

## Sequential stratigraphy of the Guajira Lower Sub-basin

Luis Antonio Castillo-López <sup>a</sup> & Thais de Souza Kazmierczack <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Geociencias, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil. [luiscastillo@ufam.edu.br](mailto:luiscastillo@ufam.edu.br)

<sup>b</sup> Hocol, Bogotá, Colombia, [thais.desouza@hocol.com.co](mailto:thais.desouza@hocol.com.co)

Received: October 4<sup>th</sup>, 2018. Received in revised form: September 16<sup>th</sup>, 2019. Accepted: October 18<sup>th</sup>, 2019.

### Abstract

Sequence stratigraphy comprise one useful and solid tool for understanding stratigraphy historical of the rocks in subsurface. Based on staking patterns identified on well logs at southeast of the area, it is possible to interpret progradation, retrogradation trends, and their bounding surfaces, which are also interpreted on the seismic lines. Then, with petrophysical analyses populate sequences of interest into tectonostratigraphic model. The Lower Guajira Sub-Basin comprises a huge depocenter of stacking rocks from Cretaceous and Cenozoic age. The results show three depositional sequences, involving seven system tracts. Considering ages reported for some depth intervals, it is possible the interpretation based on Wheeler domain, getting depositional, erosion and non-depositional stages.

**Keywords:** sequence stratigraphy; Guajira; tectonostratigraphy.

## Estratigrafía secuencial de la Sub-cuenca de la Baja Guajira

### Resumen

La estratigrafía de secuencias se constituye en una herramienta sólida y útil para el entendimiento y disposición de la historia estratigráfica de las rocas en el subsuelo. A partir de la identificación de patrones de apilamiento de datos geológicos o geofísicos (registros de pozo y datos sísmicos). Así, junto a análisis petrofísicos, localizados al sureste de la Guajira se interpretan la geometría y tendencias sedimentares, de los diferentes paquetes de roca dispuestos en el subsuelo. La Sub-cuenca de La Baja Guajira, constituye un gran depocentro, con secuencias de sedimentos apilados con edad Cretácica y Cenozoica. Como resultado de este estudio se interpretaron tres secuencias deposicionales que incluyen siete tratos de sistema, y considerando la información de los pozos se reportan algunas edades para diferentes intervalos de profundidad, a partir de la cual se construye un diagrama de Wheeler, donde se establecen periodos de depositación junto con intervalos de erosión, sufridos en la cuenca.

**Palabras clave:** estratigrafía de secuencias; Guajira; tectonoestratigrafía.

### 1. Introduction

La Cuenca de la Guajira se divide en las Sub-Cuencas de la Alta y la Baja Guajira [1], la cual se encuentra limitada por las Falla de Cuiza al norte y la Falla de Oca al sur. La transtensión a lo largo de estos sistemas de fallas es la responsable de la formación de depocentros [2], donde son depositadas espesas secuencias sedimentarias Cretácicas y Cenozoicas. La Baja Guajira es considerada una cuenca inexplorada, donde los campos gasíferos encontrados (Chuchupa, Ballena y Riohacha), constituyen tres descubrimientos de gas importantes [3], representando así, un

área de interés dentro de la industria petrolera. Así, se busca tener un mayor conocimiento de la zona en general, para lo cual se plantea un modelo estratigráfico, abordado desde la perspectiva de la estratigrafía secuencial, como herramienta que determina la disposición espacio temporal de las rocas en el subsuelo, especialmente en la exploración de hidrocarburos, donde cambios de facies verticales y laterales pueden ser formulados con la construcción de dichos modelos [4].

En este trabajo se toman como referencia principal conceptos estratigráficos actuales [4], para la definición y determinación de superficies claves (superficie de inundación



Figura 1. Área de estudio y distribución de datos disponibles: Líneas sísmicas y registros de pozo.  
Fuente: Los Autores.

inundación máxima, *sim*; discordancias e inundación), Tratos de Sistema a partir del reconocimiento de patrones de apilamiento específicos. Estos Tratos de Sistema definen, “unidades estratigráficas relacionadas genéticamente [5], que incorporan estratos depositados dentro de un sistema de dispersión sincrónico”, los cuales pueden ser asignados a una posición particular en la curva del nivel base en la línea de costa. Como complemento, es importante la determinación de superficies estratigráficas que marcan cambios a través del tiempo en los regímenes deposicionales, creadas por la interacción entre el nivel base y la sedimentación.

