

# Evidencias de Inversión Estructural a partir del reconocimiento de estructuras del tipo "Pop Up" a lo largo de la falla transcurrente Lama-Icotea, en la Región de Ático, Cuenca de Maracaibo, Venezuela

## Evidence of structural inversion from the recognition of "Pop Up" structures type along the Lama-Icotea transcurrent fault, in the Ático Region, Maracaibo basin, Venezuela

González, Leonardo<sup>1\*</sup>; Jaramillo, Alejandro<sup>2</sup>; Elberg, Maria<sup>1</sup>; Labrador, Tomas<sup>3</sup>; Barrios, Edixon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Geología Aplicada, GIGA. ULA

<sup>1</sup>Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería. ULA

<sup>2</sup>Halliburton-Landmark, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela

<sup>3</sup>PDVSA, Las Salinas, Cabimas, Estado Zulia, Venezuela

\*gmle@ula.ve

### Resumen

*La evolución estructural de la Cuenca de Maracaibo muestra una serie de eventos tectónicos complejos: extensión-transtensión (Eoceno temprano y el Eoceno medio), causada por la convergencia oblicua de las placas Suramericana y del Caribe, así como una inversión tectónica durante el Eoceno tardío y el Plioceno. El objetivo principal de esta investigación es realizar un modelo estructural en la Región de Ático, Cuenca del Lago, que contribuya al modelo estático para futuros planes de explotación. La región del Ático se encuentra ubicada en el Bloque I, en la parte centro-norte de la Cuenca de Maracaibo. Geológicamente, ésta se encuentra limitada entre dos superficies erosivas reconocidas a nivel regional (discordancia del Paleoceno y discordancia del Eoceno). Desde el punto de vista estructural, el Ático es un bloque elongado con dirección NE-SO limitado al oeste por la falla Lama-Icotea y al este por la falla del Ático de carácter inverso, que verge contra Lama-Icotea en profundidad hacia el oeste. Este bloque está dividido internamente por fallas Intra-Ático orientadas NE-SO, interpretadas en sísmica como de comportamiento inverso y cierre estructural en profundidad dentro de la Formación Misoa. La falla Lama-Icotea constituye el elemento estructural más importante del Bloque I, de rumbo N15°E, transcurrente sinistral producto de una tectónica compresiva-transpresiva y distensiva transtensiva que la afectaron durante el Mesozoico y Cenozoico, lo cual conllevó al desarrollo de estructuras como el Ático en un proceso de inversión estructural. El origen del bloque del Ático en base a la información que se maneja en esta investigación, está relacionada a una etapa tardía de acortamiento de bloques por compresión transpresión, permitiendo la expulsión parcial del prisma que se encuentra restringido a la falla Lama-Icotea y la falla del Ático representando una estructura 'pop up' desgarrada hacia arriba y comprimida hacia su base.*

**Palabras clave:** Cuenca de Maracaibo, Inversión estructural, Tectónica, falla del Ático, Venezuela.

### Abstract

*The structural evolution of the Maracaibo basin shows a series of complex tectonic events: extension transtension (early Eocene and middle Eocene), caused by oblique convergence in South America and the Caribbean plates, as well as a tectonic inversion during the late Eocene and Pliocene ages. The main objective of this research is to perform a structural model in the Ático Region, basin of Maracaibo Lake, to contribute in the static model for future exploitation plans. The Ático region is located in block I, in the north-central part of the Maracaibo basin. Geologically, this is limited between two erosive surfaces recognized at regional level (discordance of the Paleocene and Eocene unconformity). From the structural point of view, the Ático is an elongated block with NE-SW direction limited by the Lama-Icotea fault to the West and*

the Ático fault to the East with reverse behavior, that verge against Lama-Icotea in depth towards the West. This block is divided internally by faults Intra-Ático oriented NE-SW, interpreted in seismic like a reverse behavior and structural closure at depth within the Misoa formation. The Lama-Icotea fault constitutes the most important structural element of block I, oriented  $N15^\circ E$ , strike-slip sinistral fault results a compressive-transpressive tectonics and distensive-transtensive product that affected it during the Mesozoic and Cenozoic ages, which developed structures like the Ático in a process of structural inversion. The origin of the Ático block in base of information in this research is related to a late stage of shortening of block compression-transpression, allowing the partial expulsion of the prism that is restricted to the Lama-Icotea fault and the Ático fault representing a "pop up" structure broked to up and compressed towards their base.

**Key words:** Maracaibo basin, Structural inversion, Tectonics, Ático fault, Venezuela.

## 1 Introducción

Hace años, los modelos estructurales desarrollados en la industria petrolera, eran creados principalmente en base a la información sísmica interpretada en conjunto por geofísicos y geólogos; de esta forma la sísmica constituía la herramienta más importante al momento de definir la configuración estructural de un yacimiento. Hoy en día, es mayor el número de campos maduros, yacimientos agotados, que demandan la aplicación de más tecnología y el desarrollo de nuevos estudios en áreas donde cada vez es más difícil la extracción de hidrocarburos. Bajo estas condiciones se planteó generar un modelo estructural de la cobertura sedimentaria Eocena (secuencia de mayor interés económico), en un área de alta complejidad estructural, integrando la información de pozos y análisis de núcleos con la información sísmica tridimensional, en la región del Ático situada en la parte septentrional del Bloque I de la Cuenca de Maracaibo, adscrito a la Unidad de Explotación Lagomar perteneciente a Petróleos de Venezuela (PDVSA). La estructura del Ático está enmarcada dentro de elementos tectónicos complejos asociados al sistema de fallas transcurrentes de Lama-Icotea. El objetivo principal de la investigación estuvo dirigido a la definición de los principales planos de fallas que conforman la estructura transpresiva del Ático en el área norte y centro-norte del Bloque I. Para la interpretación estructural, y haciendo uso de la sísmica tridimensional reprocesada se delinearón las superficies que limitan la secuencia estratigráfica Eocena, que en el Bloque I corresponde a la Formación Misoa (Eoceno temprano-medio); éstas superficies son, hacia la base de la secuencia, la discordancia del Paleoceno (ER-PC) y hacia el tope la discordancia angular del Eoceno (ER-EO). Esta última representa el evento erosivo más importante en la Cuenca de Maracaibo, producto de una fuerte compresión a nivel regional que actuó sobre el Bloque de Maracaibo en el Eoceno tardío ocasionando la flexura, exposición y erosión de buena parte de la secuencia estratigráfica Eocena en la cuenca. Finalmente la combinación de los planos de falla definidos con información sísmica y las superficies generadas de los datos sísmicos, soportados con toda la información geológica de pozos (registros de resistividad, rayos gamma (GR), registros de buzamientos y de imagen) han sido los elementos utilizados para determinar el marco estructural local de esta área, enmarcada

dentro del contexto regional interpretado para este sector de la Cuenca de Maracaibo.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Evolución Tectónico-Sedimentaria de la Cuenca de Maracaibo

