

Análisis sismoestratigráfico y definición de litotipos a partir de interpretación sísmica 2D y registros eléctricos de pozos en la secuencia cretácica, en la zona de plataforma de la cuenca de los Llanos Orientales, Colombia

Seismic-stratigraphic analysis and definition of lithotypes from 2D seismic interpretation and electrical wells logs in the Cretaceous sequence, in the platform area of the Llanos Orientales basin, Colombia

Juan Collazos ^{a,b}; Directora Julisa Torres ^{a,b}; Codirector Chajid Kairuz; Codirector Ruben Arismendy

^a Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona, Colombia. E-mail: geologia@unipamplona.edu.co

^b Departamento de Física y Geología, Universidad de Pamplona, Colombia.

Recibido: Marzo 1, 2021

Resumen

Durante los últimos 15 años, se tenía un conocimiento geológico limitado de la cuenca Llanos, basado en la premisa, que las unidades Cretácicas solo representaban una importancia económica en las áreas cercanas a la zona del piedemonte, por lo tanto, la mayoría de investigaciones en la zona de plataforma se realizaban enfocadas en las rocas terciarias, dejando de lado la posibilidad de estudiar las Formaciones Guadalupe, Gacheta y Une.

Con la finalidad de aportar al conocimiento geológico de la secuencia Cretácica de Llanos, se desarrolló un análisis sismoestratigráfico y definición de litotipos, basado en el estudio de registros eléctricos de 4 pozos, interpretación geológica de 10 secciones sísmicas 2D, correlación de la información en tiempo y profundidad, por medio de sismogramas sintéticos y obtención de mapas estructurales en tiempo al tope de las formaciones interpretadas.

Se identificaron y caracterizaron 3 formaciones litoestratigráficas; la Formación Une, demarcando la primera secuencia sísmica del Cenomaniano, está conformada por una sucesión muy gruesa de intervalos de areniscas e infrayace a la Formación Gacheta, esta unidad demarca la segunda secuencia sísmica del Campaniano, se conforma de paquetes muy gruesos de arcillolitas y limolitas fósiles e infrayace a la Formación Guadalupe, esta unidad demarca la tercera secuencia sísmica constituida por intervalos potentes de areniscas. Por último, se observó que la secuencia cretácica se configura como un homoclinal con fallas normales sintéticas y antitéticas, buzando y aumentando levemente su espesor hacia el occidente de forma coincidiendo con el depocentro de la cuenca.

Palabras clave: Sismoestratigrafía; Cretácico; Sísmica; Llanos

Abstract

During the last 15 years, there was limited geological knowledge of the Llanos basin, based on the premise that the Cretaceous units only represented an economic importance in the areas close to the piedmont area, therefore, the majority of investigations in The platform area was focused on the tertiary rocks, leaving aside the possibility of studying the Guadalupe, Gacheta and Une Formations.

In order to contribute to the geological knowledge of the Llanos Cretaceous sequence, a seismo-stratigraphic analysis and definition of lithotypes was developed, based on the study of electrical logs from 4 wells, geological interpretation of 10 2D seismic sections, correlation of information in time and depth, by means of synthetic seismograms and obtaining structural maps in time at the top of the interpreted formations.

Three (3) lithostratigraphic formations were identified and characterized; The Une Formation, demarcating the first Cenomanian seismic sequence, is made up of a very thick succession of sandstone intervals and underlies the Gacheta Formation, this unit demarcates the second seismic sequence of the Campanian, it is made up of very thick bundles of claystones and fissile siltstones and underlies the Guadalupe Formation, this unit demarcates the third seismic sequence made up of powerful sandstone intervals. Finally, it was observed that the Cretaceous sequence is configured as a homocline with normal synthetic and antithetical faults, dipping and slightly increasing its thickness towards the west, coinciding with the depocenter of the basin.

Keywords: Seismic-Stratigraphy; Cretaceous; Seismic; Llanos

1 Introducción

La historia de investigación en la cuenca Llanos inicia en la década de los 40. Los primeros trabajos que sentaron las bases de muchos análisis, fueron los estudios geológicos, realizados por Kendall, *et al*, (1); Etayo–Serna, (2) y

Mc.Court, *et al*, (3). A partir de estos trabajos, y gracias a la disponibilidad creciente de información de pozos y sísmica, se profundizaron los estudios regionales de evolución tectónica y conformación de la cuenca. Sin embargo, los estudios regionales integrados de sismo-estratigrafía, se concentran mayormente en las formaciones Terciarias como

la Formación Carbonera y Mirador que son los reservorios principales de la cuenca, dejando rezagado el avance de investigaciones enfocadas en el Cretácico.

Las formaciones Cretácicas son un objetivo importante en la industria petrolera por el hecho de que las mayores rocas generadoras fueron depositadas en este tiempo geológico. Es por eso que numerosos trabajos se concentraron en la reconstrucción paleogeográfica para entender la distribución de estas sucesiones, sin embargo, los estudios regionales integrados de sismo-estratigrafía, geoquímica y petrofísica como los de Cooper, (4); Reyes, (5); Fajardo, *et al.*, (6) y Bayona, *et al.*, (7); son escasos y rara vez integrados entre ellos, por lo tanto, resulta de especial interés aportar un valor agregado a la secuencia Cretácica de Llanos, a partir del desarrollo de esta investigación, la cual tiene como objetivo realizar un análisis sismoestratigráfico de la secuencia Cretácica de la zona de plataforma de la cuenca Llanos, en el sector NE del departamento de Casanare, mediante la identificación y caracterización de los litotipos presentes en las formaciones a través del análisis de los registros eléctricos de 4 pozos, así mismo, reconocer las secuencias y facies sísmicas de la secuencia Cretácica a partir de la interpretación geológica de 10 líneas sísmicas 2D, para poder llegar finalmente a, relacionar y analizar las litofacies con la información de estratigrafía sísmica mediante la obtención de sismogramas sintéticos y mapas estructurales.

A partir de esto se pretende generar nuevo conocimiento geológico que complemente la limitada información académica que se tiene sobre las formaciones Cretácicas de los Llanos, específicamente en la zona de plataforma, así mismo para que los análisis y resultados puedan ser tomados en cuenta en estudios posteriores de exploración de hidrocarburos.

2 Marco geológico

La cuenca de los Llanos Orientales cubre 225,603 km² (8), ubicándose entre el cinturón orogénico de la Cordillera Oriental por medio del sistema de fallas regional de Guaicaramo al Oeste y el cratón Guyanés al Este. Al Norte limita con la frontera venezolana y al sur con la Serranía de la Macarena / Arco De Vaupés a partir de donde empieza la cuenca del Caguán - Putumayo. Se divide en dos provincias estructurales: 1. el piedemonte y 2. parte oriental: zona de plataforma. El actual estudio se concentró en la segunda, caracterizada por su poca deformación relativa al fallamiento normal y procesos gravitacionales. Los campos más importantes de esta zona son Caño Limón, Rubiales, Quifa y Castilla, además, esta zona se caracteriza por presentar una alta tasa de acumulación e importantes zonas de subsidencias relacionadas a la morfología flexural de la cuenca (9) en un sistema de antepaís (7,4,10,11).

Los Llanos Orientales son el resultado de varios eventos tectónicos complejos que hacen de esta, una cuenca poli-histórica (ver Figura 1). Su desarrollo empezó asociado a un margen pasivo del escudo Guyanés durante el Precámbrico - Cámbrico, luego como respuesta a la fragmentación del

supercontinente Pangea con la separación del Norte y Suramérica en el Triásico – Jurásico (12,13,14,15,16) actuó como una cuenca extensional de rift.

En el Cretácico, con el inicio de la subducción en el margen pacífico, evolucionó como una mega-cuenca tras arco (cuenca compuesta por el Valle del Magdalena, la Cordillera Oriental y los Llanos). Durante esta última fase, la sedimentación corresponde a un ambiente marino poco profundo de plataforma hasta el Maastrichtiano Temprano cuando la mega-cuenca, empezó su somerización por la acreción de la Cordillera Occidental (4,17).

Finalmente, con el levantamiento de la Cordillera Central en el Cretácico Superior-Paleoceno, la inversión de la Cordillera Oriental, a partir del Eoceno Tardío y luego con la colisión del Arco de Panamá en el Mioceno (18,19) esta cuenca evolucionó en varios pulsos con una dinámica de antepaís, que continúa activa actualmente. En general la estructura de la cuenca se traduce en un homoclinal extensivo de inmersión al oeste con fallas normales. En el departamento del Casanare, se caracteriza por una delgada sección sedimentaria paleozoica, que se espesa hacia el oeste y dos familias de fallas normales (de tendencia N-S y ENE-WSW), que afectan a toda la sección sedimentaria.

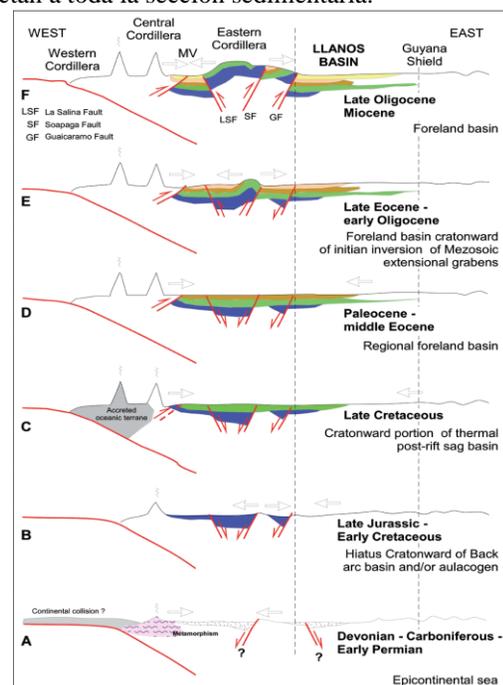


Figura 1. Modelo Evolutivo de la Cuenca de los Llanos Orientales.
Fuente: ANH, (20); Modificado de Horton, et al, 2010 (21).

