

PROSPECTIVIDAD DE HIDROCARBUROS EN LA CUENCA VAUPÉS-AMAZONAS, COLOMBIA

Mario García-González¹; Luis Enrique Cruz-Guevara¹; Ricardo Mier-Umaña¹

RESUMEN

La evaluación de la prospectividad de hidrocarburos en la Cuenca frontera Vaupés-Amazonas con un área de 155.000 km² indica que la región con mejor potencial de gas está situada en la región sur de la cuenca y está también relacionada con la Cuenca de Solimões, la cual es productora de petróleo y gas en Brasil. Los potenciales yacimientos de hidrocarburos están relacionados a estructuras compresivas formadas durante la Orogenia Herciniana, las cuales se observan en las líneas sísmicas de la cuenca. Los modelos geoquímicos indican que los hidrocarburos fueron generados a finales del Pérmico y migraron durante el Mesozoico temprano. Los niveles altos de carbono orgánico total, así como los altos niveles de maduración termal de los *shales* del Devónico en la Cuenca de Solimões indican que la Cuenca Vaupés-Amazonas también puede presentar un potencial de yacimientos no convencionales de gas tipo *shale gas*.

Palabras clave: Hidrocarburos, Prospectividad, *Shale*, Gas, Vaupés, Amazonas, Geoquímica, Sísmica

HYDROCARBON PROSPECTIVITY IN THE VAUPES-AMAZONAS BASIN, COLOMBIA

ABSTRACT

The assessment of hydrocarbon prospectivity in the Vaupés-Amazon Basin frontier with an area of 155,000 km² indicates that the southern area presents the highest gas potential, and that is also related with the oil and gas potential in the Solimões Basin in Brazil. The potential hydrocarbon reservoirs are related to compressive structures, which were identified in seismic lines of the Vaupes-Amazonas Basin, and formed during the Hercinian orogeny. The Geochemical models indicate that hydrocarbons were generated in the organic-rich Devonian shales in the late Permian and migrated later in the early Mesozoic. High TOC contents and high maturity maturation levels found in the Devonian organic-rich shales in the Solimões Basin, indicate that the Vaupés-Amazon Basin may also have a potential for unconventional deposits of shale gas type.

Keywords: Hydrocarbon, Prospectivity, Shale, Gas, Vaupés, Amazonas, Geochemistry, Seismic.

¹ Grupo de Investigaciones en Geología de Hidrocarburos y Carbones, Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander

INTRODUCCIÓN

La cuenca Vaupés-Amazonas con un área de 155.000 km² es la de mayor extensión de las cuencas sedimentarias colombianas; con un mínimo de cubrimiento sísmico y de trabajos de exploración petrolera, la relación de kilómetros de sísmica con respecto al área de la cuenca es de 0.01; en consecuencia, esta cuenca frontera es la más desconocida en el país. En este artículo se presenta una visión general de la prospectividad de hidrocarburos de la cuenca, con base en datos de muy bajo cubrimiento; sin embargo se identifica la región de mejor prospectividad y también se plantea la presencia de un sistema petrolífero del Paleozoico Superior antes desconocido en esta cuenca.

La exploración de hidrocarburos en la Cuenca Vaupés-Amazonas se ha desarrollado esporádicamente y se limita a la adquisición de cinco programas sísmicos que suman tan solo 1.500 km de sísmica, como también a la perforación de un pozo, el cual no aportó información significativa ya que fue localizado en una margen del depocentro de Vaupés. En contraste, la información sísmica obtenida a lo largo de los ríos Caquetá,

Putumayo y Amazonas muestra perfiles sísmicos con características similares a las encontradas en las provincias petrolíferas de la Cuenca Solimões en Brasil.

La geología de la Amazonia Colombiana, comprendida entre el Río Guaviare y el Río Amazonas y entre el Piedemonte Andino y el Río Negro, ha sido estudiada por principalmente por Galvis *et al.* (1979), Hoorn (1994a y b) y Kaandorp *et al.* (2006).

GEOLOGÍA GENERAL DE LA CUENCA

La Cuenca Vaupés-Amazonas es considerada una cuenca intracratónica con una extensión aproximada de 155.000 km², está localizada al sur de Colombia; limita al norte con el río Guaviare y el Arco del Vaupés (VA), al sur con los ríos Putumayo y Amazonas y se extiende hacia la Cuenca de Solimões en Brasil. Al oeste limita con el Alto del Yari y el Arco de Iquitos y al este con el Complejo Migmatítico del Mitú, en el límite internacional con Brasil y el Arco de Caruarí en Brasil (FIGURA 1). Cubre en su totalidad los departamentos de Guaviare, Vaupés, Amazonas y parcialmente Putumayo, Guainía, Caquetá y Meta.