La Cuenca de Maracaibo constituye una cuenca intracratónica relativamente estable, limitada por placas activas de alto relieve. La mayor parte de los sedimentos entrampados en esta cuenca se derivan de la erosión de la placa del Caribe que colisionó con la placa suramericana durante el Paleógeno, influencia de la orogénesis andina del Neógeno al norte y este de la cuenca, así como también de la Sierra de Perijá hacia el oeste. Además de estos elementos, dicha cuenca se encuentra limitada por tres sistemas de fallas que se ubican aproximadamente de manera triangular, integrada por el sistema de Falla de Boconó al este y sureste, el sistema de la Falla de Santa Marta al oeste y suroeste y el sistema de Falla de Oca-Ancón hacia el norte (Figura 1).

### 2.2 Triásico-Jurásico

Posterior a la convergencia del Pérmico, se inicia una etapa de relajamiento y dos fases de "rifting" en la Cuenca de Maracaibo. Esta se inicia en el Triásico y continúa hasta el Jurásico tardío. El "rifting" Jurásico se debe tanto a la apertura del Océano Atlántico, como a la extensión de las zonas de retroarco, al este de la Cordillera Central colombiana (Dengo y Covey, 1993).

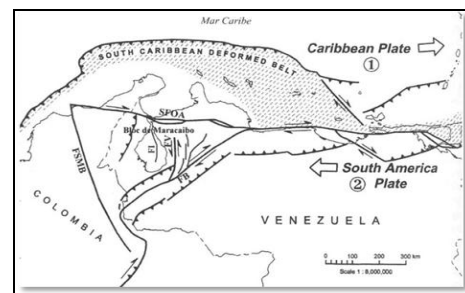


Fig. 1. Mapa estructural del occidente de Venezuela. FSMB: Falla Santa Marta – Bucaramanga, FB: Falla de Boconó, SFOA: Sistema de falla de Oca Ancón, FI: Falla de Icotea, FV: Falla de Valera. Tomado y modificado de González, 2002

#### 2.4 Paleoceno Tardío-Eoceno Temprano

Durante el Paleoceno tardío (60 m.a), la cuenca de Maracaibo comenzó a profundizarse en respuesta a la compresión tectónica en sus márgenes norte y noreste lo cual provocó una alta tasa de subsidencia (150 m/m.a) en la mayor parte de la cuenca, cuando la placa del Caribe inició su colisión con el norte de Suramérica durante finales del Paleoceno (Escalona A., 2003). La carga flexural desarrolló un alto estructural en el centro de la cuenca que migró al sur, en respuesta al cabalgamiento de las napas de Lara exponiendo la plataforma del Paleoceno a la erosión cerca de los 54 m.a. lo que provocó la ausencia de la Formación Marcelina en algunas regiones de la cuenca, evidenciando uno de los procesos claves para el presente estudio denominado discordancia del Paleoceno (ER-PC). Sedimentos clásticos de la Formación Misoa del Eoceno temprano-medio provenientes del sur y suroeste comenzaron a rellenar la cuenca sobre una plataforma Paleocena (figura 2).

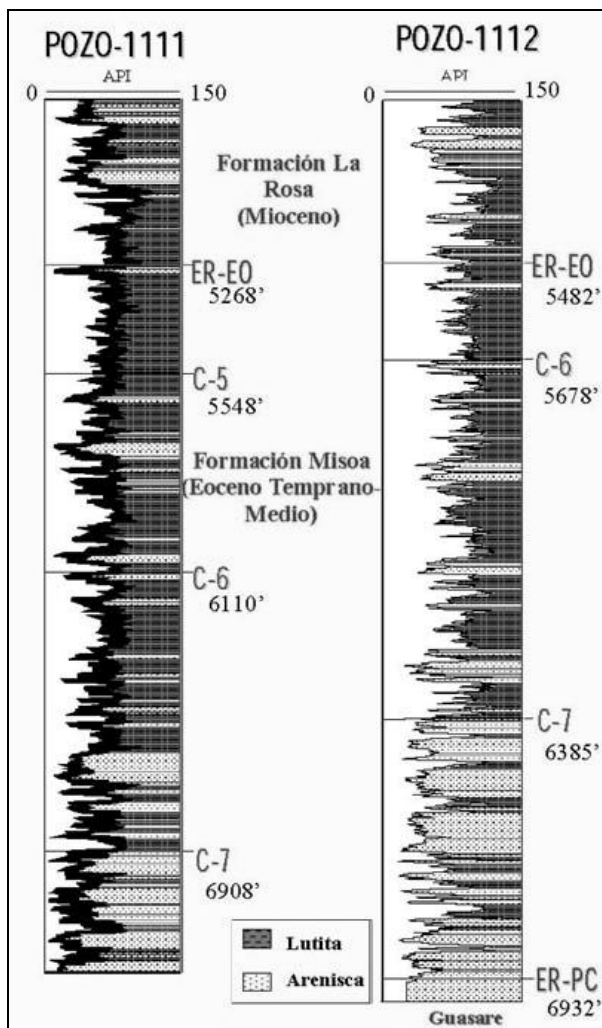


Fig. 2. Registro tipo de Rayos Gamma (GR), se indican dos pozos en la Región del Ático pertenecientes a la secuencia Eocena; Formaciones Misoa (miembros C-7, C-6, C-5) y Formación La Rosa de edad Mioceno. Obsérvese claramente las discordancias ER-PC y ER-EO.