2.1 Secuencia Cretácica en la Cuenca Llanos

En la cuenca de los Llanos Orientales, el registro Triásico-Cretácico Inferior está ausente, salvo en unos depocentros locales. La sucesión Cretácica Superior se conforma de la Formación Une, la Formación Gachetá y la Formación Guadalupe, que se describen a continuación. Esta secuencia se depositó a lo largo de una mega cuenca compuesta de la cuenca del Magdalena, Cordillera Oriental y Llanos (4,22,23).

2.1.1 Formación Une (Cenomaniano a Coniaciano)

Los primeros sedimentos de la Formación Une son asociados a areniscas de ambientes someros marinos (24) del Cretácico superior, se depositaron en discordancia erosiva sobre una superficie de al menos 257 m.a correspondiente a un basamento metamórfico de bajo grado, formado en el Paleozoico (4). Por análisis bioestratigráficos, esta Formación fue asignada al Coniaciano-Santoniano en Casanare (25) y Cenomaniano-Santoniano en la parte central y norte de la cuenca (26).

Se constituye principalmente por “areniscas cuarzosas a cuarzofeldespáticas de cemento silíceo y poca matriz argilicea, de grano fino a grueso y subredondeado. Presenta algunos niveles de conglomerados arenosos y hacia su tope puede presentar intercalaciones lodosas” (27).

El ambiente de deposición varía de canales fluviales en su parte inferior a canales y rellenos de estuarios (pantanos y llanuras de inundación). Esta Formación registra una transición de ambiente fluvial a litoral típico de procesos transgresivos (27).

2.1.2 Formación Gachetá (Turoniano-Campaniano)

Vale la pena aclarar que según Garcia (28,29), y Sanchez, *et al*, (30), la roca generadora principal es la Formación Chipaque y su correspondiente lateral hacia el oriente, la Formación Gachetá. En este trabajo se usará la nomenclatura simplificada de “Formación Gachetá”, descrita por Miller y Etayo (31) y que se usa en general en los estudios estratigráficos de esta cuenca.

La Formación Gachetá presenta un contacto concordante en la base con la Formación Une y en el tope con la Formación Guadalupe. Según los estudios bioestratigráficos (32,33) en el sector del área de estudio se reportan edades del Turoniano al Campaniano.

Esta formación se encuentra conformada por arcillolitas, limolitas intercaladas con intervalos de areniscas finas, areniscas limpias, lodolitas ricas en materia orgánica, cherts y fosforita. Esta formación representa la roca generadora por

excelencia en esta cuenca (equivalente de la Formación La Luna en VMM o de la Formación Villeta en VSM) (4,17).

La formación Gachetá se depositó en un ambiente marino somero relacionado a ambientes de llanura mareal o planicie deltaica con influencia marina. Así mismo esta formación se asocia a un ambiente litoral a marino restringido, lo que evidencia procesos de regresión y transgresión marina. (27).

2.1.3 Formación Guadalupe (Campaniano temprano hasta el Maastrichiano temprano)

El final de la sucesión Cretácica Superior de Llanos está marcado por una progradación, agradación y retrogradación de la línea de costa hacia el oriente relacionado a transgresión y regresión del nivel del mar representado por la Formación Guadalupe (34).

Se encuentra en contacto concordante en la base con la Formación Gachetá y en el tope está en contacto erosivo con la Formación Mirador del Cenozoico. De acuerdo con los estudios bioestratigráficos (32,33) se reportan edades del Turoniano al Campaniano.

Esta Formación tiene una composición de cuarzo arenisca a sublitoarenita, de grano fino a medio con intervalos conglomeráticos y de lodolitas que marcan el final de la sedimentación marina del Cretácico (4).

Esta unidad se depositó durante el pulso final de la acreción de la Cordillera Occidental al final de Cretácico, lo cual generó un cambio en la sedimentación por la disminución abrupta del nivel del mar, lo que provocó, pasar de un ambiente marino somero a litoral, donde se depositaron los sedimentos de la Formación Guadalupe (27).

3 Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en la zona de Plataforma de la Cuenca de los Llanos Orientales, al NE de Colombia, en el sector NE del Departamento de Casanare, límite SW del Departamento de Arauca y comprende un área de 850 km², (ver Figura 2).

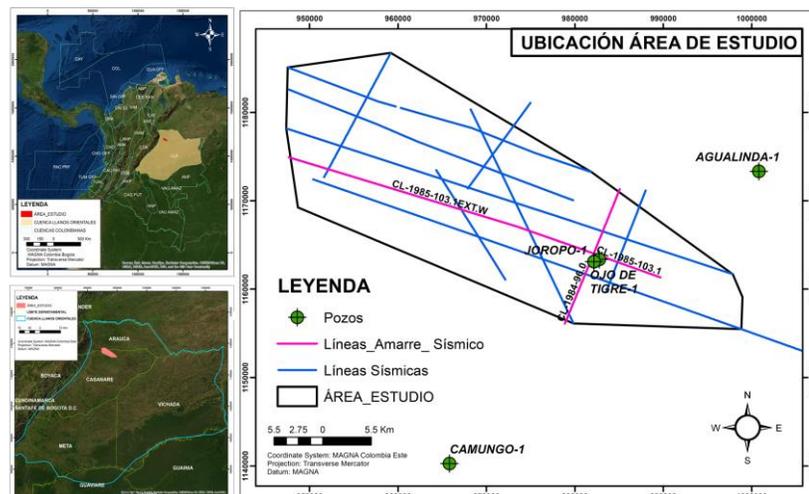


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio, se indica la ubicación de los Pozos y líneas sísmicas 2D. Fuente: Autor

4 Metodología

El comprendió el diagnóstico de información bibliográfica y recopilación de datos geológicos y geofísicos de la cuenca Llanos Orientales en el área de estudio.

Se continuó con una fase de interpretación en el software OpendTect de los registros eléctricos de pozos y de la información sísmica adquirida en el EPIS (Banco de Información Petrolera de Colombia).

Finalmente, con los resultados obtenidos, se procedió con el análisis y correlación entre los resultados, con lo que se logró definir los litotipos que conforman las Formaciones de la secuencia Cretácica de los Llanos y sus características sismoestratigráficas.

4.1 Diagnóstico de Información

El primer paso para realización del trabajo comprendió la recolección de bibliografía sobre estudios geológicos previos, enfocados en la secuencia Cretácica de la Cuenca Llanos, así como bibliografía técnica sobre la metodología necesaria para desarrollar una correcta interpretación y análisis de los resultados. Seguidamente, se recolectó la información geofísica por medio del EPIS (Banco de Información Petrolera de Colombia).

Se obtuvo una base de datos de 4 pozos (Figura 2): Agualinda1, Joropo 1, Ojo de Tigre 1, Camungo 1; perforados en la década de los 80 y el año 2010. Se contó con los informes técnicos (Geológico, perforación, análisis de registro de pozo, etc.), imágenes y formato "LAS" de los registros eléctricos (registros de calipper, rayos gamma, potencial espontáneo, resistividad, sísmico, porosidad neutrón y densidad).

Es importante mencionar que 2 de los pozos (Camungo 1 y Agualinda 1) no se encuentran en el área de estudio, sin embargo, fue necesario incluirlos en el trabajo debido a que en el área de estudio solo los pozos Joropo 1 y Ojo de Tigre 1 (hasta la base de la Formación Guadalupe) llegaron a perforar el Cretácico, por lo tanto fue indispensable obtener la información de los pozos más cercanos al área de estudio que hubieran perforado toda la secuencia cretácica y consecuentemente fuera posible realizar una correlación regional entre las formaciones Cretácicas perforadas.

De igual manera, se contó con una base de datos de 10 líneas sísmicas 2D (Figura 2) (4 en sentido NE/SW y 6 NW/SE), obtenidas del EPIS, producto de campañas de exploración, adquisición, procesamiento y reprocesamiento realizadas en años anteriores (década de los 70 - 80) en formato "SEGY", de reprocesamientos de migrado en tiempo in-in y out-out así como las versiones PSTM y UKOAS (datos de posicionamiento de campo).

4.2 Interpretación de registros eléctricos de Pozo

A partir de los registros eléctricos de los 4 pozos, obtenidos del EPIS, se realizó la interpretación de las electrofacies, la correlación estratigráfica regional por formaciones e identificación de litotipos presentes en cada unidad Cretácica en el área de estudio.

Se utilizaron los registros de Rayos Gamma como herramienta principal en la identificación de electrofacies, las cuales corresponden al conjunto de las respuestas de los registros de pozo que caracterizan un estrato y permiten que pueda ser diferenciado de los que lo rodean.

En este estudio se tomaron en cuenta los valores del registro de rayos gamma para diferenciar la litología, para arcillolitas y lodolitas valores mayores a 110 API; para limolitas y limolitas arenosas valores entre 90 y 110 API y para areniscas valores menores a 90 API. Esta clasificación permitió identificar los litotipos característicos de cada formación (Figura 5, 6, 7) definir el comportamiento geoelectrico de los litotipos de acuerdo a los patrones (formas) de los registros, así como patrones de apilamiento (Figura 4) siguiendo la metodología de Pirson (35) y Rider (36).