### 1.1. Área de estudio e información

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sureste de la Península de la Guajira, en cercanías al área de Maicao (Fig 1). Hace parte de Sub-Cuenca de la Baja Guajira [6]. cuyos límites están constituidos por el sistema de fallas de Cuiza al norte, la Falla de Oca al sur, el Mar Caribe al Oeste y el Golfo de Venezuela al Este [7].

La información consiste en datos de superficie y de subsuelo. Datos de superficie incluyen la cartografía geológica, muestreo geoquímico, mientras las de subsuelo: líneas sísmicas, gravimetría, pozos con su conjunto de registros eléctricos (GR, SP, R, Ø). Además, se cuenta con reportes internos, tesis, artículos publicados.

Se contó con un levantamiento sísmica 2D, adquirido al sureste Guajira, en cercanías al municipio de Maicao. La información sísmica corresponde a 13 líneas migradas In-In (con filtros y escalares).

Estudios de superficie presentan cartografías con depósitos Neógenos, y a lo mucho Cretácicos en la sección más norte de la Alta Guajira. Por ello se hace necesario considerar los datos de pozos y sísmica, para establecer un modelo del subsuelo con mayor alcance. A partir de ello el modelo estratigráfico, basado en los datos, independiente de la interpretación secuencial.

La Subcuenca de la Alta Guajira se caracteriza, hacia la base por presentar secuencias tectonoestratigráficas (tipo Rift), y secuencias deposicionales hacia la parte superior (Fig. 2). La Subcuenca de la Baja Guajira, foco de este estudio, comprende secuencias deposicionales (cuatro secuencias deposicionales: secuencias 1 al 4), se evidencian cambios eustáticos y de influencia tectónica en el sector sur de la Cuenca.

## 2. Geología

La configuración estratigráfica y estructural de la Cuenca de la Guajira está influenciada por el desplazamiento lateral de la Placa Caribe a lo largo del margen norte de la Placa de Suramérica, generando grandes fallas de rumbo que controlan el área. La Falla de Cuiza, junto con la Falla de Oca son unos de los rasgos estructurales más sobresalientes del área. Estas son fallas de rumbo dextrales, cuyo movimiento ha generado el levantamiento y deformación de diferentes bloques [2].

El relevo del sistema de fallas Oca-Cuiza se cree es el responsable de la formación de la Sub-Cuenca de la Baja Guajira dentro de un ambiente trans tensional [2]. Las formaciones

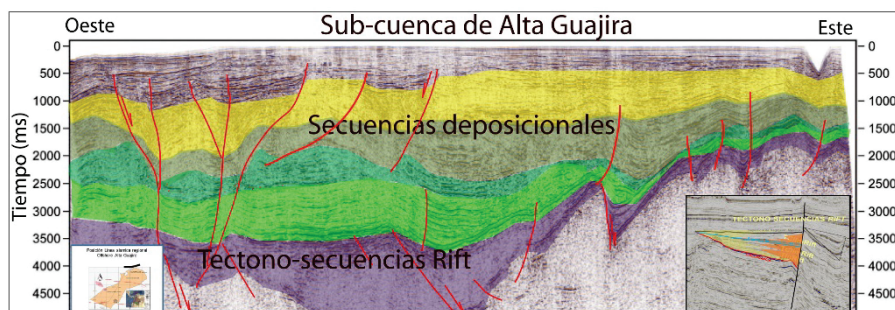


Figura 2. Secuencias y tectono-secuencias rift en la Cuenca de la Guajira (sector de la Alta Guajira).  
Fuente: Los Autores.

presentes en esta área van desde el Jurásico inferior hasta el Reciente, y fueron depositadas en ambientes tanto marino como continental. El basamento pre-Mesozoico se encuentra expuesto al Noroeste de la sub-cuenca, junto con rocas triásicas y jurásicas [7]. El sector occidental de la sub-cuenca, y el sector de la Guajira costa afuera comparten características geológicas y de producción similares, a diferencia del sector oriental que se compara más fácilmente con el Golfo de Maracaibo y sus condiciones geológicas [3].