#### 2.5 Dualidad estructural Eocena: fase tensional y rotación de bloques

En el Eoceno temprano durante la depositación de la Formación Misoa, la Placa del Caribe migró gradualmente hacia el sureste y con ella la antefosa (Lugo y Mann, 1995), la cual constituía el depocentro de la cuenca flexural. Para adecuarse a la nueva situación planteada, la antigua plataforma cretácica tuvo que combarse, creando para ello una serie de fallas normales escalonadas descendiendo hacia dicha antefosa. La flexura cortical creó además un posible alto estructural (Pestmann y col., 1996) de rumbo noroeste-sureste, que atraviesa la parte central del Bloque I. A su vez el empuje ejercido por la Placa del Caribe causó en la Cuenca de Maracaibo una rotación horaria (figura 3). La reactivación de las antiguas estructuras jurásicas con movimientos transcurrentes siniéstrales facilitó la rotación de los bloques en forma similar a un estante de libros cuya plancha superior se desploma, es decir el efecto "bookshelf" (Mandl, 1987). Dichas fallas transcurrentes de rumbo noroeste, entre las que se encuentran las fallas de Lama-Icotea y Lama-Este eran más bien transcurrentes oblicuas o transpresivas (oblique slip) porque presentaban también una componente vertical inversa (figura 3). Esta última, cortó las rocas competentes del Pre-Cretácico y Cretácico. Pero al llegar a los sedimentos del Eoceno se convirtió en sistemas de Riedels sintéticos y antitéticos. Por consiguiente, la deformación que ocurrió durante el Eoceno se caracterizó por una dualidad estructural causada por una fase tensional y otra transpresional, las cuales ocurrieron prácticamente al mismo tiempo.

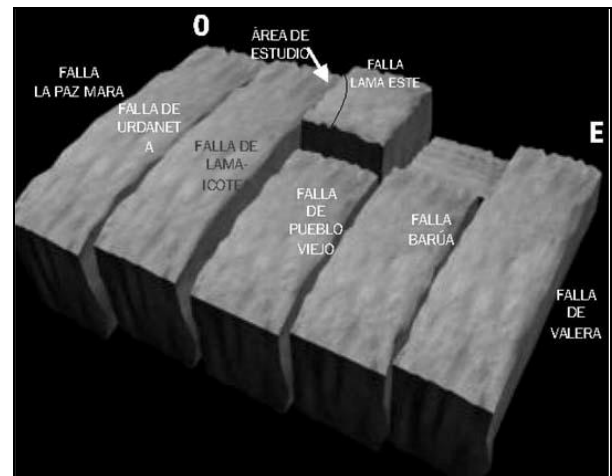


Fig. 3. Dualidad estructural y efecto Bookshelf en la Cuenca de Maracaibo. Nótese las fallas de Lama Icotea y Lama Este donde el área de estudio indica rotación horaria

#### 2.6 Fase compresiva e inversión estructural

La inversión estructural empujó hacia el este al bloque situado en el flanco occidental del alineamiento Lama-

Icotea. Originalmente esto se llevó a cabo a lo largo de la Falla Lama-Icotea, pero luego, el despegue prosiguió a lo largo de una falla sintética es decir, la Falla del Ático, con lo cual se dio por terminado el movimiento de la Falla de Icotea. Durante el Eoceno medio y tardío tuvieron lugar los primeros pulsos del levantamiento de Los Andes, lo cual repercutió en la Cuenca de Maracaibo bajo pulsos episódicos que causaron una deformación compresional. Esta fase compresiva era intermitente, ya que luego de cada pulso episódico volvía a reinar el ambiente tensional.

### 2.7 Eoceno Medio-Oligoceno

El avance de la carga tectónica proveniente del norte, genera hacia los 49 m.a. un levantamiento de alrededor de 60 m/m.a, desde el Eoceno medio-tardío hasta el Eoceno tardío-Oligoceno (35-25 m.a), momento en el cual gran parte de la cuenca quedó expuesta a erosión subaérea que borró un gran espesor de los sedimentos clásticos que habían sido depositados, dando lugar al desarrollo de la discordancia regional del Eoceno (ER-EO) (figura 2). (Escalona A., 2003).

### 2.8 Interpretación sísmico-estructural

En la investigación fueron identificados horizontes individuales definidos de la siguiente manera: discordancia del Eoceno (ER-EO), topes de las subunidades de la Formación Misoa C-4, C-5, C-6, C-7 y discordancia del Paleoceno (ER-PC). Las dos discordancias ER-EO y ER-PC fueron seleccionadas como los reflectores de mejor continuidad lateral interpretados en el Ático.

#### Interpretación de fallas en sísmica

La configuración estructural del Ático está definida por la falla Lama-Icotea, la falla del Ático y el conjunto de fallas Intra-Ático. La discordancia del Eoceno representa el límite superior de los eventos tectónicos que caracterizaron el Eoceno en la Cuenca de Maracaibo, donde la expresión sísmica permitió la identificación de los planos de fallas principales en su mayoría truncados contra la erosión, los cierres estructurales tanto laterales como a niveles más profundos (convergencia) hacia el Eoceno temprano y Paleoceno así como las relaciones de estos planos con respecto a la falla principal Lama-Icotea. La línea sísmica O-E (figura 4), se encuentra en el Ático norte mostrando las fallas principales Lama-Icotea, Ático, las secundarias intra-Ático 1 e intra-Ático 2 y el conjunto de fallas de Flanco Oeste las cuales no fueron objeto del presente estudio. Igualmente se observa la estructura en flor positiva generada por la transcurriencia de Lama-Icotea.

#### Falla Lama-Icotea

La falla Lama Icotea es el rasgo estructural principal

en la región del Ático, en sísmica se interpretó en las zonas donde se observó la menor preservación de amplitudes, geoméricamente representada por una línea continua y transversal a los horizontes sísmicos los cuales se truncan contra el plano de falla interpretado. Es una deformación estructural discontinua que conserva un buzamiento deprimido hacia el SO, se observó atravesando la discordancia del Eoceno (ER-EO) profundizándose a nivel del Cretácico. En la cobertura Miocena el plano de falla tiende a presentar una deflexión hacia el SE y un desplazamiento inverso de los bloques ubicados en cada lado de la falla, indicando la impresión de un evento tectónico a este nivel, sin embargo cabe resaltar que el análisis de Lama-Icotea en el Cretácico y el Mioceno se encuentra fuera de los límites temporales definidos en la presente investigación. La estructura se logró interpretar a lo largo de toda el área de estudio cuantificando una extensión de 10 Km. aproximadamente, por lo que se infiere su continuación más allá de los límites arbitrarios definidos hacia el norte y sur del área.