4.3 Amarre Sísmica – Pozo

Debido a que la información sísmica está en milisegundos (TWT) y los topes de las Formaciones en los pozos en pies (profundidad), fue necesario realizar sismogramas sintéticos para correlacionar estos dos dominios (tiempo – profundidad).

El sismograma sintético se obtuvo a partir del modelo convolucional para el dominio temporal (Figura 3), Ec (1), el cual establece que la traza (sismograma (S)) es la convolución de una función de reflectividad (coeficiente de reflexión (CR)) con un pulso de entrada (Ondícula sísmica (W)) (37).

$$CR * W = S \quad (1)$$

Para este trabajo se realizó el amarre tomando en cuenta los pozos Joropo 1 y Ojo de Tigre 1 y la línea sísmica más cercana a cada pozo (100 m de distancia máxima) (ver Figura 2). Se tomó en cuenta el registro checkshot de cada pozo, el cual se usó para obtener la tabla de tiempo – profundidad (ley de velocidad), calibrar el registro sísmico (DT), para obtener una mejor resolución de la ley de velocidad y compensar la diferencia de datums con la sísmica.

Posteriormente, se cargaron los registros de densidad para obtener el registro de impedancia acústica (IA), que corresponde a la resistencia que ejerce un medio homogéneo al paso de una onda de sonido, siendo el producto de la densidad por la velocidad sísmica mediante la Ec 2 (38).

$$IA = RHOB \cdot DT \quad (2)$$

El siguiente paso fue el cálculo del coeficiente de reflexión (CR) que corresponde al contraste de impedancia acústica entre las capas del subsuelo (Ec 3).

$$CR = \frac{IA_2 - IA_1}{IA_2 + IA_1} \quad (3)$$

Seguidamente, para definir el tipo de ondícula, por medio del software se estimó el pulso de la sísmica más cercana a cada pozo (Figura 2) para establecer un dato real como la ondícula. Finalmente, se hizo la convolución entre el coeficiente de reflexión con la ondícula para obtener el sismograma sintético y tener un amarre sísmico exitoso (Figura 3).

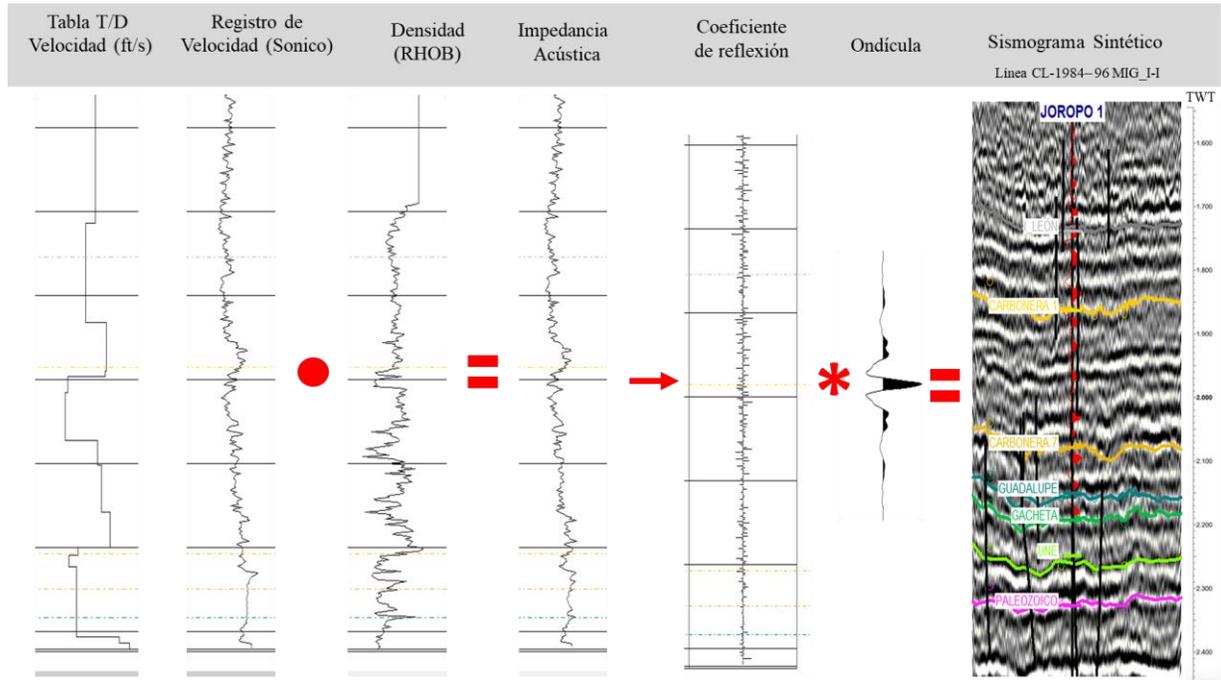


Figura 3. Procedimiento para el Amarre sísmica – pozo (Registros cargados en el software OpendTect); ejemplo del amarre del Pozo Joropo 1 con la línea CL- 1984-96, NE/SW, PSTM migrada en tiempo. Modificado de: Base de datos pozo Joropo 1 (39).

4.4 Interpretación sísmica

Posteriormente, al proceso de amarre sísmica pozo, fue posible proceder con la interpretación geológica de las 10 secciones sísmicas 2D en su versión PSTM, basado en los topes identificados en los registros eléctricos.

Se analizaron las secuencias sísmicas (Figura 8), separando las unidades de tiempo-deposición basado en la detección de discordancias o cambios en los patrones sísmicos, y datos bioestratigráficos reportados en los informes técnicos de los pozos (39), las discordancias fueron reconocidas por la interpretación de los lapout, que son las terminaciones de patrones sistemáticos en los reflectores a lo largo de los eventos sísmicos.

Por último, se realizó el análisis de facies sísmicas (Figura 9, 10, 11), el cual consistió en el estudio del significado geológico de las características de los reflectores como amplitud (contraste de impedancia), frecuencia (espaciamiento entre capas, contenido de fluidos) y continuidad (continuidad de capas, procesos deposicionales).

4.5 Mapas estructurales en tiempo

A partir de la interpretación sísmica fue posible generar mapas estructurales en tiempo al tope de cada formación Cretácica (Figura 12), con el objetivo de observar el buzamiento, geometría, geología estructural y complementar una visión general de la geología de la secuencia Cretácica del área de estudio.

Para esto, se interpretaron los horizontes sísmicos que representan el tope de las formaciones Cretácicas (Une, Gacheta y Guadalupe) en la malla de líneas sísmicas 2D. Además, se reconocieron las fallas que afectan estas unidades, para posteriormente comprender la distribución y estructuras geológicas que estas forman relacionadas a cada horizonte mediante los polígonos de falla (Figura 12d).

Finalmente, mediante el mismo software de interpretación (OpendTect), se usó la herramienta “Grid 2D – 3D Horizon”, ajustando los parámetros necesarios para la generación los mapas estructurales.

5 Resultados

El análisis sismoestratigráfico integró las electrofacies y litotipos de las Formaciones cretácicas identificadas en los registros eléctricos de pozo (Figura 5, 6, 7) con la información sísmica (Figura 2, 8), a partir de la calibración de los datos por medio de la técnica de amarre sísmica – pozo (Figura 3), para continuar con la

interpretación de los horizontes y secuencias sísmicas de la secuencia cretácica. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el trabajo.

5.1 Electrofacies

Se definieron 5 tipos de electrofacies (GRF) en la secuencia cretácica de los Llanos, ver Figura 4, las cuales corresponden a:

ELECTR O-FACIE	PATRÓN	IMAGEN REGISTRO GR		PA	INTERPRETACIÓN	COMÚN EN LA FORMACIÓN
		GR 0 - 150	ESCALA			
GRF 1	<i>Cilíndrico</i>		100 ft (30 m)		Patrón de registro en forma cilíndrica. GR < 90 API Areniscas masivas Patrón de apilamiento agradacional Indicador de ambiente litoral deltaico – barras distributarias y barrera de estuario	GUADALUPE UNE
GRF 2	<i>Cilíndrico aserrado</i>		100 ft (30 m)		Patrón de registro en forma cilíndrica aserrada. GR < 90 API predominante Patrón de apilamiento agradacional Areniscas intercaladas con niveles delgados de shale. Indicador de canales de estuarios y superficie costera o deltaica	GUADALUPE GACHETÁ
GRF 3	<i>Campana</i>		40 ft (12 m)		Patrón de registro en forma de campana. Secuencia grano decreciente De niveles bajos de GR hasta niveles altos de GR > 90 Patrón de sedimentación retrogradacional Indicador de ambientes de plataforma marina o litorales, barras y planicies de marea	GACHETÁ
GRF 4	<i>Embudo</i>		40 ft (12 m)		Patrón de registro en forma de embudo. Secuencia grano creciente De niveles altos de GR hasta niveles bajos de GR < 90 Patrón de sedimentación progradacional Indicador de ambientes de plataforma marina y litoral deltaico	GACHETÁ UNE
GRF 5	<i>Embudo aserrado</i>		100 ft (30 m)		Patrón de registro en forma de embudo aserrado. Secuencia grano creciente De niveles altos de GR hasta niveles bajos de GR < 90 predominante Patrón de sedimentación progradacional Indicador de ambientes de plataforma marina, nearshore y litoral deltaico	GACHETÁ
PATRONES DE APILAMIENTO						
		 AGRADACIONAL	 RETROGRADACIONAL	 PROGRADACIONAL		

Figura 4. Electrofacies identificadas en los registros eléctricos en la secuencia cretácica, los ejemplos fueron extraídos de los registros GR de los pozos (39,40,41,42) visualizados en el software OpendTect. Fuente: Autor.

