paleosuelo acompañado de estratificación planar, ondulitas, icnofosiles de arenicolites, skolitos y

paleoficus, intercalado con lodolita grisácea en algunos casos fracturadas. Del intervalo 4310 ft a 4227 ft encuentra areniscas de grano fino bien calibrado con impregnación moderada.

Sucesión de facies de canal

Compuesta por areniscas de cuarzo con buena a moderada selección, granos subredondeados a veces subangulares sobre todo en la base del canal donde aparecen los conglomerados, granosoportada, estratificación cruzada planar y masiva, en algunos casos estratificación cruzada en artesa con conglomerados en el caso del intervalo 6652' a 6605', de ECE-7, en este intervalo se observan buenas impregnaciones de aceite. Las principales facies que se encontraron fueron:

- A-x (Arenisca con Estratificación Cruzada)
- A-px (Arenisca de Estratificación Cruzada Planar)
- A-ab (Arenisca de Angulo Bajo)

Sucesión de facies de llanura de inundación y crevasse splay

Las facies de llanura de inundación constituida por lodolitas, lodolitas arenosas arcillolitas lodosas verdes interlaminares arenosa abigarrada. Estas facies presentan alta bioturbación, este ambiente se observa a 6495', 6552' y 6060' de profundidad en el pozo ECE-7.

Las facies de crevasse splay está conformada por areniscas lodosas hacia la base de selección media a buena, con matriz mixta, reliptos de estratificación planar, granocreciente o granodecreciente hacia el tope y nódulos, las principales facies que se encontraron fueron:

- Fa/Fg (Limonitas abigarradas/grises)
- AL (Arenisca Lodosa)
- AL-p-r (Arenisca Lodosa con Estratificación Planar y ondulitas)
- Am (Arenisca Masiva)

Correlaciones Estratigráficas

Al comparar las correlaciones realizadas con los datos de la modificación hecha por Le Roux, J.P, 2000, de la *Corrección por Basculamiento para Paleocorrientes y Diaclasas* y los datos dados por los mapas de Arenas del Modelo Estratigráfico 2007 de Sergio Nuncira, (Ecopetrol, 2007) se observan las mismas direcciones

de paleocorreintes. Los datos de paleocorriente se utilizaron para obtener una idea como era en promedio la paleocorriente en el oligoceno inferior y al compararlo con los mapas de espesores de arena que son el promedio de los intervalos de arena en determinado horizonte. En el horizonte B1 y Fósiles de Mugrosa se presenta altas condiciones A/S que da como resultado un bajo grado de amalgamamiento y canibalismo de depósitos de canales y un incremento en la preservación en sedimentos de llanura de inundación y de crevasse splay, los depósitos de areniscas de canal tienden a encontrarse aislados envuelto por los depósitos de llanura de inundación. La figura 9 muestra que los horizontes C2, C1, B4 y B3 son los que presenta más canales amalgamados y arealmente continuos, (figura 9).

Espesores de Areniscas

Se calcularon, por métodos convencionales, el total de arenas de canal, de crevasse y de llanura de inundación por horizontes, para obtener un promedio porcentual de arenas buenas para la acumulación de hidrocarburo, intermedias y malas para transportar y almacenar el hidrocarburo. Las arenas buenas están constituidas por arenas de canal, las arenas intermedias son arenas depositadas en los crevasse splay y las arenas malas están constituidas por arenas de llanura de inundación.

CICLOS ESTRATIGRÁFICOS

La sección cruzada LL-3 de la figura 9, muestra atributos importantes del espesor de los canales amalgamados 25-50 ft (8-15 m) separados por depósitos de llanura de inundación y crevasse splay, en una variación vertical de los depósitos donde se pueden encontrar canales aislados o poca preservación de algunos depósitos como crevasse splay. Las correlaciones estratigráficas reflejan los cambios en los ciclos en el nivel base en incremento y decremento en el radio A/S. La subida y bajada del nivel base marcan cambios graduales de la sucesión de facies que se reflejan en el amalgamamiento de los canales complejos y la continuidad lateral de las areniscas de canal (Audun, 2008) (Figura 9). Las características de esos ciclos son discutidos en orden estratigráfico.

Zona C3

Es el límite inferior de la Formación Mugrosa que se encuentra en contacto con la Formación Esmeralda, tiene un espesor aproximado de 200 ft (60 m), compuesta por una sucesión de areniscas de canal con poca continuidad lateral y donde se preservan las facies de crevasse y llanura de inundación, con espesores de depósitos de canal de 10 a 15 ft (3-5 m).