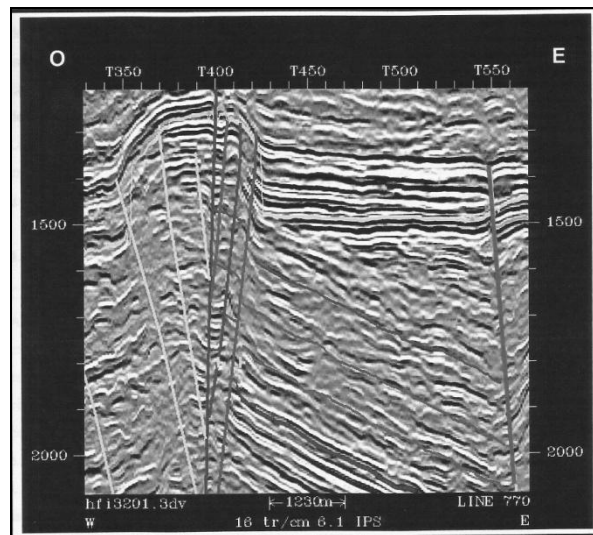


Fig. 4. Sección sísmica oeste-este donde se observa la configuración estructural del antiforame en el que se encuentra el bloque del Ático. Representando la falla principal Lama-Icotea (azul), falla del Ático (violeta), falla intra-Ático 1 (verde), falla intra-Ático 2 (vinotinto), fallas de Flanco Oeste en amarillo y de Flanco Este (rojo).

#### Falla del Ático

Constituye el límite estructural al este de la interpretación sísmica llevada a cabo en el Ático. Después de Lama-Icotea, representa la estructura con mejor definición en cuanto expresión sísmica se refiere, siendo a nivel del Eoceno la mejor zona en la que se interpretó esta deformación discontinua, y en donde los horizontes sísmicos pierden continuidad al chocar contra el plano de falla interpretado como falla del Ático. El cierre estructural en profundidad se observa hacia el Paleoceno, nivel donde el plano de falla converge respecto a la falla Lama-Icotea (ver figura 4 y 6).

### Fallas Intra-Ático

Dentro de los límites estructurales definidos por las fallas Lama-Icotea y Ático, se interpretaron tres planos de falla adicionales denominados Intra-Ático 1, Intra-Ático 2, e Intra-Ático 3. De acuerdo a la interpretación que se les dio a estas fallas, todas se muestran en la expresión sísmica restringidas a la secuencia Eocena y convergen en profundidad contra Lama-Icotea principal. Los otros planos de falla interpretados (conjunto de fallas de Flanco Oeste) convergen contra Lama-Icotea principal definiendo en conjunto una estructura en flor positiva asimétrica, tal como se puede observar en la visual 3D de los planos de fallas principales que fueron interpretados para el estudio (Figura 5).

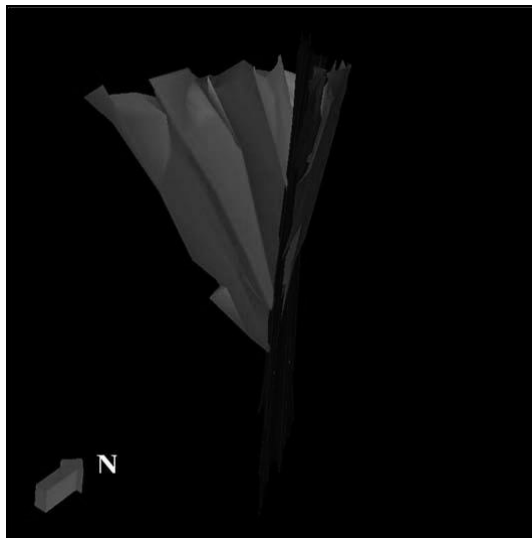


Fig. 5. Modelo 3D donde se observa la estructura en flor positiva (Po Up), definida por la falla principal Lama Icotea, la falla del Ático, y el conjunto de fallas del flanco oeste.

### 3 Geología estructural local

El evento estructural dominante y más importante se encuentra representado en el Bloque I por el sistema conjugado de fallas Lama-Icotea y la falla Lama-Este. La falla Lama-Icotea de rumbo noreste constituye el elemento estructural más prominente en el Bloque I, la cual subdivide el área en dos bloques principales e independientes, una fosa tectónica o graben al oeste de la falla, y un 'horts' o pilar tectónico hacia el este, también conocida como zona del Pilar. A lo largo del flanco este de la falla Lama-Icotea se desarrolla un bloque separado del Pilar por fallas inversas, el cual recibe el nombre del Ático, lugar donde se focaliza el presente estudio. El Ático es desde el punto de vista estructural, un bloque de forma elongada con dirección noreste-suroeste NESO, que se encuentra limitado al oeste por la falla Lama-Icotea y hacia su límite oriental por la falla del Ático. Este bloque ha sido altamente deformado y elevado

estructuralmente respecto a la zona del Pilar y a la zona de Flanco Oeste colindantes, por componentes transpresivos que han ocurrido a lo largo de la falla de Lama Icotea y por el mecanismo de desplazamiento de bloques generado por el sistema Lama Icotea – Ático. El área de El Pilar se interpreta como parte de un gran anticlinal asimétrico cuyo flanco más largo buza hacia el este, un eje axial de orientación N10°E y una inmersión hacia el norte. El anticlinal se encuentra truncado por los sistemas de fallas Lama-Icotea y Lama-Este hacia sus flancos y erosionado en su parte superior por el efecto de la erosión del Eoceno tardío (ER-EO). La región de Flanco Oeste o graben del Bloque I, difiere del 'horts' o bloque del Pilar tanto en su estructura como estratigráficamente. Este flanco está caracterizado por fallas con rumbo NE, subparalelas a Lama-Icotea que mergen en profundidad con ella hacia el SE, definiendo lo que en el presente estudio se le asignó el nombre de conjunto de fallas de Flanco Oeste (ver figura 5). Estas estructuras cortan la espesa secuencia sedimentaria que se depositó en el graben preexistente durante el Eoceno temprano-medio.