5.1.1 Electrofacie GRF 1

Presenta patrón de registro en forma cilíndrica (Figura 4), los valores de GR son monótonos, se mantienen menores a 90 API, lo cual representa estratos de areniscas

masivas, con patrón de apilamiento agradacional. Según Pirson (35), se relaciona a un ambiente litoral deltaico, barras distributarias de deltas o barrera de estuario. Se aprecia comunmente en la parte superior e inferior de la Formaciones Une y Guadalupe.

5.1.2 *Electrofacie GRF 2*

Presenta patrón de registro en forma cilíndrica aserrada (Figura 4), esto es debido a que predominan los valores de GR < 90 API con intervalos delgados de mayor valor de GR > 90, lo que se identifica como areniscas masivas intercaladas con niveles delgados de limolitas y arcillolitas, con patrón de apilamiento agradacional. Según Pirson (35), se relaciona con ambientes de canales, rellenos de estuarios o plataforma marina. Se observa comunmente en la parte superior de la Formación Gachetá y en la parte superior e intermedia de la Formación Guadalupe.

5.1.3 *Electrofacie GRF 3*

Presenta patrón de registro en forma de campana (Figura 4), muestran niveles bajos de GR < 90 API en su base hasta niveles altos de GR > 90 API en el tope, indicio de una secuencia grano decreciente, con patrón de apilamiento retrogradacional. Según Pirson (35), es indicador de procesos transgresivos relacionado a ambientes de plataforma marina, barras litoral y planicies de marea. Se observa comunmente en la parte intermedia de la Formación Gachetá.

5.1.4 *Electrofacie GRF 4*

Presenta patrón de registro en forma de embudo (Figura 4), exhibe valores altos de GR > 90 API en su base hasta valores bajos de GR < 90 API en el tope, lo que configura una secuencia grano creciente, con patrón de apilamiento progradacional. Según Pirson (35), es indicador de procesos regresivos, en ambientes de plataforma marina, barrera litoral o deltaico. Se observa comunmente en la parte intermedia de la Formación Une y Gachetá.

5.1.5 *Electrofacie GRF 5*

Presenta patrón de registro en forma de embudo aserrado (Figura 4), en la base muestran valores altos de GR > 90 API hasta valores bajos de GR < 90 API hacia el tope, esto configura una secuencia grano creciente, con patrón de apilamiento progradacional. Según Pirson (35), es indicador de procesos regresivos, en ambientes de plataforma marina, o litoral. Se observa comunmente en la Formación Gachetá.

5.2 *Correlación estratigráfica y litotipos de las Formaciones Cretácicas*

Con el objetivo de identificar los litotipos presentes en el cretácico de la cuenca Llanos, se realizó la correlación estratigráfica regional para cada Formación. Esta fue basada en los registros eléctricos de los 4 pozos (Figura 5, 6 y 7), que, de acuerdo a sus informes técnicos,

descripciones litológicas de corte y estudios palinológicos lograron perforar la secuencia cretácica hasta el tope de la secuencia paleozoica (Ojo de tigre solo hasta la Formación Gachetá). Se identificaron los topes de 3 Formaciones litoestratigráficas, a partir de sus características electrofaciales y litológicas: Formación Une, Formación Gachetá y Formación Guadalupe.

5.2.1 *Formación Une*

Se depositó en el Cretácico Superior, durante un aumento global del nivel del mar, finales del Albiano-Cenomaniano, en un ambiente litoral (deltaico) (39).

En el área de estudio presenta un espesor casi constante que va desde los 168 m (550 ft) en el pozo Camungo 1 hasta un máximo de 192 m (630 ft) en el pozo Agualinda 1. Se encuentra en contacto discordante sobre a la secuencia paleozoica e infrayaciendo a la Formación Gachetá.

De acuerdo con los registros eléctricos en la correlación estratigráfica (Figura 5), se identificaron al menos dos intervalos de areniscas (ubicados en la parte inferior y superior de la formación respectivamente) de espesor muy grueso, estructura masiva, con comportamiento geoelectrico monótono, con patrón cilíndrico. Al relacionarlo con los informes geológicos de los pozos (39,40) estas areniscas presentan color blanco, translucidas y amarillas, de grano medio a grueso, con granos subangulares, subredondeados y con buena selección. Estos cuerpos de areniscas se encuentran intercalados en la parte intermedia de la formación por paquetes de capas de arcillolitas y limolitas negras fisiles con altos valores de GR.

5.2.2 *Formación Gachetá*

Representa la superficie de inundación máxima en la cuenca de los Llanos hacia el Oriente y Sureste, sobre el Escudo de Guyana, durante el Campaniano. Se depositó en un ambiente de plataforma marina poco profunda (39).

En el área estudio presenta un espesor muy constante de 168 m (550 ft) en el suroeste y 152 m (500 ft) en el noreste. Se encuentra suprayacente a la Formación Une en contacto concordante e infrayacente a la Formación Guadalupe en contacto concordante (ver Figura 6)

Está constituido de base a tope por arcillolitas y limolitas con valores de GR > 90 API, reportadas en los informes geológicos de pozo (35,36) de color gris oscuro, negro y en algunos casos cafe, laminadas y poco compactadas, con presencia de micas y material organico. Estas capas se encuentran intercaladas por capas medias a gruesas de areniscas que van aumentando su espesor hacia al tope, estas areniscas se reportan de color blanco lechoso o translúcidas, de grano medio a grueso, en ocasiones muy gruesos, con selección pobre (39,40).

En la correlación estratigráfica (Figura 6) , se aprecia que en el pozo Camungo 1 (SW) predominan los intervalos de areniscas en la base y tope, sin embargo, a

medida que se avanza hacia el pozo Agualinda (NE) se ve mayor desarrollo de intervalos de arcillolitas y limolitas, con patrón de GR en forma de embudo y campana.

5.2.3 Formación Guadalupe

Esta Formación se depositó durante el Campaniano tardío a Maastrichtiano, donde se registran procesos de regresión y progradación en ambientes estuarinos, deltaicos y de plataforma media (20).

Presenta un espesor de 107 m (350 ft) en el pozo Camungo 1 (SW) y de 91 m (300 ft) en el pozo Agualinda 1 (NE), se encuentra suprayacente a la Formación Gacheta e infrayacente con la Formación Mirador del Paleoceno.

Se identificaron al menos dos intervalos potentes de areniscas masivas, con patrón cilíndrico y cilíndrico aserrado, reportadas en los informes geológicos de los pozos (39,40) como areniscas limpias translúcidas, de grano medio a grueso, subangulares a subredondeados y de selección pobre; estos intervalos de areniscas están intercalados con paquetes de capas delgadas y físciles de lodolitas laminadas gris oscuro y arcillolitas poco compactas de color café oscuro.

El comportamiento geoelectrónico de la formación Guadalupe es monótono a lo largo de la correlación estratigráfica (Figura 7), tan solo en Camungo 1 (SW) se aprecia un mayor desarrollo de intervalos de limolitas y arcillolitas en la parte superior.

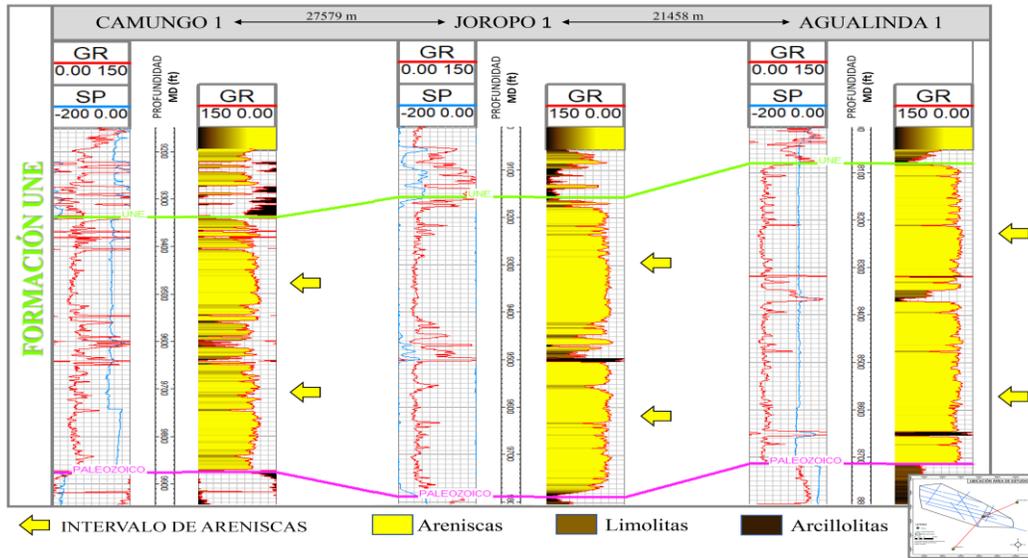


Figura 5. Correlación estratigráfica e identificación de litotipos de la Formación Une, a partir de los registros GR y SP (visualizados en el software OpendTect) de los Pozos Camungo 1, Joropo 1, Agualinda 1. Modificado de: Base de datos de cada pozo (39,40,41)