En la sub-cuenca de la Baja Guajira la sucesión estratigráfica se sintetiza de la siguiente forma [8]: el basamento constituido principalmente por un cinturón de rocas máficas y ultramáficas con dirección este-oeste (74 MA con K-Ar [8]; rocas metamórficas en facies esquisto verde y anfibolita de edad cretácica [9], presentes en la región costa afuera de la cuenca, y un cinturón de granitos con tendencia noreste hacia la zona costera y la Sierra Nevada de Santa Marta. Discordantemente, sobre el basamento, se encuentra una sucesión de rocas cretácicas no diferenciadas, reportada en los pozos Guaitapa-1 y Los Manantiales-1. Litológicamente la unidad se compone de lodolitas con intercalaciones de areniscas y calizas depositadas en ambientes de plataforma en el sector del pozo Los Manantiales-1 [3], alcanzando 2270 pies de profundidad y 2036 pies en el pozo Guaitapa-1, con edad reportada de Maastrichtiano temprano a tardío con base datos bioestratigráficos [10]. La secuencia estratigráfica continúa con la Formación Uitpa que consiste en areniscas intercaladas con shales y calizas biomicríticas, de edad Mioceno temprano, según datos bioestratigráficos en diferentes pozos. La Formación Jimol consiste de biomicritas y esparitas depositadas en un ambiente de plataforma. La Formación Castilletes se compone de arcillolitas, limolitas y areniscas depositadas en un ambiente de plataforma interior a exterior [11], cuya bioestratigrafía reporta una edad de Mioceno tardío a Plioceno [3].

La Cuenca de la Guajira ha sufrido varios eventos de deformación importantes; el primero correspondiente a un proceso de apertura “Rifting” en el Eoceno tardío que generó medio grabens “Half-grabens” en el norte de la región, seguido por transtensión en el Oligoceno que produjo cuencas extensionales; transtensión durante el Mioceno temprano y medio, y un último evento asociado al levantamiento de los Andes durante el Mioceno tardío -

Plioceno temprano, paralelo al relleno de las cuencas sedimentarias. [12].

Estructuralmente, la sub-cuenca de la Baja Guajira se comporta como un medio graben limitado al norte y sur por las fallas de Cuiza y Oca, respectivamente. Los esfuerzos tectónicos en el sector de la Guajira están por lo general localizados en las zonas aledañas a tales fallas y se relacionan con los movimientos transcurrentes de las mismas. [12].

### 3. Sismoestratigrafía

Para el control de calidad de los registros (archivos “.las”) disponibles para cada uno de los 3 pozos (Well-1, Well-2, Well-3), se editaron (“merge” y “splice”), para unir los segmentos, con el fin de obtener una curva única, con la mayor longitud de registro. A pesar de tener datos sísmicos con el mismo procesamiento post-apilado, con filtros y escalares adicionales, estos no presentan un buen amarre. Por ello se hizo una re-edición, amarre y correlación con los registros de pozo. Para hacer el amarre de los pozos a la sísmica, se emplearon registros de chequeo para dos de los pozos, y se realizó una interpolación con el pozo que no se tenía información de velocidades (Fig. 3).

Los registros para la interpretación constituyen el combo básico: Potencial Espontaneo (SP), no todos los pozos contaban con registros Gamma Ray (GR) o estos estaban incompletos. Ya una vez cargados los pozos a la plataforma, mediante el análisis, usando la metodología de karogodin [13], se identificaron los patrones de apilamiento (agradación,

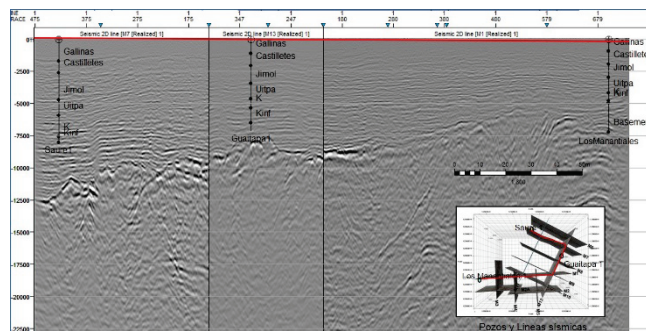


Figura 3. Amarre de pozos y la sísmica para el sector este de la Baja Guajira.  
Fuente: Los Autores.



progradación, retrogradación), para poder definir las principales superficies estratigráficas (Superficies de Inundación, superficies de máxima inundación y superficies discordantes).

Acorde a los registros de pozo, se continúa con la interpretación de los diferentes horizontes en las líneas sísmicas (Figs. 4 y 5), asociados a las superficies estratigráficas interpretadas. Los patrones de apilamiento identificados en el pozo Well-1, se observa, de base a tope las siguientes tendencias:

- Granocreciente en el intervalo de 7200 a 6300 pies (Cretácico superior).

- Granodecreciente de 6300 a 4800 pies (Cretácico superior).
- Granocreciente de 4800 a 4200 pies (Mioceno medio).
- Granodecreciente de 4200 a 3800 pies
- Granocreciente de 3800 a 2600 pies
- Granodecreciente de 2600 a 1000 pies.
- Constante de 1000 a 0 pies de profundidad (para los dos últimos intervalos la edad probable reportada es Plioceno superior a Pleistoceno).