Zona C2

Tiene un espesor cerca de 400 ft (122 m), este intervalo está dominado por depósitos de areniscas de canal amalgamados, con poca preservación de depósitos de crevasse y depósitos de llanura de inundación. En la base de esta zona hay mayor continuidad lateral de las facies de canal y hacia el tope hay una disminución de los canales amalgamados.

Zona C1 y B3

La zona C1 tiene un espesor aproximado de 200 ft (61 m) formado en su mayoría por depósitos de canal, canales amalgamados y continuidad lateral de las areniscas de canal, con poca preservación de facies de crevasse. Con canales amalgamados de espesor de 20-50 ft (6-15 m).

Zona B3

La zona B3 tiene un espesor cerca de 350 ft (107 m), este intervalo está dominado por depósitos de areniscas de canal amalgamados y depósitos de llanura de inundación, con poca preservación de depósitos de crevasse. En la base de esta zona hay poca continuidad lateral de las facies de canal y asía el tope hay un aumento de los canales amalgamados.

Zona B2 y B1

La zona B2 tiene un espesor aproximado de 300 ft (91 m) y B1 100 ft (30,5 m), hay una conservación de todos los tipos de depósitos, canales aislados por depósitos de crevasse splay y llanura de inundación, con poca continuidad lateral y canales amalgamados.

Fósiles de Mugrosa

Fósiles de Mugrosa tiene un espesor aproximado de 180 ft (55 m), en el tope de zona se encuentran los fósiles de mugrosa que marcan el límite superior de la formación y se usa como datum estratigráfico en las correlaciones. Se caracteriza por tener canales aislados donde se conservan todas las facies de canal. El espesor de los canales es de 6 a 10 ft (2-3 m) de espesor (Figura 9).

DISCUSIÓN

Tomando en cuenta las correlaciones de las areniscas de facies de canal se infiere la importancia en la continuidad de los mismos, su conexión y relación de espacio de acomodación versus suministro de sedimento (A/S) de la Formación Mugrosa en el Campo Llanito y Casabe (Figura 9 a 11). Con base en la sucesión de facies y relación A/S se determinaron zonas de canales que son amalgamados y canales aislados que sugieren caída y subida del nivel base.