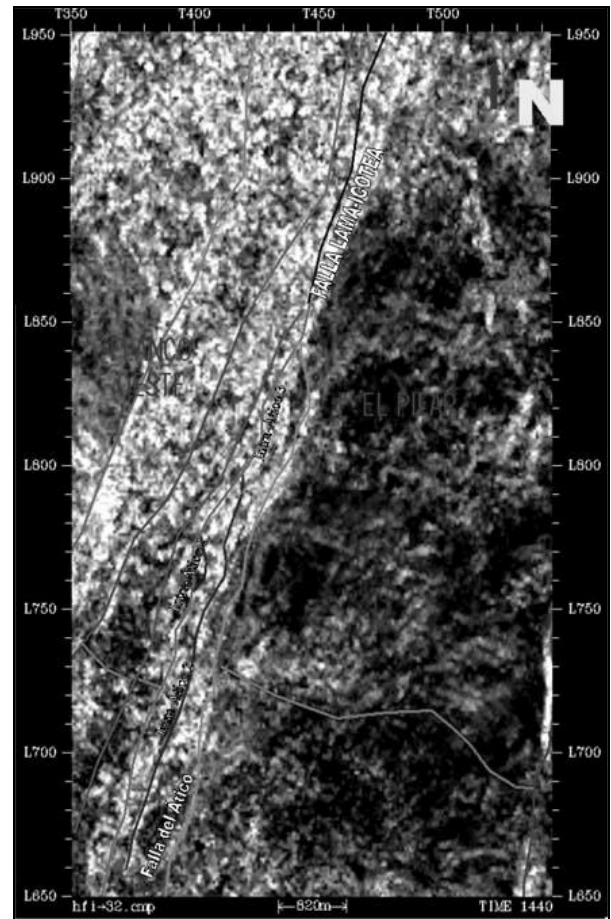


Fig. 6. Sección sísmica horizontal a tiempo constante de 1440 milisegundos mostrando la expresión de la estructura del Ático y las fallas interpretadas. Observe el contraste en amplitudes entre el Pilar y el flanco Oeste producto del desplazamiento de Lama - Icotea

#### 4 Configuración estructural del Ático en la parte septentrional del Bloque I

La zona de estudio presenta la particularidad de mostrar la parte terminal de las estructuras que se observan en el Bloque I, es decir las principales fallas que atraviesan el bloque de sur a norte. Representa el flanco oriental del anti-forme monoclinual con aspecto de estructura floral o de bloque desgarrado hacia arriba ('pop up') que ha sido comprimido hacia su base (figura 7).

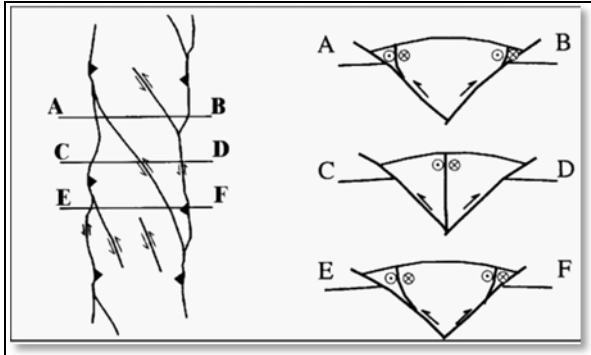


Fig. 7. Sistema coalescente idealizado de fallas siniéstrales que conllevan a la formación de estructuras "Pop Up". Tomado de González, 2004.

Los elementos estructurales principales que fueron identificados por medio de la información sísmica integrada con el análisis de buzamientos y registros de imagen (Figuras 8 y 9) son los siguientes:

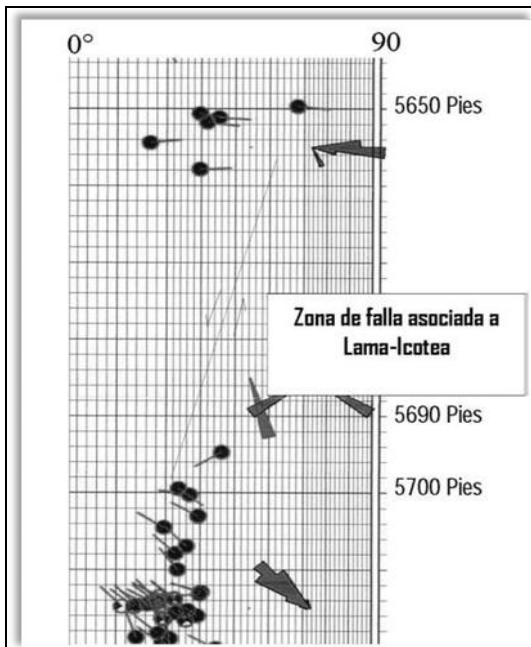


Fig. 8. Perfil de buzamientos del pozo VLA-1499, zona de falla asociada a Lama – Icotea. Obsérvese el cambio de dirección en los buzamientos de las capas entre 5650 pies y 5700 pies.

#### Falla Lama – Icotea

Su rumbo general es aproximadamente N15° a 20°E, es de comportamiento transcurrente con movimiento principal sinistral y un desplazamiento vertical relativo que se encuentra en el rango de 1000 pies a un nivel próximo de la discordancia del Eoceno hasta 2500 pies a nivel del Paleoceno, presentando un buzamiento deprimido de 77° SO en promedio (visto sólo a nivel del Eoceno). Esta falla de carácter sellante, es el límite principal de los yacimientos en esta área.

#### Falla del Ático

Es una falla subparalela a Lama – Icotea con orientación NE-SO de carácter inverso. Su desplazamiento vertical relativo es de 350 pies en promedio. Ciertamente esta falla es importante debido a que representa el límite este del Ático el cual lo separa estructuralmente del bloque del Pilar. Esta falla atraviesa toda la secuencia Eocena e incluso corta materiales competentes del Paleoceno lugar donde se observó con la ayuda de la sísmica, su cierre estructural contra Lama-Icotea hacia el suroeste.

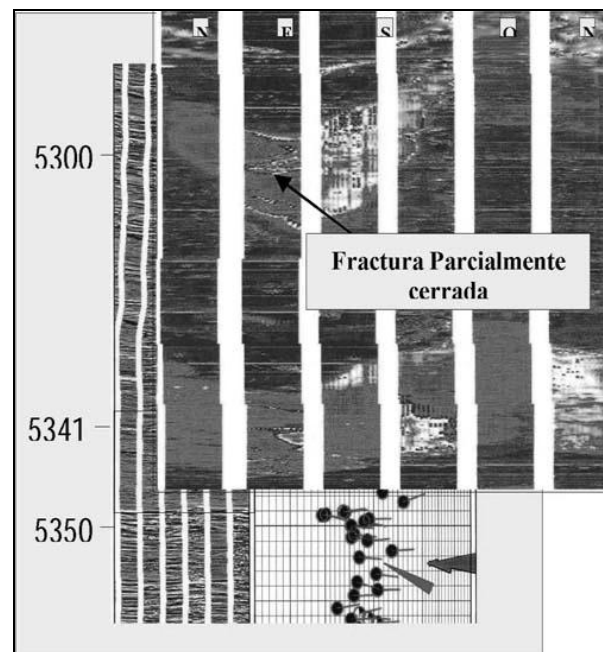


Fig. 9. Registro de imagen del pozo VLA-1499. Detalle que muestra una fractura natural parcialmente cerrada asociada a la zona de cizalla de la falla de Ático interpretada a 5341 pies en profundidad, localizada en el miembro C-1 de la Formación Misoa