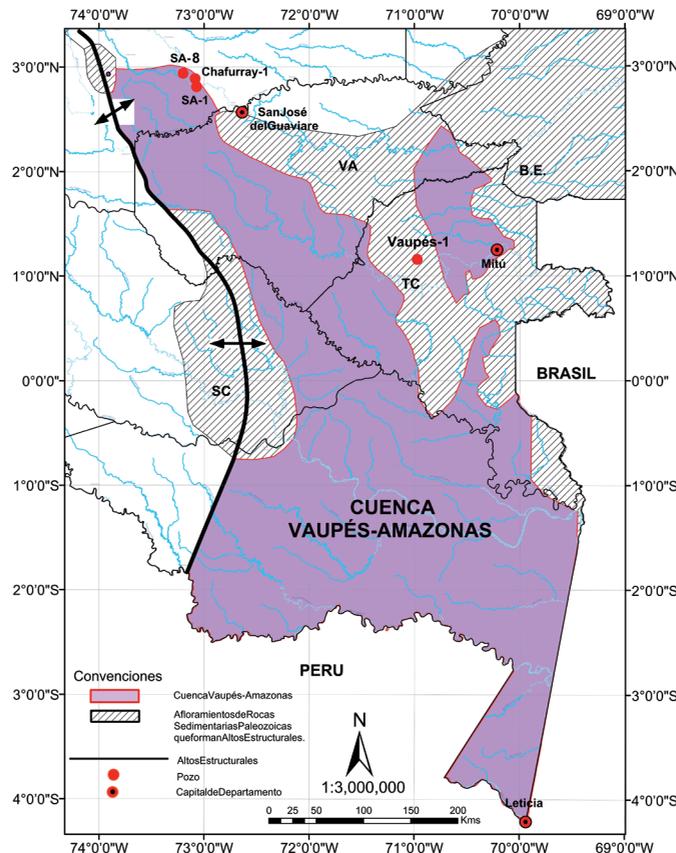


FIGURA 1. Ubicación y límites de la Cuenca Vaupés-Amazonas. Arco de Vaupés (VA); Serranía de Chiriquete (SC); Alto Trampa-Carurú (TC). Modificado de Barrero *et al.* (2007).

Las principales fases del tectonismo en la región Amazónica tuvieron lugar en el Precámbrico y en el Paleozoico (Acosta *et al.*, 1988). Posteriormente, durante el Mesozoico y el Cenozoico se registraron eventos de menor intensidad. La FIGURA 2 resume la estratigrafía y los eventos tectónicos de la cuenca.

Durante el Precámbrico ocurrieron por lo menos dos fases tectónicas principales. El primer evento tectónico se denomina “Orogenia transamazónica”, el cual tuvo lugar hace aproximadamente 1.700 Ma (Galvis *et al.*, 1979). A finales del Precámbrico (900 Ma), se formaron varios *rifts* de dirección noroeste-sureste, con la subsecuente sedimentación en sus depocentros, los cuales están limitados por fallas de zócalo sin expresión superficial (FIGURA 3).

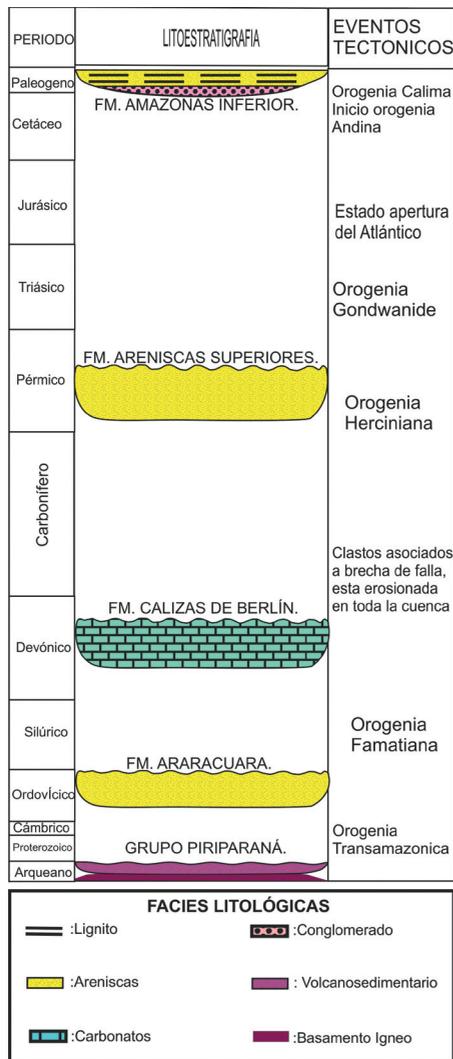


FIGURA 2. Cronolitoestratigrafía de la Cuenca del Amazonas Colombiana y eventos tectónicos. Información estratigráfica de Galvis *et al.* (1979); Herrera y Velásquez (1978); Bogotá (1983) y Hoorn (2006).