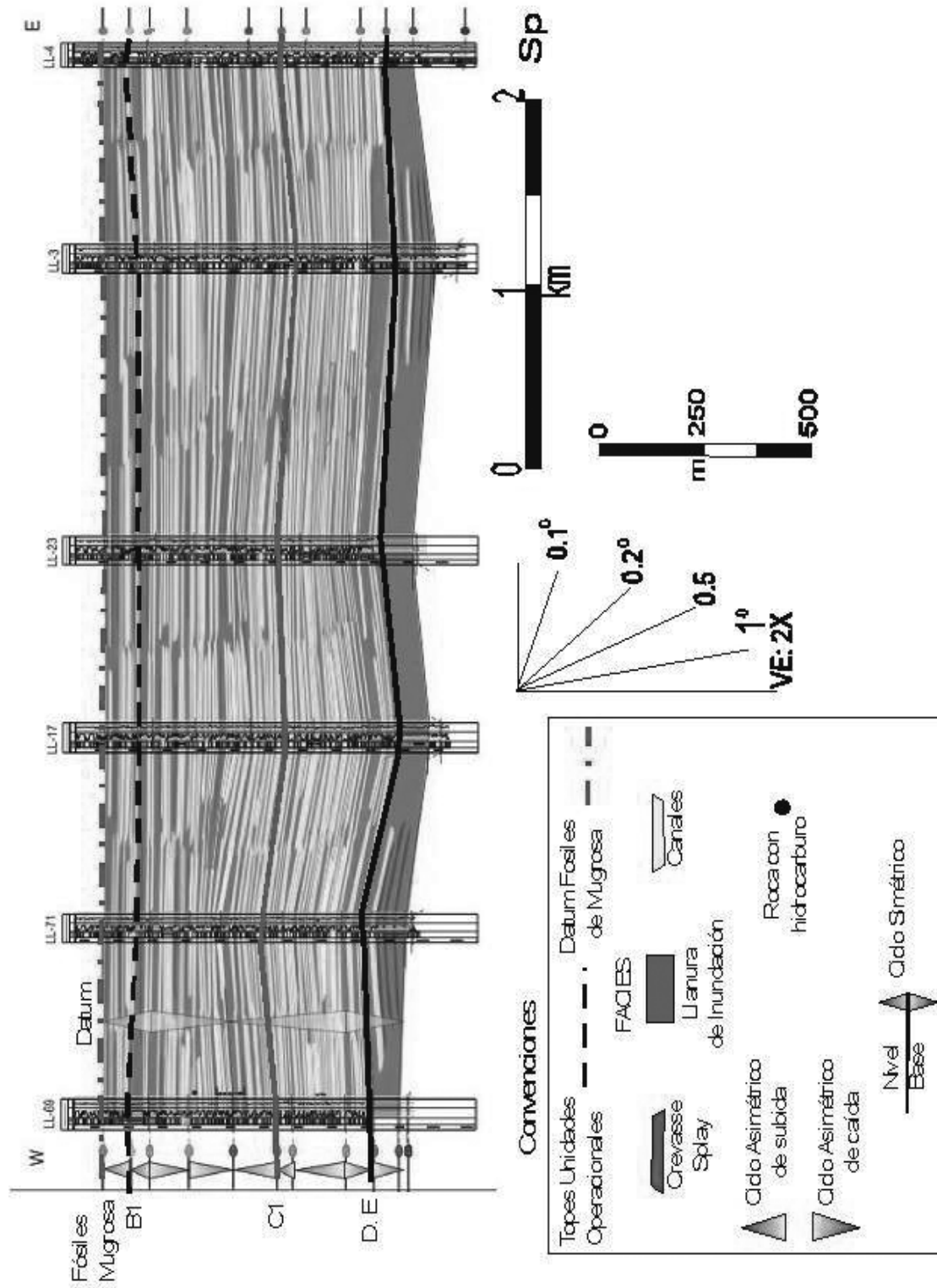


FIGURA 9. Correlaciones LL=3, ciclos de nivel base de escala intermedia y gran escala. Influencia de depósitos de canal, crevasse splay y llanura de inundación.