A partir de los patrones de apilamiento observados se definen las secuencias deposicionales, con un total de siete Tratos de Sistema en la sección estudiada, limitados por diferentes superficies estratigráficas (Fig. 6):

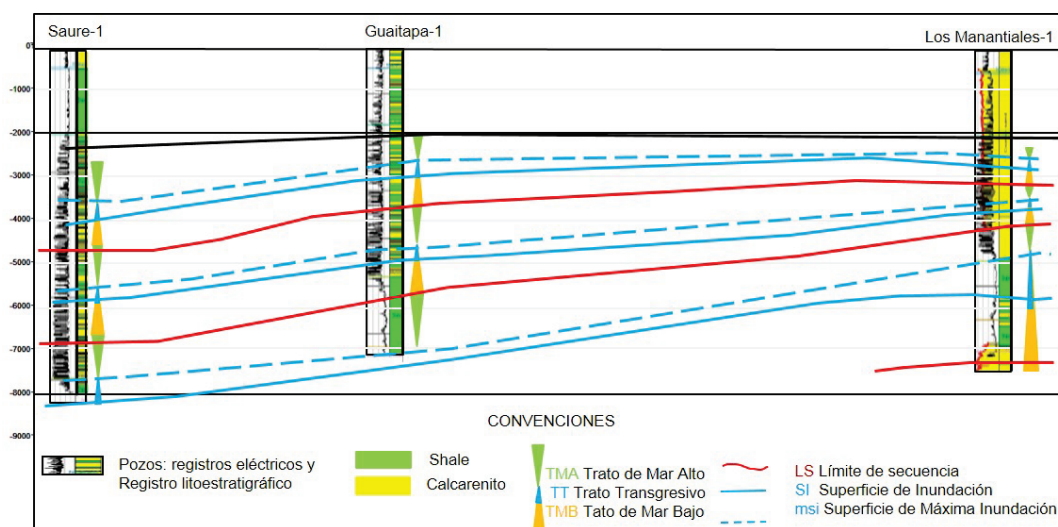


Figura 4. Correlación secuencial de registros de pozos para el sector este de la Baja Guajira.

Fuente: Los Autores.

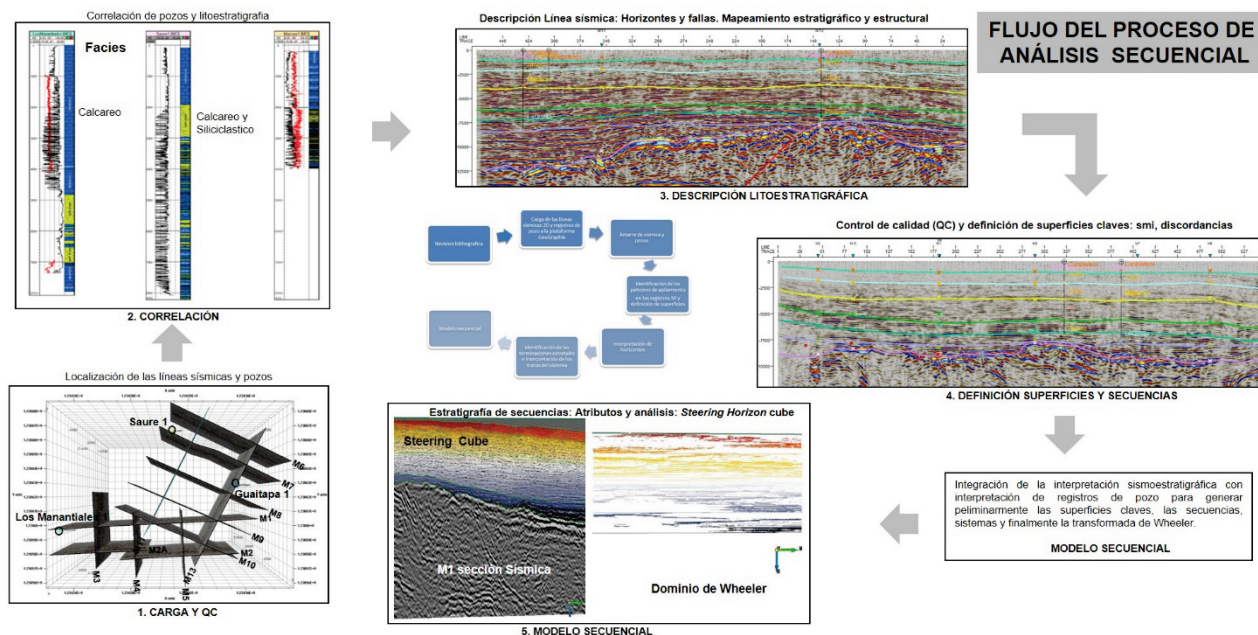


Figura 5. Síntesis de la metodología empleada para la construcción del modelo secuencial.