#### 5 Evolución estructural del Ático en la parte septentrional del Bloque I

La evolución estructural de la falla Lama – Icotea en

tiempos mesozoicos y cenozoicos es muy compleja. Ésta presenta juegos estructurales distintivos de una tectónica compresiva y distensiva que la afectaron en ese periodo, provocando la configuración estructural actual. En la falla de Lama – Icotea está claramente reflejada la dualidad estructural que experimentó durante el Eoceno y que conllevó al desarrollo de estructuras como el Ático en un proceso de inversión estructural. Con respecto a este término, la inversión se define como un cambio de elevación estructural relativo al nivel regional por una fase subsecuente de deformación. Una inversión estructural positiva ocurre cuando las fallas extensivas que limitan las cuencas sedimentarias cambian el sentido de movimiento durante la tectónica compresiva y las cuencas resultan elevadas en diferentes grados. Geometrías de inversión tectónica a lo largo del sistema de fallas de Lama-Icotea al norte del Bloque I, fueron identificadas en las secciones sísmicas que se analizaron a lo largo del presente estudio. Las geometrías que resultan de un proceso de inversión tectónica como el observado en el flanco occidental del Alto de Icotea son:

- Desarrollo de un antiforame monoclinial sobre el alto estructural de la falla Lama-Icotea, reactivada.
- Rotación de bloques sobre planos de falla transcurrentes, desarrollando el Mecanismo de estantería de libros ('bookshelf') durante el Eoceno. (ver figura 2).
- Arqueamiento y elevación de la sección transversal de la parte central de la Cuenca de Maracaibo.
- Ocurrencia de una estructura en flor positiva y estructuras de tipo 'pop up' (El Ático), como un bloque superior de falla adyacente a la falla de Lama-Icotea reactivada por componentes transpresivos (ver figuras 7 y 10).

## 6 Cronología de la deformación

Comprender el origen de una estructura compleja como el Ático, precisa del conocimiento en primer lugar, de la evolución tectónica del flanco occidental del Alto de Icotea, el cual pone en evidencia una sucesión de eventos tectónicos que afectaron la parte central de la Cuenca de Maracaibo desde el Cretácico temprano hasta la actualidad.

- Tectónica de margen pasivo y activo (Cretácico inferior – Paleoceno tardío).
- Dualidad estructural Eocena (fase distensiva y fase compresiva).
- Fase compresiva (transcurrenencia durante el Neógeno).

Hervouët y col., 2005; propusieron un calendario de deformación similar en la parte septentrional de Los Andes de Mérida.

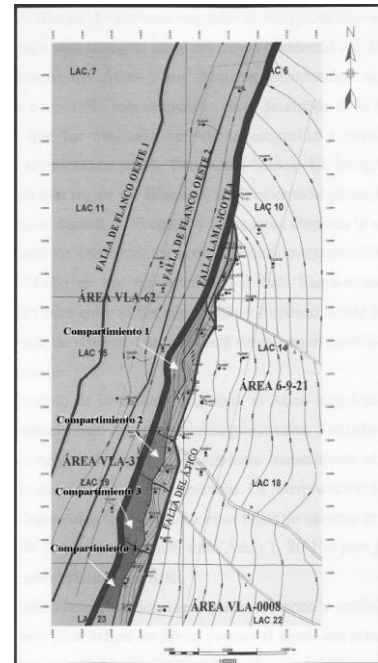


Fig. 10. Mapa estructural del miembro o subunidad C-7, mostrando los mejores compartimientos para perforación de nuevas localizaciones en el Ático.

## 7 Tectónica de margen pasivo y activo (Cretácico temprano-Paleoceno tardío)

Después de la fase tensional (rifting) ocurrida durante el Triásico-Jurásico, cuyo espacio propició el crecimiento de fallas con carácter normal como Lama-Icotea, sobrevino durante el Cretácico temprano en la Cuenca de Maracaibo, una etapa de margen pasivo con episodios distensivos (Pindell y Barret, 1990). Como consecuencia de estos episodios, ocurridos en una relativa calma tectónica, algunos planos de falla de origen jurásico crecieron hasta alcanzar los sedimentos del Cretácico tardío. (Figura 11 (1)).

La colisión de la Placa del Caribe con la Placa Suramericana durante el Paleoceno al oeste de la cuenca, da inicio al margen activo, escenario bajo el cual se depositaron las unidades paleocenas en la cuenca. Luego mientras migraba hacia el sureste la carga de napas que transportaba la Placa del Caribe, se produjo como producto de la sobrecarga, un frente de elevación el cual expone la cobertura sedimentaria paleocena, dando lugar al desarrollo del evento erosivo que actuó durante este periodo y definido como discordancia del Paleoceno (ER-PC), límite inferior de este estudio. En el Ático la Formación Marcelina del Paleoceno, fue removida por completo, igualmente en el Flanco Oeste y en el Pilar. La figura 11 (2), muestra la configuración estructural que hemos interpretado para el área de estudio durante el Paleoceno medio-tardío. Como se puede observar, en este periodo existió un crecimiento de fallas normales a nivel de las rocas competentes del Cretácico cuya génesis está relacionada con el reacomodo de la cuenca luego de la colisión en-

tre las placas del Caribe y Suramericana. Por otro lado la figura 11 (2), ilustra el desarrollo de la erosión del Paleoceno (ER-PC) y la remoción de buena parte de la plataforma carbonática paleocena (Formación Guasare) que se había depositado en este sector de la cuenca.

## 8 Fase de distensión y compresión durante el Eoceno

### 8.1 Fase distensiva

De acuerdo a Lugo y Mann, 1995, durante el Eoceno temprano la colisión de la Placa del Caribe continuó, lo que trajo como resultado una flexura cortical, y la ubicación de una antefosa al noreste de la Cuenca de Maracaibo, que sirvió como depocentro de la Formación Misoa. La Plataforma cretácica infrayacente tuvo que combarse hacia el nuevo depocentro (Bueno y Pinto, 1997). Lo que conllevó al crecimiento de fallas normales en la cuenca. Se interpreta esta etapa del Eoceno temprano a medio como predominantemente extensiva-transensiva. Esta relación de esfuerzos fue causada por la convergencia oblicua de las placas de Suramérica y del Caribe, la cual posiblemente reactivó estructuras existentes, y propició el crecimiento de la falla de Lama-Icotea como transcurrente sinistral en la cobertura sedimentaria clástica recién depositada. Como se puede observar en la figura 11 (3), Lama-Icotea se desarrolló como una falla de crecimiento durante esta fase evolutiva; su desplazamiento vertical estuvo condicionado por la continua sedimentación que ocurrió durante este periodo, por lo que no se descarta que su aparición y crecimiento en la cobertura Eocena fue sinsedimentario. Es posible que Lama-Icotea en su fase inicial ejerciera un control en la depositación diferencial de los espesores de la Formación Misoa.