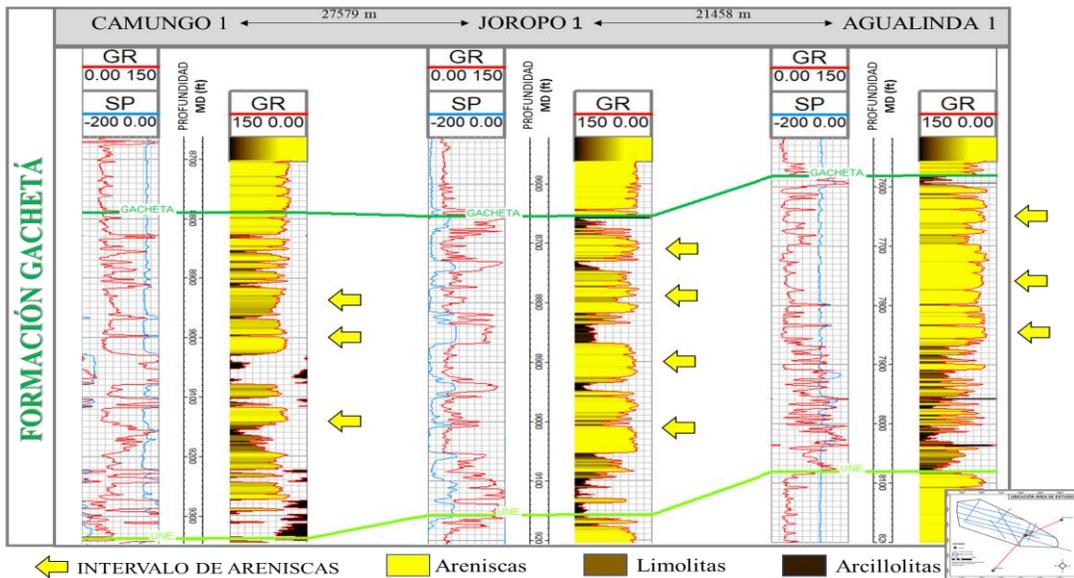


Figura 6. Correlación estratigráfica e identificación de litotipos de la Formación Gacheta, a partir de los registros GR y SP (visualizados en el software OpendTect) de los Pozos Camungo 1, Joropo 1, Agualinda 1. Modificado de: Base de datos de cada pozo (39,40,41)

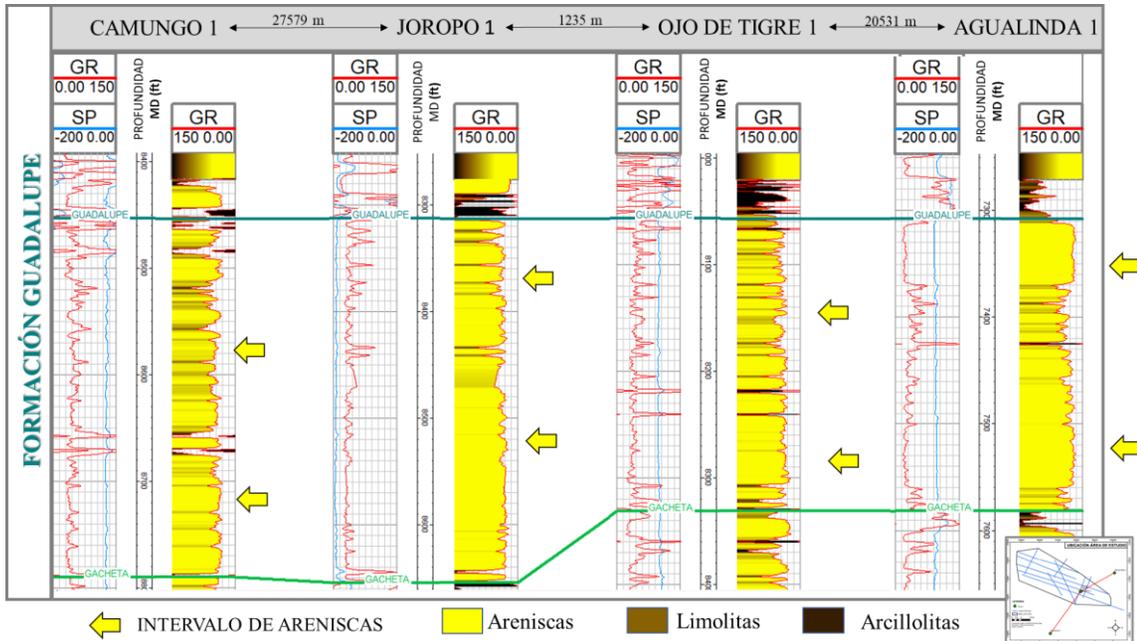


Figura 7. Correlación estratigráfica e identificación de litotipos de la Formación Guadalupe, a partir de los registros GR y SP (visualizados en el software OpendTect) de los Pozos Camungo 1, Joropo 1, Ojo de Tigre 1, Agualinda 1. Modificado de: Base de datos de cada pozo (39,40,41,42)

5.3 Interpretación sísmica

A partir del proceso de amarre sísmica pozo (Figura 3), fue posible realizar la interpretación de las líneas sísmicas basada en la identificación y análisis de secuencias, facies sísmicas (técnica A-B/C) (43,44) y

correlacionado los resultados de la interpretación de los registros de pozo.

Como se observa en la Figura 8, se identificaron 3 secuencias sísmicas (soportada por los estudios bioestratigráficos del pozo Joropo 1 (39)), así mismo se reconocieron 3 horizontes sísmicos, correspondientes a los topes de las formaciones Cretácicas.

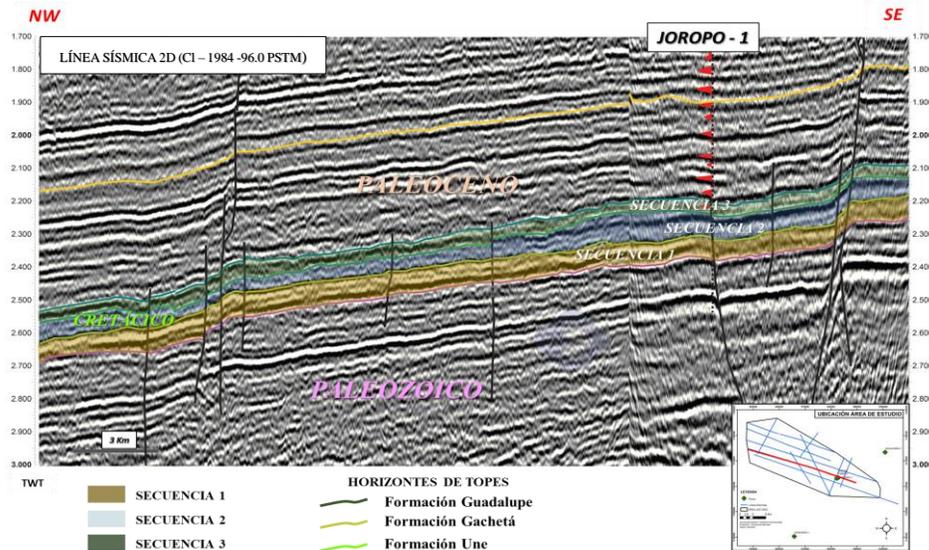


Figura 8. Interpretación en el software OpendTect de las secuencias y horizontes de la sección sísmica 2D CI – 1984 -96.0 PSTM, en sentido NW/SE. Fuente: Autor.

5.3.1 Secuencia 1

Presenta un espesor moderadamente constante. El horizonte base corresponde al contacto discordante con el tope de la secuencia Paleozoica Ordovícica (39), los reflectores muestran alta a media continuidad. El

horizonte superior se relaciona con el tope de la Formación Une del Cenomaniano (39), los reflectores muestran continuidad y se observa alta impedancia acústica, ver Figura 9. Para esta secuencia se identificaron las siguientes sísmofacies:

La Sismofacie C – C / Sub P a C (Figura 9), caracterizada por terminaciones concordantes hacia el tope y base, con configuración interna subparalela a caótica y con baja impedancia acústica. Los reflectores presentan baja a media continuidad y mediana amplitud y frecuencia. En los registros GR se aprecian como areniscas con patrón cilíndrico, por lo cual se relaciona con las capas muy gruesas de areniscas, que conforman la parte superior e inferior de la Formación Une.

La sismofacie C – C / P a O (Figura 9), se caracteriza por terminaciones continuas en el tope y base, con configuración interna paralela a ondulada. Los reflectores presentan continuidad, amplitud y frecuencia alta, así como alta impedancia acústica. En los registros GR se observan patrones de embudo y campana, por lo cual se relaciona con intercalaciones marcadas de capas de areniscas con paquetes de capas de limolitas que conforman la parte intermedia de la Formación Une.

5.3.2 Secuencia 2

Presenta un espesor moderadamente constante. El horizonte base corresponde al tope de la Formación Une, los reflectores muestran terminaciones continuas en contacto concordante. El horizonte superior se relaciona con el tope de la Formación Gachetá, del Campaniano (39), con terminaciones continuas, ver Figura 10. Para esta secuencia se identificaron las siguientes sismofacies:

La Sismofacie C – C / Sub P a C (Figura 10), se caracteriza por terminaciones continuas al tope y hacia la base y con configuración interna subparalela. Los reflectores presentan continuidad media, amplitud media, frecuencia media a baja, así como media impedancia acústica. En los registros GR se observan valores mayores a 90 API y muy ocasionalmente menores a 90 API, por lo cual, se relaciona con paquetes gruesos de limolitas y arcillolitas intercalados con capas medias de areniscas pertenecientes a la Formación Gachetá.

Las Sismofacies C – C / C (Figura 10), se caracteriza por terminaciones de continuas hacia el tope y hacia la base, con una configuración interna caótica. Los reflectores presentan continuidad baja, amplitud media y frecuencia baja, así como impedancia acústica baja. En los registros GR se aprecia en forma de embudo aserrado indicador de los paquetes gruesos de limolitas y arcillolitas de la Formación Gachetá.