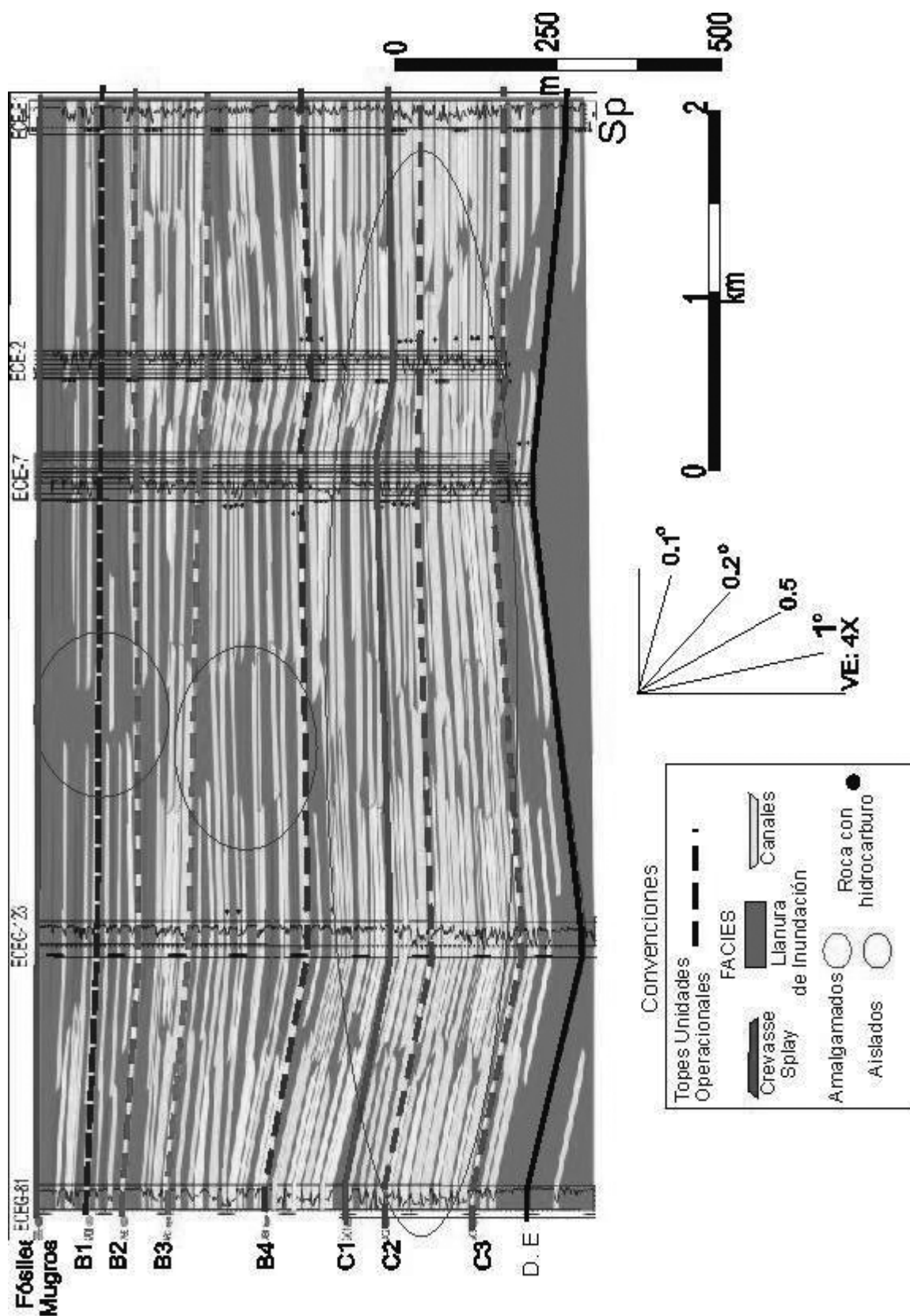


FIGURA 10. ECE-7 en el Campo Llanito, Formación Mugrosa. Ubicación de Canales amalgamados y canales aislados.