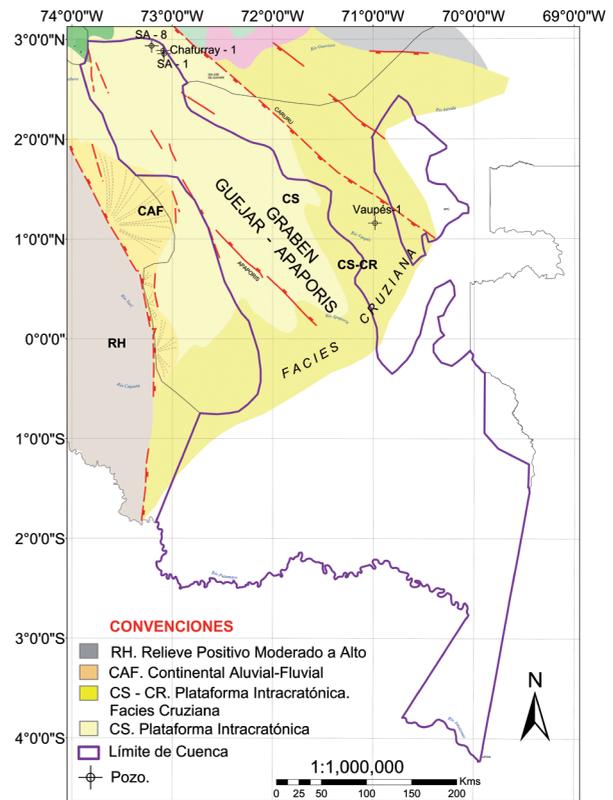


FIGURA 3. Distribución de facies sedimentarias y ambiente tectónico de Colombia durante el Paleozoico inferior (Cámbrico, Ordovícico y Silúrico). Modificado de Cediel *et al.* (2003). Nótese la permanencia del Graben Güejar-Apaporis, el cual fue originado en el Proterozoico. Como lo ilustra la figura, en la Cuenca del Amazonas se presentó la sedimentación en ambientes marinos de plataforma (facies Cruziana y facies de arenas) y en ambientes aluviales.

Durante el Proterozoico, en el área del Amazonas, se produjeron varios eventos de fallamiento normal debido al régimen tectónico regional extensivo, los cuales dieron lugar al valle tipo *rift* de La Trampa y hacia el norte de la cuenca a la formación del Graben Güejar-Apaporis.

A principios de la era Paleozoica el área sufre una suave subsidencia que se presentó principalmente hacia el suroccidente en la Cuenca de Solimões, en donde de acuerdo con Mosmann *et al.* (1986), el Paleozoico sedimentario se presenta en dos secuencias de edades: -Silúrico al Devónico y -Carbonífero al Pérmico. En la Cuenca Vaupés-Amazonas solamente se conocen afloramientos del Paleozoico de la Formación Araracuara (Herrera y Velásquez, 1978). Sin embargo, las líneas sísmicas de los ríos Putumayo, Amazonas y Caquetá indican la presencia de secuencias sedimentarias con características sísmicas similares a las observadas en la Cuenca Solimões, por esta razón no se descarta que una

parte de la sección del Paleozoico esté presente en algunos depocentros de la Cuenca Vaupés-Amazonas. Así mismo, Galvis *et al.* (1979) citan la presencia de cantos rodados de calizas denominados Formación Calizas de Berlín, de edad Devónico, la cual es de la misma edad que las formaciones Erere y Curua de la Cuenca Solimões.

Durante el Ordovícico se presentó un levantamiento de la cuenca, el cual también está reportado en las Cuencas Solimões y Amazonas en Brasil (Mosmann *et al.*, 1986). En el extremo noroccidental de la cuenca, este levantamiento se relaciona con el cuerpo intrusivo denominado Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, datada en 430 a 449 Ma (Ordovícico) por el método K/Ar (Pinson *et al.*, 1962).