Fuente: Los Autores



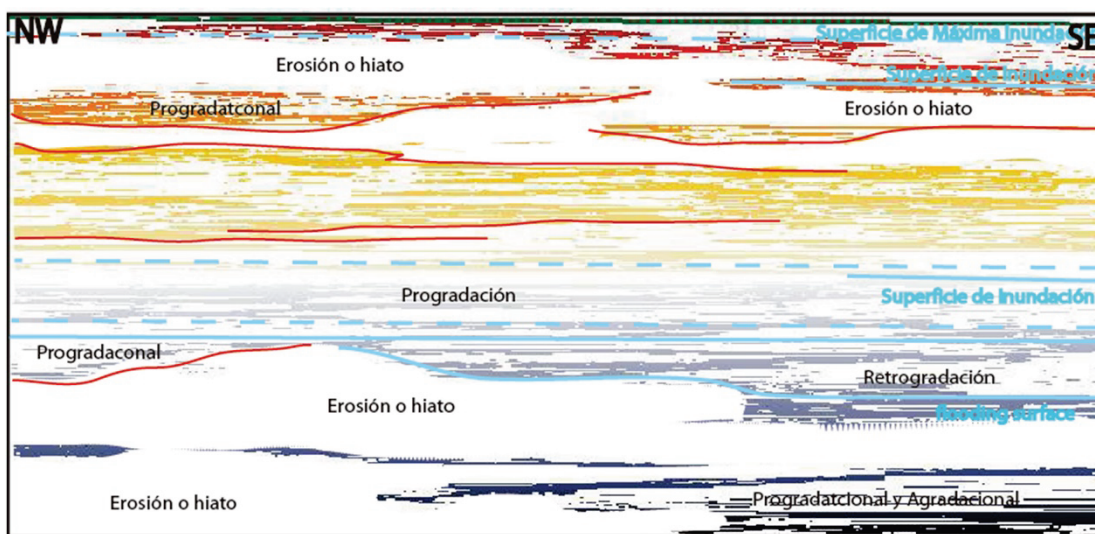


Figura 6. Disposición espacio temporal de los paquetes deposicionales e hiatos (diastemas o discordancias), a partir del diagrama de Wheeler [14]. Fuente: Los Autores.

- 1) TMB: cuyo límite inferior es una superficie discordante sobre el basamento, identificada en el registro SP a 7200 pies de profundidad. En este punto la sucesión comienza a ser progradante, depositada probablemente durante una etapa temprana de aumento en el nivel base, donde la tasa de sedimentación ( $S$ ) es mayor que el espacio de acomodación ( $A$ ) que se está generando ( $A/S < 1$ ). El límite superior corresponde a una Superficie de Inundación (SI 1).
- 2) TT: tiene como límite inferior la SI 1. Como se infiere del registro SP, aquí la sucesión es retrogradante, se interpreta entonces un trato transgresivo, lo cual indica, que la secuencia fue depositada durante un aumento en el nivel de base en el que la tasa de acomodación sobrepasa a la tasa de sedimentación ( $A/S > 1$ ). En el tope de la sucesión se observa una clara discordancia en la sección sísmica que se manifiesta como un fuerte contraste litológico en el registro SP.
- 3) TMB: el límite inferior corresponde a una fuerte discordancia, donde se marca el inicio de una tendencia granocreciente y finaliza con una SI.
- 4) TT: se identifica en el registro como una corta tendencia granodecreciente que culmina con una SMI.
- 5) TMA: sucesión progradante, es interpretada como un Trato de Mar Alto, lo cual indica que la sucesión fue depositada en la etapa final de subida de nivel base donde la tasa de acomodación cae sobre la tasa de deposición ( $A/S < 1$ ).
- 6) TMB: a su base una superficie discordante que, aunque en el registro no es muy evidente es diferenciable en la sísmica y reportada en la literatura. Además, se evidencia la presencia de canales con sus rellenos respectivos.
- 7) TT: inicia con una SI y es identificado en el registro por un decrecimiento en la granulometría. Finaliza con una SMI.