5.3.3 Secuencia 3

Presenta un espesor moderadamente constante. El horizonte base corresponde al tope de la Formación Gachetá, los reflectores muestran terminaciones continuas en contacto concordante. El horizonte superior se relaciona con el tope de la Formación Guadalupe, del Campaniano (39), con terminaciones continuas, ver Figura 11. Para esta secuencia se identificaron las siguientes sismofacies:

La sismofacie C – C / P (Figura 11.), se caracteriza por terminaciones al tope continuas, concordantes en la base y con configuración interna paralela. Los reflectores presentan continuidad, amplitud y frecuencia alta, así como alta impedancia acústica. En los registros GR se observan patrones de embudo y campana, por lo cual se relaciona con intercalaciones marcadas de capas potentes de areniscas con paquetes de capas de limolitas que conforman la parte inferior de la Formación Guadalupe.

Finalmente, La Sismofacie C – C / Sub P a C (Figura 11.), caracterizada por terminaciones concordantes hacia el tope y base, con configuración interna subparalela a caótica y con baja impedancia acústica. Los reflectores presentan baja a media continuidad y mediana amplitud y frecuencia. En los registros GR se aprecian como areniscas con patrón cilíndrico, por lo cual se relaciona con las capas muy gruesas de areniscas, que conforman la parte superior e intermedia de la Formación Guadalupe.

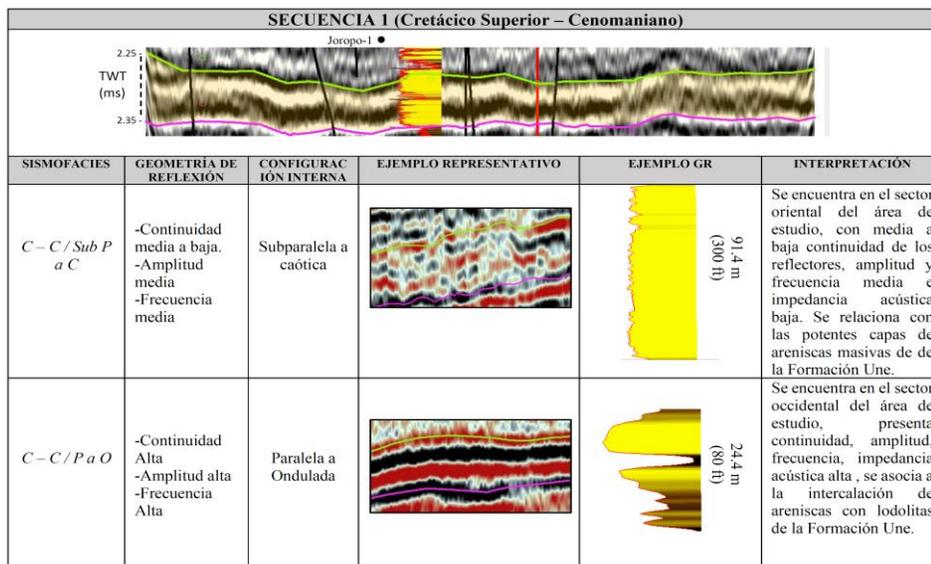


Figura 9. Identificación y caracterización facial de la secuencia sísmica 1, correspondiente a la Formación Une (visualizadas en el software OpendTect). Fuente: Autor.

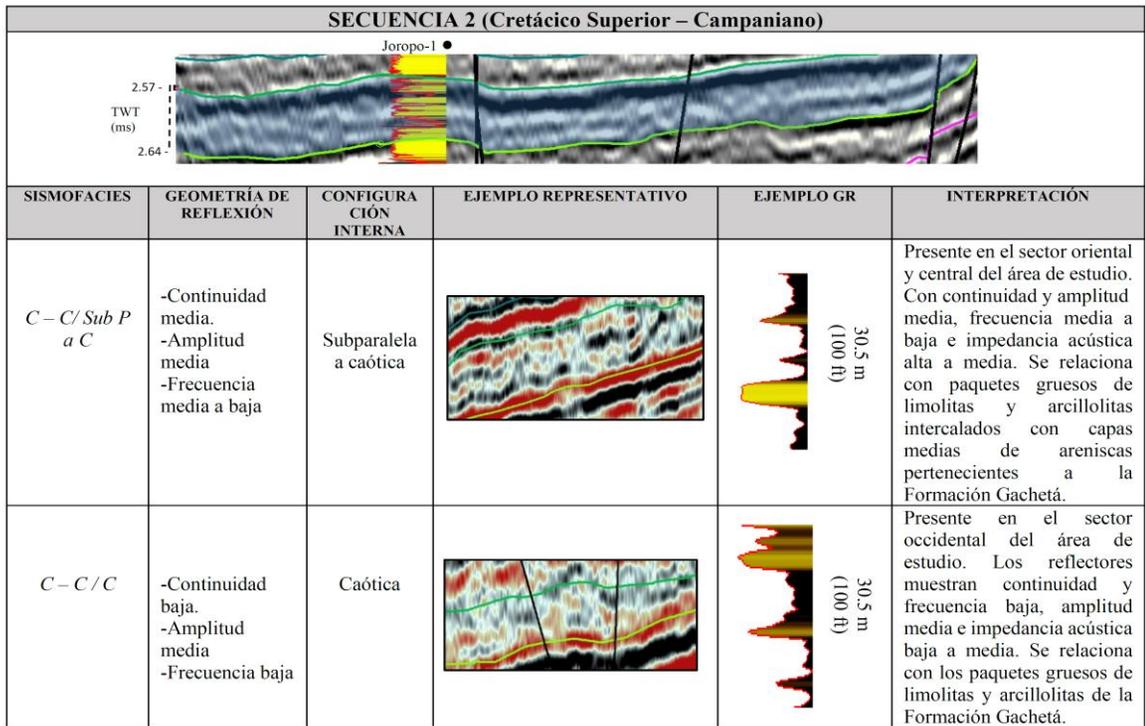


Figura 10. Identificación y caracterización facial de la secuencia sísmica 2, correspondiente a la Formación Gachetá (visualizadas en el software OpendTect). Fuente: Autor.

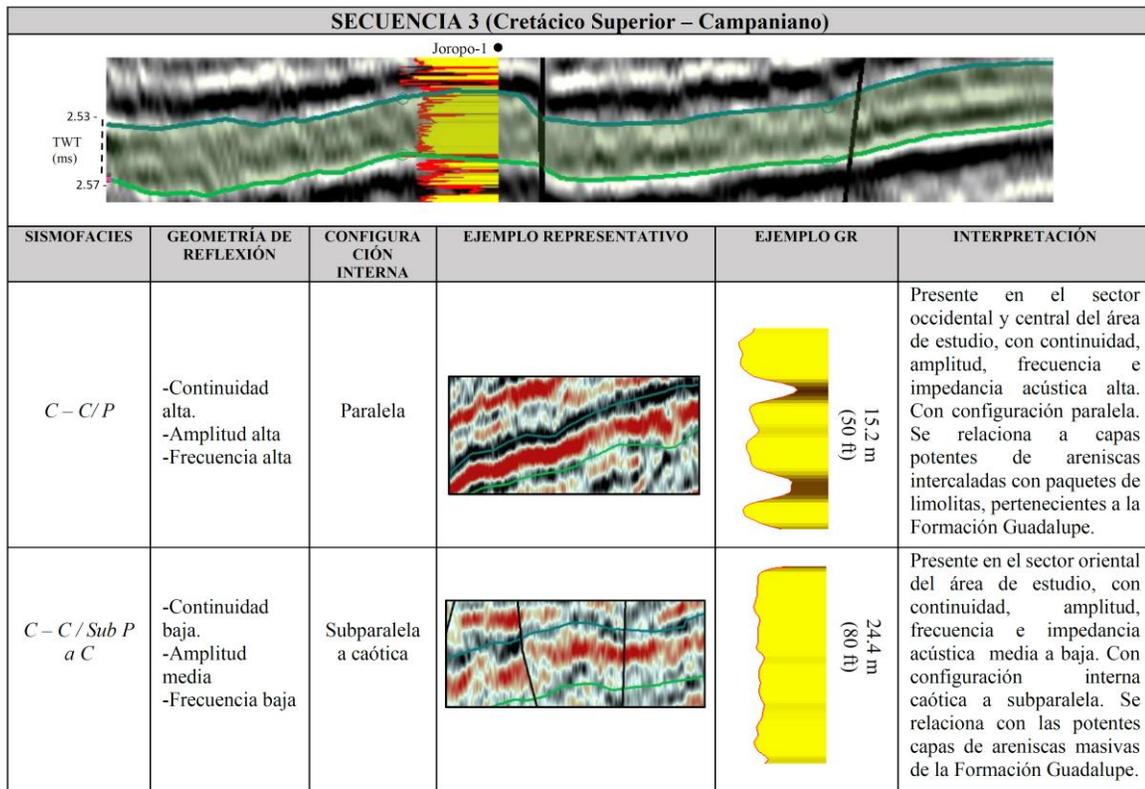


Figura 11. Identificación y caracterización facial de la secuencia sísmica 2, correspondiente a la Formación Guadalupe (visualizadas en el software OpendTect). Fuente: Autor.

5.4 Mapas estructurales en tiempo

Basado en los mapas estructurales en tiempo al tope de las formaciones Cretácicas (Figura 12 a, b, c) se observa que estas unidades conforman un homoclinal buzando hacia el oeste, así mismo tienen un leve aumento de espesor, siendo coherente con el depocentro de la cuenca y configuración tectónica de cuenca foreland (4,22,23) (Figura 12 d).