Bajo estas condiciones tectónicas y continua sedimentación clástica, aparecen en el escenario nuevas fallas secundarias de carácter normal y sinsedimentarias, que convergen contra Lama-Icotea en profundidad, tal como se observa en la figura 11(4), entre ellas destaca la Falla del Ático, límite oriental del área de estudio.

### 8.2 Fase compresiva

Durante el Eoceno tardío una fuerte tectónica de compresión afectó la cuenca, invirtiendo a la mayoría de las estructuras existentes, tal como se observó en la geometría de las fallas analizadas en este estudio, figura 11 (5). Lama-Icotea y el conjunto de fallas de crecimiento normal asociadas a ella, cambiaron su comportamiento, desarrollando desplazamientos inversos bajo un régimen de compresión-transpresión.

El proceso de inversión estructural conllevó a la expulsión de los bloques elongados NE-SO limitados por estas fallas, apareciendo la geometría de una estructura en flor positiva asociada a la falla principal, el plegamiento de la parte alta de la estructura y la elevación del bloque del Áti-

co con respecto al Pilar.

El origen del bloque fallado del Ático, basados en los datos que se manejan en esta investigación, está probablemente relacionado con una etapa tardía de acortamiento de bloques por compresión-transpresión, donde la porción occidental del 'horts' se falló invirtiéndose con respecto a sí mismo durante este periodo, permitiendo la expulsión parcial del prisma que se encuentra restringido a Lama-Icotea y Ático, en lo que se conoce como una estructura 'pop up', desgarrada hacia arriba. La falla del Ático tal como se ha mencionado anteriormente, pudo haberse originado como una falla secundaria y sintética al desplazamiento inicialmente normal de Lama-Icotea en la etapa final de su reactivación en el Eoceno temprano, que durante la inversión estructural fue reactivada como falla inversa, compensando el desplazamiento normal con un desplazamiento inverso cuyo salto en promedio es de 350 pies. La figura 11 (5), muestra la configuración estructural del área de estudio para esta época, a este nivel el bloque del Pilar se encontraba estructuralmente por encima del graben de Flanco Oeste, siendo mayor la erosión causada por la discordancia del Eoceno (ER-EO) en este bloque, el cual borró el registro sedimentario superior (Arenas B) de la Formación Misoa. El proceso erosivo ocurrió en forma diferencial y condicionado por la tectónica de compresión que actuó en la región, resultando áreas positivas como el Ático más afectadas por la erosión. Según Arminio y col., 1997, para esta época no había ocurrido aún el basculamiento general de la Cuenca de Maracaibo hacia el sur.

### 8.3 Fase compresiva (transcurrencia durante el Neógeno)

Es a mediados del Plioceno cuando los efectos de la colisión de la Placa del Caribe evolucionan a transcurrentes dextrales. Las estructuras falladas previamente desarrolladas bajo flexión/tensión evolucionaron en transpresión a transcurrentes siniestrales, por efectos de la transcurrencia dextra de la falla de Oca. Una relativa oblicuidad ocurrió entre la falla de Lama-Icotea y el máximo esfuerzo principal NO-SE producido por la colisión de la placa del Caribe durante el Neógeno (Roure et al., 1997). La figura 11 (6), muestra la configuración estructural actual del margen occidental del Alto de Icotea al norte del Bloque I. La reactivación de Lama-Icotea como falla de transcurrencia sinistral desde el Post-Mioceno al Plioceno tardío define el movimiento dominante de la estructura en la actualidad. El Ático se alza como un alto estructural, cuyo registro sedimentológico es claramente menor por efectos de la erosión.



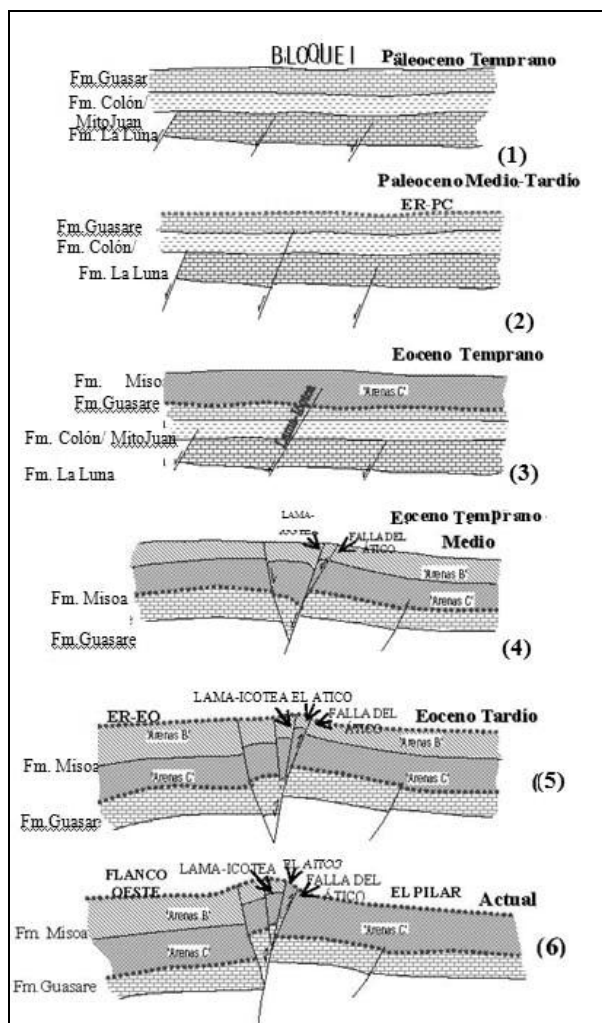


Fig. 11. Evolución estructural interpretada para el margen occidental del Alto de Icotea al norte del Bloque I

## 9 Conclusiones

La tectónica de placas ha sido el motor que impulsó las deformaciones que han ocurrido a lo largo de la evolución geológica de la Cuenca de Maracaibo en cuya parte central se encuentra ubicado el Bloque I. En este sentido la interpretación sísmico-estructural presentada en este trabajo para la región norte del flanco occidental del Alto de Icotea en lo que corresponde al bloque del Ático y sus fronteras estructurales, siguen modelos de tectónica de extensión e inversión sobreimpuestos en el desarrollo de la falla Lama-Icotea, a nivel de la cobertura sedimentaria Eocena representada por la Formación Misoa. La compleja configuración estructural que presentó esta región del Bloque I, se ubicó cronológicamente asociada a dos fases evolutivas ocurridas durante el Paleógeno y Neógeno, etapa en la cual, la Cuenca de Maracaibo formaba parte de una tectónica activa: extensión-transtensión entre el Eoceno temprano y Eoceno medio en que fue reactivada la falla Lama-Icotea como una falla

normal, e inversión tectónica entre el Eoceno tardío y el Plioceno donde la relación oblicua de esfuerzos NO-SE bajo un sistema transpresional sobrevino en el modelo de transcurrancia sinistral visto en el presente.