Posteriormente, se identifican las terminaciones estratales observando la geometría de los reflectores en las líneas sísmicas. Una vez definidas todas las superficies, se definen los tratos del sistema para construir el modelo secuencial (Fig. 5).

#### 4. Análisis e integración

Debido a la baja calidad de las líneas sísmicas se dificultó la definición de los horizontes, los cuales se trazaron con incertidumbre en algunas de las líneas sísmicas. Para la interpretación final del modelo se empleó la línea 01, dispuesta E-W, amarrada a profundidad con el pozo Well-1, presentando una estructura general del área.

Mediante las superficies estratigráficas interpretadas es posible construir un diagrama de Wheeler (Fig. 6) con rangos de edades estimativos, a partir de las edades reportadas en las descripciones del pozo Well-1 halladas en la bibliografía. Como resultado se obtiene una sección cronoestratigráfica en la que se reconstruyen los periodos de deposición de las diferentes secuencias junto con los intervalos de erosión y no deposición (Fig. 7).

De esta manera, se interpreta un primer hiato, desde 136 Ma hasta 83 Ma aproximadamente (Valanginiano-Campaniano), representado por la discordancia al tope del basamento. Lo anterior, posiblemente indica que durante este lapso esta localidad de la Cuenca Guajira estuvo emergida, dando lugar a una etapa de erosión o no deposición.

Posteriormente se interpreta un periodo de deposición de alrededor de 10 Ma entre el Santoniano y Campaniano, seguido por un segundo hiato mucho más corto, que aumenta hacia el SW de la sección, probablemente porque la deformación en la zona genera un paleoalto sobre el cual van terminando los estratos. Seguido se presenta un periodo de depósito, que tiene como base una SI lo que implica el ingreso del mar en esta zona hace aproximadamente 74 Ma.

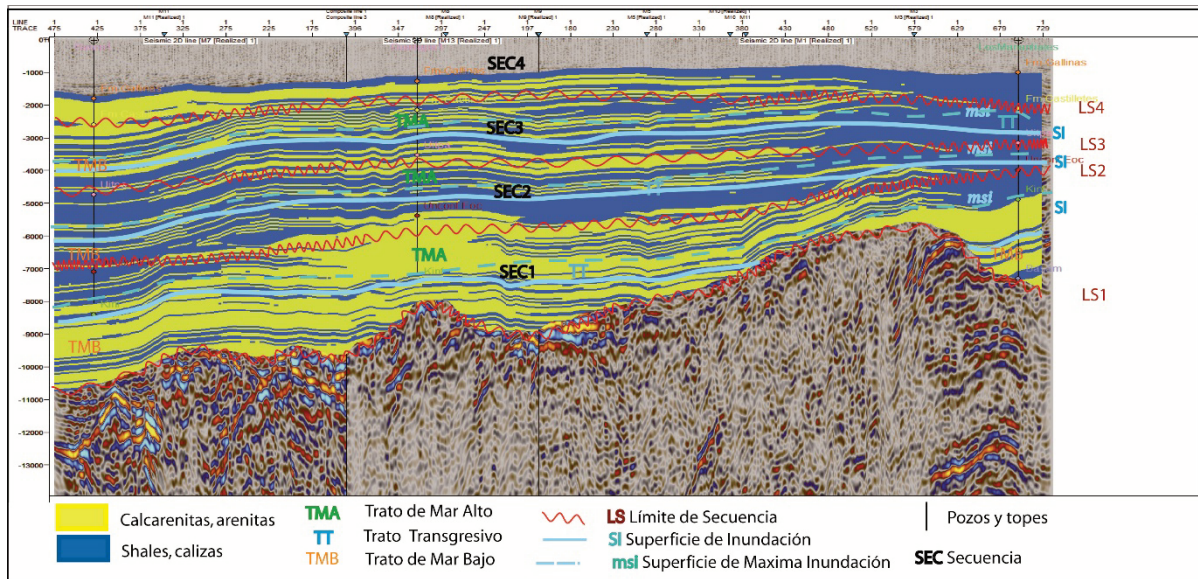


Figura 7. Definición de las secuencias deposicionales, resultado de la integración de la interpretación de pozos y la sismoestratigrafía.  
Fuente: Los Autores.