En el área de estudio se identificaron dos familias de fallas con sentido N – S y NE / SW como se observan en

los mapas. Apoyado en la interpretación sísmica se identificó que estas fallas son normales y algunas con componente de rumbo, además, se observa que cortan desde la secuencia Paleozoica hasta el Cretácico y algunas de ellas llegan hasta el Paleoceno. La mayoría de estas fallas son sintéticas (buzando hacia el depocentro) pero también se observan fallas antitéticas (buzando en sentido contrario al depocentro) formando una estructura tipo graben en el sector oriental del área de estudio como se observa en la imagen de la línea sísmica interpretada (Figura 12 d).

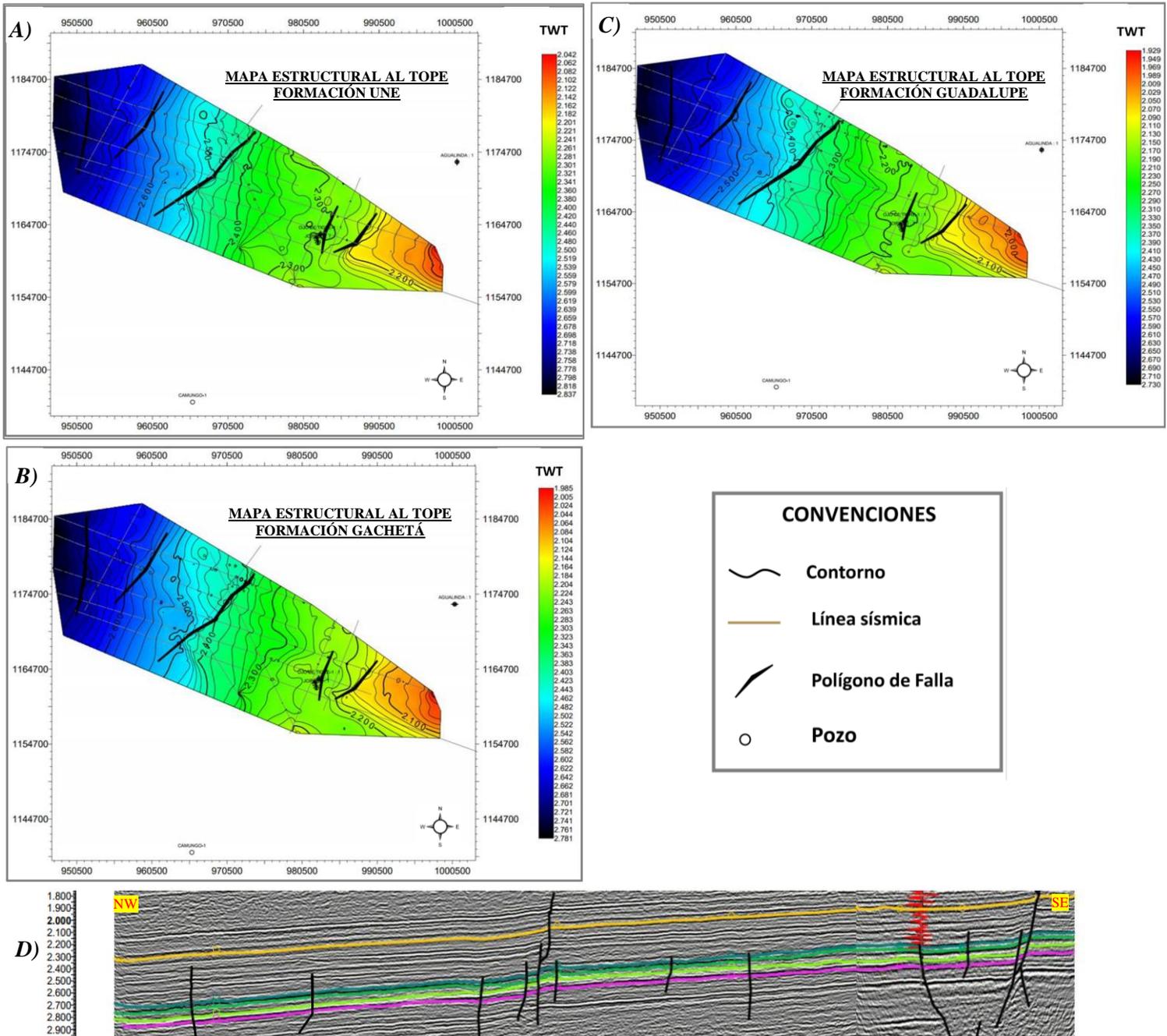


Figura 12. Mapas estructurales (generados por medio del software OpendTect) en tiempo al tope de las formaciones Cretácicas, A) Formación Une; B) Formación Gacheta; C) Formación Guadalupe; D) Sección sísmica 2D (C1 – 1984 – 96 PSTM) interpretada, se evidencian las fallas que afectan la secuencia Cretácica. Fuente: Autor

6 Discusión de resultados

A partir de los resultados obtenidos del trabajo, se pudo determinar que:

La Formación Une tiene un espesor que varía desde los 168m (SW) hasta los 192m (NE). En la parte inferior y superior se observa un comportamiento geoelectrico monótono en los registros GR con patrones en forma cilíndrica, lo que se relaciona litológicamente a intervalos potentes de areniscas, depositadas de forma agradacional. Estos intervalos también se logran observar en la sísmica como facies con reflectores de continuidad, amplitud y frecuencia media a baja, y bajo contraste de impedancia acústica asociado a la uniformidad de la litología. En la parte intermedia de la Formación Une, se observan cambios en los patrones de los registros eléctricos, exhibiendo formas de campana y embudo, producto de la variación en los valores del GR, esto se asocia litológicamente a una intercalación de capas medias de areniscas con capas medias de limolitas y arcillolitas. Este cambio litológico se traduce en la sísmica como facies con reflectores de continuidad, amplitud y frecuencia media a alta, además un alto contraste de impedancia acústica.

Posteriormente, en el contacto superior se identificó a la Formación Gachetá, la cual se caracteriza por tener un espesor variable de 168m (SW) y 152 ft (NE). En la parte inferior de la formación, se observó un comportamiento geoelectrico variable en los registros GR con patrones en forma de embudo y embudo aserrado, lo que se relaciona litológicamente con una secuencia granocreciente que va desde arcillolitas y lodolitas hasta intervalos de areniscas, que se observan en la sísmica como facies con reflectores de continuidad, amplitud y frecuencia media a baja, debido a que predominan las arcillolitas y lodolitas, no obstante, se observa alto a medio contraste de impedancia acústica asociado al cambio litológico. En la parte intermedia de la Formación Gachetá se observa un comportamiento geoelectrico variable en los registros GR con patrones en forma de campana, lo que se relaciona litológicamente con una secuencia granodecreciente que va desde intervalos de capas de areniscas hasta capas de arcillolitas y lodolitas, que se aprecian en la sísmica como facies con reflectores de continuidad, amplitud y frecuencia media a baja, debido a que predominan las arcillolitas y lodolitas, no obstante, se observa alto a medio contraste de impedancia acústica asociado al cambio litológico. Por último, en la parte superior de la formación se observó en el registro GR patrones en forma de cilindro aserrado, esto se interpreta como una intercalación de areniscas y lodolitas, que provocan un contraste marcado de impedancia acústica las facies y en el límite superior de la segunda secuencia sísmica.

Finalmente, en el contacto superior se identificó a la Formación Guadalupe, la cual tiene un espesor que varía desde 107m (SW) hasta 91m (NE). En la parte inferior se observó un comportamiento geoelectrico monótono en los registros GR con patrones en forma cilíndrica, lo que se

relaciona litológicamente a intervalos potentes de areniscas, depositadas de forma agradacional. Estos intervalos se aprecian en la sísmica como facies con reflectores de continuidad, amplitud y frecuencia media a baja, y contraste de impedancia acústica bajo, asociado a la uniformidad de la litología. En la parte intermedia de la Formación Guadalupe, se observó una variación en los valores del GR debido a la presencia de capas delgadas de limolitas y arcillolitas. Este cambio litológico no alcanza a ser apreciable en la sísmica debido a la escala. Al continuar con la interpretación de la parte superior de la Formación Guadalupe, se observaron patrones en los registros GR en forma de cilindro aserrado, lo que se relaciona con una intercalación de capas gruesas de areniscas con capas delgadas de limolitas y arcillolitas, que en la sísmica se presentan como facies con continuidad, amplitud y frecuencia alta, así como una impedancia acústica alta, evidencia del cambio litológico.

Finalmente, basado en los mapas estructurales de las formaciones Cretácicas, se observa que la secuencia se configura como una estructura homoclinal con buzamiento hacia el occidente y está afectada por fallas normales sintéticas y antitéticas que en el sector oriental conforman estructuras de tipo graben, siendo conforme a la estructura de antepaís de la cuenca (7,4,10,11).

7 Conclusiones

En la investigación realizada se lograron identificar y caracterizar mediante un análisis sismoestratigráfico las Formaciones Une, Gachetá y Guadalupe, las cuales conforman la secuencia cretácica de los Llanos Orientales.

Basado en la interpretación y análisis de los registros eléctricos de 4 pozos, se determinó que la Formación Une es la unidad más antigua, esta yace discordantemente sobre la secuencia del Paleozoico y está conformada predominantemente por intervalos potentes de areniscas.

La Formación Gachetá yace concordantemente sobre la Formación Une y se conforma principalmente por intervalos potentes de limolitas y arcillolitas.

La formación Guadalupe es la unidad más joven de la secuencia, infrayace a las rocas del Paleoceno y se conforma principalmente por intervalos potentes de areniscas.