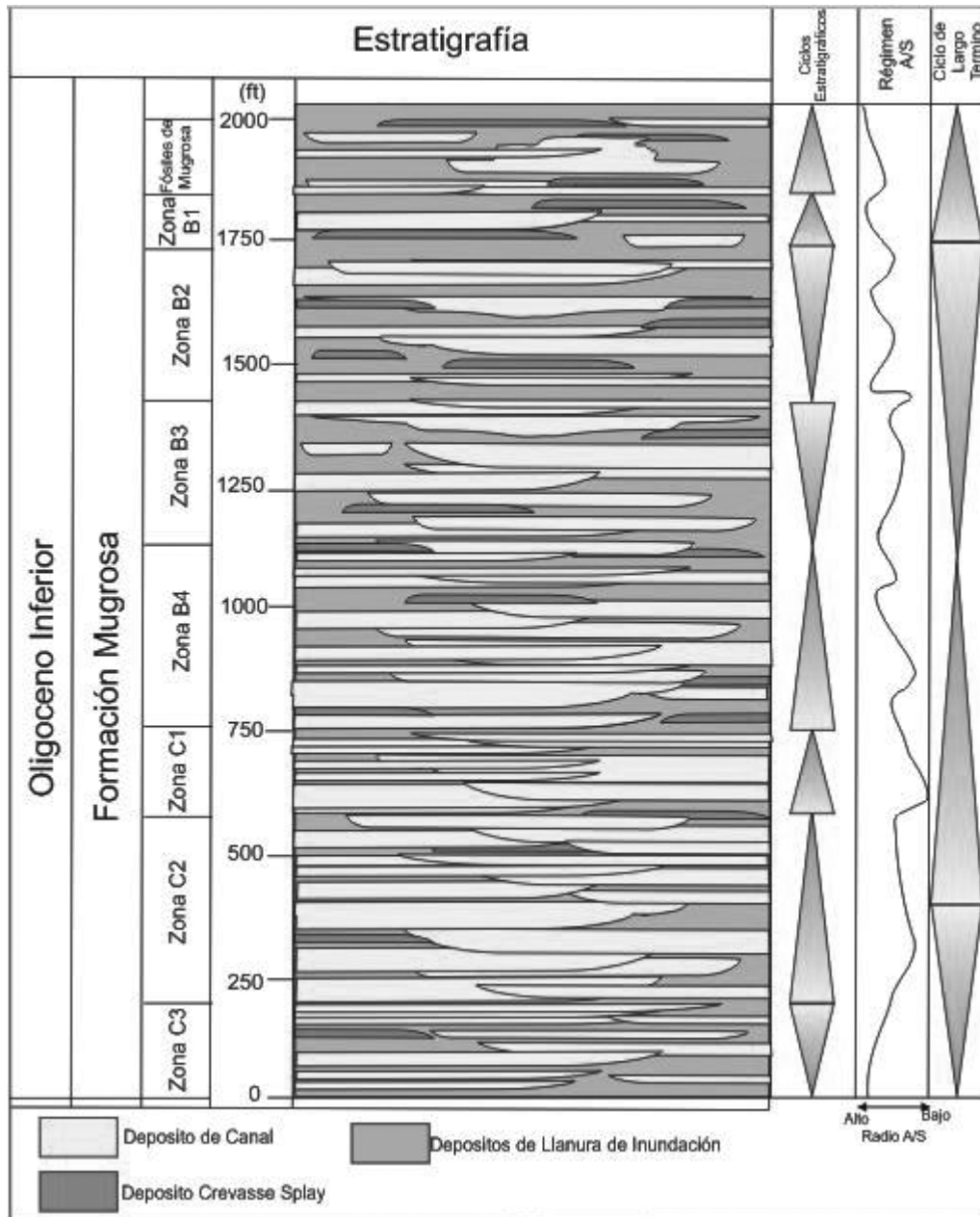


FIGURA 11. Ilustración del desarrollo estratigráfico a larga escala de la Formación Mugrosa, que incluyen depósitos fluviales y cambios de espacio de acomodación y suministro de sedimento (A/S), se observa que el espesor de los depósitos de canales decrece en el tope de la formación.

La unidad operacional C superior y B inferior presenta más canales amalgamados y continuidad lateral de los canales con base a las correlaciones de las electrofacies y descripción de corazones de ECE-7 y CS-1045, entre la subunidades operacionales B4 y B3 se presenta un máximo de inundación donde se encuentran canales aislados y una mayor aparición de facies de areniscas de llanura de inundación y lodolitas de llanura de inundación.

Lo anterior sugiere un ligero levantamiento tectónico al principio del oligoceno (Formación Mugrosa) que disminuyó el espacio de acomodación e intervino en que hubieran más canales amalgamados. Después una nueva variación tectónica fue aumentando el espacio de acomodación hasta llegar a un máximo de inundación donde se encuentra canales lateralmente menos continuos.

CONCLUSIONES

Los canales de la zona C tienen una mayor continuidad debido al amalgamamiento de los mismos, conformada en gran parte por facies de canal y de llanura de inundación, la zona B a nivel general esta conformada en su mayoría por facies de crevasse splay y de llanura de inundación.

El análisis de ciclos estratigráficos es una metodología que permite establecer zonas de alta relación espacio de acomodación y suministro de sedimento (A/S) que presentan un mayor contenido de ambientes de crevasse splay y de llanura de inundación, mientras zonas de baja relación A/S presenta más ambientes de canal y amalgamamiento. Los canales amalgamados correspondientes a una baja relación A/S están compuestos principalmente de facies de estratificación cruzada, areniscas conglomeráticas y areniscas masivas, las cuales son facies que ocupan la base del canal.

En areniscas de canal de alta relación A/S se preservan más la totalidad de las facies, sobre todo en canales aislados en contacto por depósitos de llanura de inundación y crevasse splay. Los horizontes C2 y B4 presentan canales con espesores adecuados para el entrapamiento y una historia de producción de hidrocarburo.

La constante deformación de la Cordillera Oriental durante el Eoceno medio y el Oligoceno tardío (Gomez et al., 2005), generaron desplazamientos continuos de las paleocorrientes y cambios de direcciones, que iban suministrando sedimento mientras se generaba espacio de acomodación. Con el análisis de las diferentes facies de la Formación Mugrosa, VMM, ubicadas en afloramientos y corazones se puede observar como las variaciones del nivel base puede formar en un mismo tiempo estratigráfico diferentes depósitos, que cambian desde su tamaño de grano y selección, hasta contenido de materia orgánica. La continuidad lateral de estas facies crean conexiones de canales que debido al gran suministro de sedimento permite extenderse cientos de metros (Ecopetrol, 2003), la continuidad de estos canales son visibles en los espesores medidos en los corazones y en las huellas que dejaron en los afloramientos la superposición de los mismos canales.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto hace parte del Convenio 005 de la Unidad de Investigación del Instituto Colombiano del Petróleo

y el Grupo de Investigación en Estratigrafía de la Universidad Industrial de Santander, dentro del programa de investigaciones que apoya campos maduros.

El autor agradece de forma especial al Instituto Colombiano del Petróleo por financiar este trabajo, al Grupo de Investigación en Estratigrafía por la oportunidad de realizar el proyecto de grado; a los geólogos Alberto Ortiz, Germán Meza, Juan Diego Colegial, Hernán Madero y Jenny Rueda, y las personas que de una u otra manera contribuyeron para poder llevar a cabo este estudio.