Como resultado del proceso de inversión estructural, el Ático surgió como un bloque de falla tipo "Pop Up" formado bajo los efectos transpresionales, el cual se encuentra limitado internamente por fallas Intra-Ático cuyo origen se asoció al movimiento transcurrente sinistral de la falla Lama-Icotea durante la etapa de inversión estructural.

La integración de la información sísmica con registros de pozo y análisis de buzamientos jugó un papel importante para definir en forma precisa el cierre estructural del bloque del Ático al norte del Bloque I.

Los análisis de perfiles de buzamientos en el Ático dentro de la cobertura sedimentaria Eocena representada por la Formación Misoa, permitieron definir para este estrecho bloque un buzamiento aproximado de  $35^{\circ}$ - $45^{\circ}$ SE. Por otra parte la cobertura Eocena presentó una disminución en espesor y un registro sedimentológico que estuvo restringido a las subunidades (miembros informales), C-7, C-6, C-5, C-4 y C-3 desapareciendo por completo las subunidades C-2 a B-1 de esta misma formación, revelando las notables diferencias de espesor que existen entre este bloque con respecto al graben de Flanco Oeste y el "horst" del Pilar, todo esto como consecuencia del evento erosivo (discordancia del Eoceno (ER-EO)), el cual estuvo estructuralmente controlado por el sistema conjugado de fallas asociadas a la falla Lama-Icotea a partir del Eoceno tardío.

El análisis de los mapas estructurales en profundidad y en tiempo sísmico, sugieren que la parte más alta de la estructura en el Ático se encuentra al sur del área de estudio, lo cual resultó coherente con los modelos estructurales que han sido propuestos para el Bloque I.

## Referencias

- Arminio, J., Bueno, E., Zubizarreta, J., Violino, B., Pirela, B., Araujo, M., Y Luzardo, C. (1997), Estilo Estructural de La Cuenca de Maracaibo desde el Centro del Lago hasta la Serranía de Misoa: Impacto de Datos Sísmicos Tridimensionales. Reporte Interno, PDVSA.
- Bueno, E. y Pinto J. (1997), Geología Estructural del Alto de Icotea, Lago de Maracaibo. Memorias VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geólogos. Tomo I, pp. 133-140.
- Dengo, C. y Covey, M. (1993), Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for traps styles and regional tectonics. AAPG bulletin, v.77, pp. 1315- 1337.
- Escalona, A. (2003), Regional Tectonics, Sequence Stratigraphy and Reservoir Properties of Eocene Clastic Sedimentation, Maracaibo Basin, Venezuela. Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin. pp. 11-152.
- Gonzalez L., Hervoiët Y., Dhont D. & Castrillo J.T., (2002), Poly-phased tectonics in the northern Venezuela Andes. 5th ISAG. Extended abstrac, 271 – 274.

González, L., (2004), Analyse structurale et evolution tectonique des Andes vénézuélienne nord orientales. Thèse Doctorat, L' Université de Pau. pp. 203-216.

Hervouët, Y., González, L., Dhont, D., Backe, G. y Castrillo, J. (2005). Deformation des Andes vénézuéliennes nord-orientales. Influence de l'allochtone caraïbe. Soc. géol. Fr., T. 176, N° 1, pp. 93-105.

Lugo, J. y Mann, P., (1995), Jurassic-Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin. American Association of Petroleum Geologists. Bolletin No 62. pp. 698-725.

Mandl, G., (1987), Tectonic deformation by rotating parallel faults : The 'bookshelf' mechanism. Tectonophysics, Vol. 141, pp. 277-216.

Pestman, P., Ghosh, S., Melendez, L. y Zambrano, E. (1996). El Eoceno en la Cuenca de Maracaibo: Incógnitas por resolver. Memorias VIII Congreso de Geofísica. pp 165-172.

Pindell J. L. & Barret S. F., (1990), Geological evolution of the caribbean región: a plate tectonics perspective. In: G. Dengo & J. E. Case, Eds, The Caribbean Region, The geology of North America. Geol. Soc. Amer., Vol. H, 405 – 432.

Roure, F., Colleta, B., De Toni, B., Loureiro D., Passalacqua, H. y Gou, Y., (1997), Within-plate deformations in the Maracaibo and East Zulia basins, western Venezuela. Marine and Petroleum Geology, Vol.14, No. 2, pp, 139-163.

**Recibido:** 24 de diciembre de 2012

**Revisado:** 27 de noviembre de 2013

**González, Leonardo:** Ingeniero geólogo, egresado de la Universidad de los Andes, núcleo Mérida - Venezuela en 1994. Doctor en Ciencias de la Litosfera 2004 realizado en la Universidad de Pau y países del adour – Francia. Actualmente trabaja como profesor titular en la Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica.

**Jaramillo, Alejandro:** Ingeniero geólogo, egresado de la Universidad de los Andes, núcleo Mérida – Venezuela en 2005. Actualmente trabaja en la empresa halliburton. Correo electrónico: Jaramillo:ajaramillo@lgc.com

**Labrador, Tomas:** Ingeniero geólogo, egresado de la Universidad de los Andes, núcleo Mérida – Venezuela. Actualmente trabaja en pdvsa la salina, cabimas estado Zulia. Correo electrónico: labradort@pdvsa.com

**Barrios, Edixon:** Ingeniero geólogo, egresado de la Universidad de los Andes, núcleo Mérida – Venezuela. Actualmente trabaja en pdvsa la salina, cabimas estado Zulia. Correo electrónico: barrioseg@pdvsa.com

**Elberg, Maria Elisa:** Ingeniero civil, egresada de la Universidad de los Andes, núcleo Mérida – Venezuela en 1992. Magister Scientiae en Ingeniería Estructural 2002. Doctora en Ciencias Aplicadas a la Ingeniería 2014. Actualmente trabaja como profesor asociado en la Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Correo electrónico: mariael@ula.ve