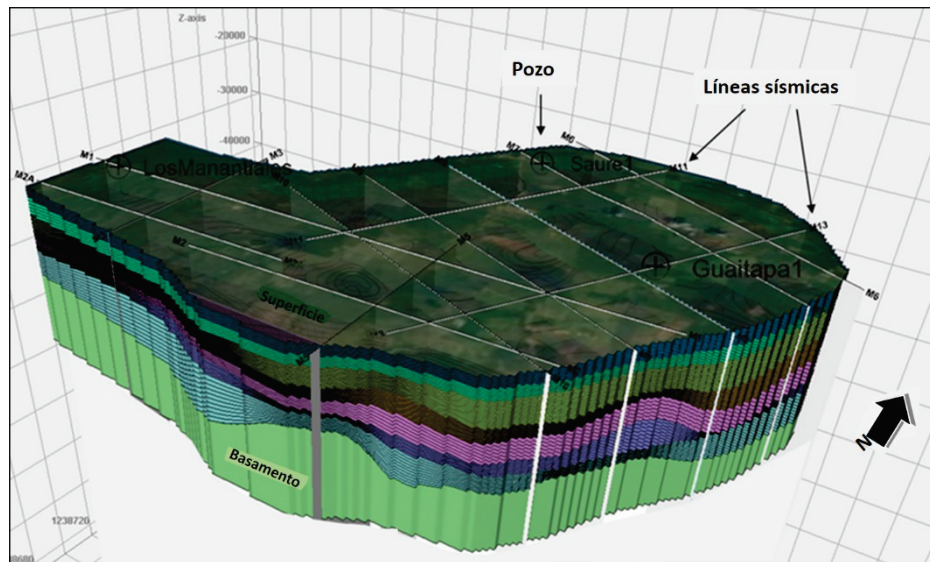


Figura 8. Modelo tridimensional con la definición de las secuencias deposicionales, resultante de la integración de la interpretación de pozos y la sismoestratigrafía.

Fuente: Los Autores

La discordancia principal y más evidente tanto en la sección sísmica como en el registro SP es la que representa un hiato de 50 Ma a partir de la parte alta del Maastrichtiano (~66 Ma), indicando un largo periodo de erosión y no deposición, cuya finalización en el Mioceno medio (~16 Ma) está posiblemente asociada a un cambio del régimen tectónico debido al levantamiento Andino. Desde este momento, el registro estratigráfico es solo interrumpido en dos breves periodos durante el Mioceno.

Basados en los datos sísmicos y de pozo, considerando las superficies claves, la estratigrafía y la estructural, se obtuvo un modelo tridimensional (Fig. 8).

## 5. Conclusiones y recomendaciones

La Cuenca de la Guajira comprende dos dominios estratigráficos, especialmente en el sector norte: secuencias tectonoestratigráficas y deposicionales. Esos dominios cambian para un dominio en el sector este de la subcuenca de la baja Guajira, donde solo se manifiestan secuencias deposicionales, con presencia de al menos cuatro secuencias deposicionales. Esto no incluye toda la subcuenca.

Las secuencias de la Cuenca de la Guajira están constituidas predominantemente por sedimentos siliciclásticos y carbonáticos, que con pocos datos de pozo permiten establecer un sistema petrolífero asociado a

secuencias estratigráficas y sus tratos de sistemas, estableciendo como sellos HST, LWSST y el TST como reservorio, especialmente para las secuencias superiores.

El desarrollo de secuencias esta relacionado a subsidencia y tectónica con secuencias de segundo orden. Definiendo un modelo final, según el marco estratigráfico y estructural conducido por los datos y el modelo, independiente de la estratigrafía de secuencias.

Dadas las características geológicas del área estudiada, datos de pozo y sísmicos permiten comprender la configuración estructural de la sub-cuenca, y así mismo entender mejor la evolución geológica de la misma. Los modelamientos de la cuenca evidencian que las rocas de la baja Guajira son termalmente inmaduras. Por ello se sugiere un análisis del sector costa afuera de la cuenca (conocida como Depresión Tayrona), construyendo un modelo secuencial en este sector que permita predecir el comportamiento tanto lateral como vertical de las posibles rocas generadoras, reservorio y sello.

Es recomendable adicionar al modelo más datos, tanto de superficie como de subsuelo. Esto lleva consigo a un mejor y mayor detalle en la identificación de rasgos estratigráficos, útiles para la geofísica y la geología.

La tendencia de la sedimentación de la sub-cuenca de la baja Guajira es alta hacia el oeste, con depocentros mayores y dominados hacia la base, caracterizados por arenitas gruesas a medio, algunas veces mezclado con carbonatos.

En términos exploratorios, la secuencia 1 es la que mejor dispone de un posible sistema petrolífero, con el TT como sello y el TMB como reservorio, esto considerando una roca fuente, venida del sector norte, hacia el sur.