REFERENCIAS

Allen. Jr. L. 1980. Sand waves a model of origin and internal structures. *Sedimentary Geology*, 26: 281-328.

Asquith, G. y Gibson, C. 1983. Basic Well Log Analysis for Geologist. *Methods in explorations series*. The American Association of petroleum Geologist (AAPG). Tulsa. Oklahoma, US. 105 p.

Audun, V.K. 2008. Architecture and stratigraphy of alluvial deposits, Morrison Formation (Upper Jurassic), Utah. *AAPG Bulletin*, 92(8): 1055-1076.

Clavijo, J. y Royero G., J.M. 2001. Mapa geológico Generalizado Departamento de Santander. Memoria explicativa.

Cooper M.A., y Addison F.T. 1995. Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, *AAPG Bulletin*, 79(10): 1421-1443.

Ecopetrol. 1998. Evaluación de la secuencia terciaria del Valle Medio del Magdalena. Informe final elaborado por Olaya, I., y Fajardo, A. Vicepresidencia Adjunta de Exploración. Gerencia de Estudios Regionales: ICP. División de Exploración y Producción. Área Estratigrafía; Piedecuesta.

Ecopetrol. 2001. Caracterización Sedimentológica – Estratigráfica del Campo Llanito - Gala. Informe elaborado por Ortiz, A. División de Exploración y Producción Litoteca Nacional Estratigrafía. ICP, Piedecuesta.

Ecopetrol, 2003. Estudio integrado de yacimientos: Campo Llanito- Gala. División de Exploración y Producción. Área Estratigrafía.

- Ecopetrol. 2007. Estudio integrado de yacimientos: Campo Llanito- Gala. División de Exploración y Producción. Área Estratigrafía.
- Folk, R.L. 1974. Petrology of sedimentary rocks, Hemphill Publications Co., Austin Texas, 182 p.
- Galloway, D.K. y Hobday. 1996. Terrigenous Clastic Depositional Systems. Springer, Texas, pp. 60-90.
- Gomez, E., Jordan, T. y Allmendinger, R. 2005. Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern Middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes, GSA Bulletin, 117(5): 547-569.
- Le Roux, J. P. y S. Elgueta. 2000. Sedimentologic development of a late Oligocene-Miocene forearc embayment, Valdivia basin complex, southern Chile: Sedimentary Geology, 130: 27-44
- Madero, H., Rueda, J.P., Ortiz, A., y Colegial, J.D. 2010. Análisis Estratigráfico para las arenas de la Formación Mugrosa en área piloto del Campo Llanito. Boletín de Geología, 32(1): 27-44.
- Miall, A. 1996. The Geology of the Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin analysis and Petroleum Geology: Berlin, Springer-Verlag, pp. 1-582.
- Miall, A. 2006. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: A reality check. AAPG Bulletin, 90(7): 989-1002.
- Nie J., Horton B., Mora A. Saylor J., Housh, Rubiano J., y Naranjo J. 2010. Tracking exhumation of Andean ranges bounding the Middle Magdalena Valley Basin, Colombia, The Geological Society of America, 38(5): 451-454.
- Pemberton, S. 1991. Ichnological Concepts and Selected Core Studies. Vol. 2, Trace Fossil.
- Pindell, J. et al en Hans G. Avé Lallemant, Virginia Baker Sisson (Editores). 2005. Caribbean-South American plate interactions, Venezuela. Special paper 394. The Geological Society of American. Boulder. Colorado. USA.
- Ramon, J. y Cross, T. 1997. Characterization and prediction reservoir architecture and petrophysical properties in fluvial channel sandstones, Middle Magdalena Basin, Colombia. CT&F, 1(3): 19-46.
- Ramon, J. 1998. Sequence stratigraphic framework of Tertiary strata and oil geochemical evaluation, Middle Magdalena Basin, Colombia (tesis Ph.D.): Golden Colorado, Colorado School of Mines, 270 p.
- IUGS, 1992, International Stratigraphic Guide: A Guide to Stratigraphic Classification, Terminology, and Procedure, Editor Salvador Amos, 2º Edición, 16.
- Santacruz, R. Ecopetrol. 2004. Informe Geológico Campo Llanito - Gala. Actualización Del modelo Geológico Campo Llanito Gala. Líder Yacimientos – GRM.

Trabajo recibido: Junio 4 de 2010

Trabajo aceptado: Noviembre 25 de 2010