Estas interpretaciones litológicas coinciden con las descripciones litológicas reportadas en los informes técnicos de los pozos (39,40,41,42)

Así mismo, a partir de la interpretación geológica de 10 líneas sísmicas migradas en tiempo, se identificaron las mismas tres unidades relacionadas como tres secuencias sísmicas, para posteriormente reconocer las facies sísmicas típicas de cada una, conforme a la geometría y configuración de los reflectores.

Por último, la interpretación de la información de pozos y sísmica permitió analizar la geología estructural de la secuencia Cretácica de Llanos, la cual es conforme a la geometría de cuenca de antepaís (7,4,10,11), donde las unidades identificadas buzaban hacia el depocentro de la

cuenca y son afectadas por fallas normales sintéticas y antitéticas, lo que reafirma la calificación de cuenca polihistórica a los Llanos (12,13,14,15,16).

Recomendaciones

Se recomienda analizar volúmenes de sísmica 3D para tener mayor certeza en la interpretación de secuencias, facies y horizontes sísmicos. Así mismo se recomienda cartografiar a menor escala las zonas falladas en la búsqueda de posibles oportunidades exploratorias para hidrocarburos.

Reconocimientos

Se agradece los geólogos Edgar Chajid Kairuz, Ruben Arismendy y a las geólogas Julisa Torres y Maria Emilie Daroca por su asesoría, apoyo y sus valiosos aportes que permitieron hacer posible este trabajo.

Referencias

- [1] Kendall G, Escobar R, Gallo J, Morales P. Geological report on the Heavy Oil Project, Southern Llanos Basin – Colombia. In: Bogotá, Colombia: INTERCOL; 1982.
- [2] Etayo-Serna F. Documentación paleontológica del Infracretácico de San Felix y Valle Alto, cordillera Central, de Proyecto Cretácico: Contribuciones. In: Bogotá, Colombia: Ingeominas, Publicaciones Geológicas Especiales; 1985. p. XXV-1-XXV-7.
- [3] Mc.Court W, Aspden J, Brook M. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. In.: Journal of the Geological Society, n° 141; 1984. p. 831-845.
- [4] Cooper MA. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. In.: AAPG Bulletin, Vol 79.; 1995. p. 1421-1443.
- [5] Reyes A. Sedimentology and stratigraphy and its control on porosity and permeability Barco formation, Cusiana field, Colombia. In.: Postgraduate Research Institute of Sedimentology; 1996. p. 70.
- [6] Fajardo A, Rojas E, Cristancho J, System G. Definición del Modelo estratigráfico en el intervalo Cretáceo tardío a mioceno medio en la Cuenca Llanos Orientales y Piedemonte llanero. In. Colombia: Ecopetrol S.A e Instituto Colombiano del Petróleo (ICP); 2000. p. 42-125.
- [7] Bayona G, Cortes M, JC, Ojeda G, Aristizabal J, Reyes-Harker A. An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. In.: GSA Bulletin, vol. 120; 2008a. p. 1171-1197.
- [8] ANH. Geología del Petróleo: Llanos Orientales Bogotá, Colombia: Open Round Colombia 2010; 2010.
- [9] DeCelles P, Giles K. Foreland Basin Systems. In.: Basin Research, vol. 8; 1996. p. 105-123.
- [10] Parra M, Mora A, Jaramillo CA, Strecker MR, Sobel ER, Quiroz L. Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. In.: GSA Bulletin, vol. 121; 2009a. p. 780-800.
- [11] Parra M, Mora A, Sobel ER, Strecker MR. Episodic orogenic front migration in the northern Andes: Constraints from low-temperature thermochronology in the Eastern Cordillera, Colombia. In.: Tectonics, vol. 28; 2009b.
- [12] Bartok P. Pre-breakup geology of the Gulf of Mexico-Caribbean: Its relation to Triassic and Jurassic rift systems of the region. In.: Tectonics, vol. 12; 1993. p. 441-459.
- [13] Lugo J, Mann P. Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela. In.: AAPG Memoir, vol. 62; 1995. p. 699.
- [14] Pindell J, Tabbutt K. Mesozoic-Cenozoic Andean Paleogeography and Regional Controls on Hydrocarbon Systems. In.: Petroleum Basins of South America; 1995.
- [15] Cochrane R, Spikings R, Gerdes A, Ulianov A, Mora A, Villagómez D. Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. In.: Lithos, vol. 190; 2014a. p. 383-402.
- [16] Lelij Vd, Roelant , Spikings , Mora , R. Thermochronology and Tectonics of the Mérida Andes and the Santander Massif, NW South America. In.: Lithos; 2016. p. 248.
- [17] Sarmiento-Rojas LF. Mesozoic rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. In.: Amsterdam: Thesis, Vrije Universiteit; 2001. p. 319.
- [18] Vargas C, P. M. Tearing and breaking off of subducted slabs as the result of collision of the Panama arc-intender with northwestern South America. In.: Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 103; 2013. p. 2025-2046.
- [19] Van der Hilst R, P. Mann P. Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. In.: Geology, vol. 22; 1994. p. 451-454.
- [20] ANH. Petroleum Geology of Colombia: Geology and hydrocarbon Potential, Llanos Basin. In. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT, Vol. 9; 2011.
- [21] Horton BK, Saylor JE, Nie J, Mora A, Parra M, Reyes A, et al. 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. 2010a; 122.
- [22] James K. The Venezuelan hydrocarbon habitat, part 2: hydrocarbon occurrences and generated-accumulated volumes. In.: Journal of Petroleum Geology, vol. 23, n° 2; 2000. p. 133-166.

- [23] Roure F, Bordas-Lefloch N, Toro J, Aubourg C, Guilhaumou N, Hernandez E, et al. Petroleum systems and reservoir appraisal in the sub-Andean Basins (Eastern Venezuela and Eastern Colombia foothills). In.: AAPG Memoir, vol. 79; 2003. p. 750-775.
- [24] Hubach E. Geología petrolífera del departamento de Norte de Santander. In.: Servicio Geológico Nacional, vol. 416, n° Informe No. 176; 1931.
- [25] Muñoz F. El Paleozoico en la Cuenca de los Llanos Orientales. Futuro objetivo exploratorio. In.: Exploración Petrolífera en Cuencas Sub-Andinas, n° 1; 1991.
- [26] Fajardo A. 4-D Stratigraphic architecture and 3-D reservoir fluid-flow model of the Mirador formation, Cusiana field, foothills area of the Cordillera Oriental, Colombia. In. USA: Master's Thesis, Colorado School of Mines; 1995.
- [27] Reyes J, Silva M, Munar F, Lasso A, Bohórquez J, Valderrama J, et al. Objetivos Estratigráficos en la subcuenca Apiay-Ariari. In.: Memorias del IV Simposio Bolivariano, vol. 27; 1991.
- [28] García DF. Estudo dos sistemas petrolíferos no setor Central da Bacia dos "Llanos Orientales," Colômbia. Um modelo para explicar as mudanças na qualidade do Petróleo (in Portuguese). In. Rio de Janeiro, Brazil: Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2008.
- [29] García DF, Vaz dos Santos Neto E, Penteadó H. Controls on the petroleum composition in the Llanos basin, Colombia: Implications for exploration. In.: AAPG Bulletin, vol. 99, n° 8; 2015. p. 1503-1535.
- [30] Sánchez N, Mora A, Parra M, Garcia G, Cortes M, Shanahan R. Petroleum system modeling in the Eastern Cordillera of Colombia using geochemistry and timing of thrusting and deformation. In.: AAPG Bulletin, vol. 99, n° 8; 2015. p. 1537-1556.
- [31] Miller TA, Etayo-Serna F. The geology of the Eastern Cordillera between Aguazul-Sogamoso-Villa de Leiva (geological field trips, Colombia 1959-1978). In.: Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists, Margal Lta; 1972. p. 349-372.
- [32] Sarmiento JGyG. Estratigrafía física, Palinológica, Sedimentológica y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera. In.: Geología Colombiana, vol. 20; 1996. p. 3-66.
- [33] Muller J, Di Giacomo E, Van Erve A. A palynologic zonation for the Cretaceous, Tertiary and Quaternary of Northern South America. In.: American Association of Stratigraphic Palynologist Contribution Series, vol. 19; 1987. p. 7-76.
- [34] GeotecLtd. Petroleum geology of the Llanos Basin, Colombia.» de Seismic atlas of Colombia. In. Bogotá, Colombia: Geotec Ltd; 1986. p. 118.
- [35] Pirson SJ. Geologic Well Log Analysis Houston: Gulf Publishing Co; 1977.
- [36] Rider M. The geological interpretation of well logs Blackie, Halsted, New York: Rider French Consulting; 1986.
- [37] GeologiaWeb. GeologiaWeb - Traza sísmica. [Online]; 2014. Available from: <https://geologiaweb.com/geofisica/reflexion-sismica/traza-sismica/#:~:text=Figura%201%3A%20El%20modelo%20convolucional,f%C3%ADsicas%20de%20las%20ocapas%20geol%C3%B3gicas>.
- [38] Schlumberger. Oilfield Glossary en Español. [Online]; 2020. Available from: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/s/seismic_impedance.
- [39] Occidental de Colombia. Joropo 1 - Final Report. Bogotá; 1985.
- [40] Repsol Co. Informe Final Camungo 1. Bogotá: 1989.
- [41] Lasmo Oil (Colombia) LTD. Final well geological report Agualinda 1. Colombia, Arauca; 1985.
- [42] Petrominerales Colombia. Final Geological Report Ojo de Tigre 1 Well. Colombia: Arauca; 2006.
- [43] Mitchum RVP, Thompson S. The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis – Applications to hydrocarbon exploration; 1977.
- [44] Sangree J, Widmier J. Seismic interpretation of clastic depositional facies: Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration ; 1977.