Estudios estratigráficos deben ser considerados y extendidos, ya que constituyen una herramienta sólida para conocimiento y disposición espacial y temporal de las rocas en el subsuelo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a dGB Earth Sciences, permitiendo el uso de opendetect v6.4, cuyos módulos permitieron llevar a cabo los procesos de interpretación, correlación y modelamiento estratigráfico y secuencial, especialmente del dominio de Wheeler. Además agradecer a los revisores y editores, por su soporte y sugerencias para la mejoría del artículo.

## Referencias

- [1] ANH. Evolución térmica de la Subcuenca de la Baja Guajira, 2008.
- [2] ANH. Catálogo Open Round Tipo 2, 2010.
- [3] ANH. Petroleum geology of Colombia, Guajira and Cayos Basins, Vol. 8, 2011.
- [4] Catuneanu, O., Principles of sequence stratigraphy. Elsevier, Amsterdam, 2006, 375 P.
- [5] Catuneanu, O., Galloway, W., Kendall, C., Mial, A., Posamentier, H., Strasser, A. and Tucker, M., Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. Newsletters on Stratigraphy, Stuttgart, 44(3), pp. 173-245, 2011.
- [6] Garcia, M., Mier, R. y Cruz, G., Reconstrucción de la historia paleotermal de la Subcuenca de la Baja Guajira, Colombia. Boletín

- Geol., [en línea]. 32(2), pp. 55-71. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-02832010000200004&ing=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832010000200004&ing=en&nrm=iso). ISSN 0120-0283.
- [7] Garcia, M., Mier, R. y Cruz, G., Geoquímica de hidrocarburos de la Subcuenca Baja Guajira, Colombia, Boletín de Geología. 33(2), pp. 55-57, 2011.
- [8] Cardona, A., Weber, M., Wilson, R., Cordani, U., Muñoz, C.M. y Paniagua, F., Evolución tectono-magmática de las rocas máficas ultramáficas del Cabo de La Vela y el Stock de Parashi, Península de La Guajira: registro de la evolución orogénica Cretácica-Eocena del norte de Suramérica y el Caribe. En: XI Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Agosto 14-17, 2007.
- [9] Mc Donald, W., Geology of the Serranía de Macuira area Guajira Peninsula, Colombia: PhD. dissertation, Princeton University, Nueva Jersey, USA, 1964.
- [10] Rubio, C., Correa, P., Suarez R., Rendon, L., Vargas, L. y Moreno, O., Potencial estratigráfico sector Carioca (Cuenca Baja Guajira) – Nuevo enfoque exploratorio en Colombia, en: International Congress of Conventional Hydrocarbon Resources, ACGGP. Cartagena, Colombia, 2008.
- [11] Cerón, J.F., Kellogg, J.N. and Ojeda, G.Y., Basement configuration of the northwestern South America–Caribbean margin from recent geophysical data. Ciencia, Tecnología y Futuro 3, pp. 25-49, 2007.
- [12] Vence, E., Subsurface structure, stratigraphy, and regional tectonic controls of the Guajira margin of northern Colombia, MSc. Thesis, Austin, Texas, USA, 2008, 128 P.
- [13] Karogodin, Ю.Н., Седиментационная Цикличность. 242с, 1975.
- [14] dGB Earth sciences, Opendtect: sequence stratigraphy interpretation, SSI, 2020.

**L.A. Castillo-López**, es Geólogo de la Universidad Nacional de Colombia, MSc. en Geofísica de la UFPa, Brasil y PhD en Estratigrafía de la UFRGS, Brasil. Labora en el área de geología, geofísica y petróleo como consultor y asesor para empresas de petróleo y gas. Además en el área académica fue docente e investigador de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesor visitante del curso de posgrado en geología, Departamento de Geociencias de la UFAM - Universidade Federal do Amazonas, Brasil. Las áreas de interés incluyen simulación, modelamiento, evaluación petrolera, interpretación sísmica, estratigrafía de secuencias y uso de herramientas y técnicas modernas de interpretación.  
ORCID: 0000-0003-4872-3219

**T. de Souza-Kazmierczak**, es Geóloga, MSc. en Estratigrafía de secuencias de la Universidad Federal de Río Grande del Sul - UFRGS, Porto Alegre, Brasil. Se encuentra cursando el doctorado en geociencias en la Universidad Nacional de Colombia. Se desempeña como geóloga senior en Hocol-Colombia. Tiene vasta experiencia como integradora de datos geofísicos, geológicos y estratigrafía de secuencias para la exploración y producción de gas y petróleo en cuencas Colombianas, Brasileñas entre otras.  
ORCID: 0000-0002-9069-942X