La Orogenia Herciniana, generó levantamientos y hundimientos en el cratón, observándose principalmente levantamientos en la Cuenca Vaupés-Amazonas y subsidencia en la Cuenca Solimões. Posteriormente se presenta un evento de subsidencia tectónica en las cuencas Vaupés-Amazonas y Solimões depositándose la Formación Areniscas Superiores, de edad Pérmica en la Cuenca Vaupés-Amazonas y Grupo Tapajos de edad Carbonífero superior a Pérmico en la Cuenca Solimões (Mosmann *et al.*, 1986).

La secuencia del Mesozoico no aflora en la Cuenca Vaupés-Amazonas (FIGURA 2), sin embargo, los trabajos de Mosmann *et al.* (1986) indican de acuerdo a líneas sísmicas de la Cuenca Solimões, que la Formación Alter do Chao se extiende desde el sur en la Subcuenca Jandituba hacia el norte en la Cuenca de Vaupés-Amazonas. Esta formación está limitada en su base y tope por discordancias que indican actividad tectónica durante el Mesozoico. Ramos (1988) reporta la presencia de fallas con movimientos de cizalla durante el Cretáceo, el cual formó importantes lineamientos estructurales compuestos de anticlinales asimétricos asociados a fallamientos inversos.

En el Cenozoico la depositación se presentó en el Mioceno temprano, con aportes de sedimentos fluviales provenientes del Escudo de Guyana y en el Mioceno medio cuando tuvo lugar la gran transgresión marina marcada por el ingreso del mar por una conexión con el Mar Caribe, conocida como el portal de Guayaquil. Los depósitos producto de esta transgresión marina del Mioceno medio fueron denominados como el Cenozoico inferior y superior Amazónico por Galvis *et al.* (1979). Esta formación presenta dos secuencias con características diferentes: -la secuencia inferior de afinidad marina a salobre y -la secuencia superior de origen fluvio-lacustre (Hoorn, 1993).

La “Unidad Terciario Superior Amazónico”, llamada informalmente Unidad Areniscas de Mariñame en Colombia por Hoorn (1994a), está compuesta por conglomerados ferruginosos, areniscas cuarzosas con micas como mineral accesorio, intercaladas con areniscas lodosas, arcillas y lignitos (Hoorn, 1994a).

Los depósitos más recientes de la Cuenca Vaupés-Amazonas son del Neógeno y corresponden con areniscas eólicas en el norte de la cuenca. Posteriormente, un nuevo cambio climático estableció un régimen de alta pluviosidad, imperante hasta la actualidad, con la depositación de la Unidad de Terrazas Fluviales (Hoorn, 1994a).

La FIGURA 4 ilustra la correlación estratigráfica entre las cuencas Vaupés- Amazonas en Colombia, y Solimões y Amazonas en Brasil. Se observa que la secuencia sedimentaria se ha erosionado hacia el este, de tal manera que en Colombia se presentan grandes secciones estratigráficas erodadas, mientras que en Brasil, en la Cuenca de Solimões la secuencia del Paleozoico está más completa y en la Cuenca del Amazonas la mayoría de la sección estratigráfica del Paleozoico inferior y superior está presente.

MARCO TECTONICO Y ESTRUCTURAL

El estilo estructural de la Cuenca Vaupés-Amazonas está caracterizado por la presencia de mesas y cuevas, afectadas por un sistema de fallas de zócalo con expresión geomorfológica vertical de los planos de falla como se explica en el corte conceptual en orientación norte-sur de la Cuenca Vaupés-Amazonas ilustrado en la FIGURA 5. Se presentan fallas y lineamientos en dos direcciones dominantes: -la primera NNE-SSW, de probable edad Proterozoica, que delimita bloques levantados y hundidos a modo de valles tipo *rift* intracontinentales (La Trampa); -la segunda, con dirección NW-SE probablemente originada en el Proterozoico inferior y con reactivación postcretácico de tipo rumbo-deslizante (Etayo *et al.*, 1983).

Los bloques levantados que conforman la Cuenca del Vaupés-Amazonas son: -el Alto de Vaupés al norte, -la Serranía de Chiribiquete en la parte central de la cuenca, -la Serranía de Carurú en la parte este y -la Serranía La Trampa al sur. Estos altos estructurales están conformados por rocas plegadas del Precámbrico y del Paleozoico inferior y en la parte más noreste de la cuenca por el Complejo Migmatítico de Mitú (ver FIGURA 1).

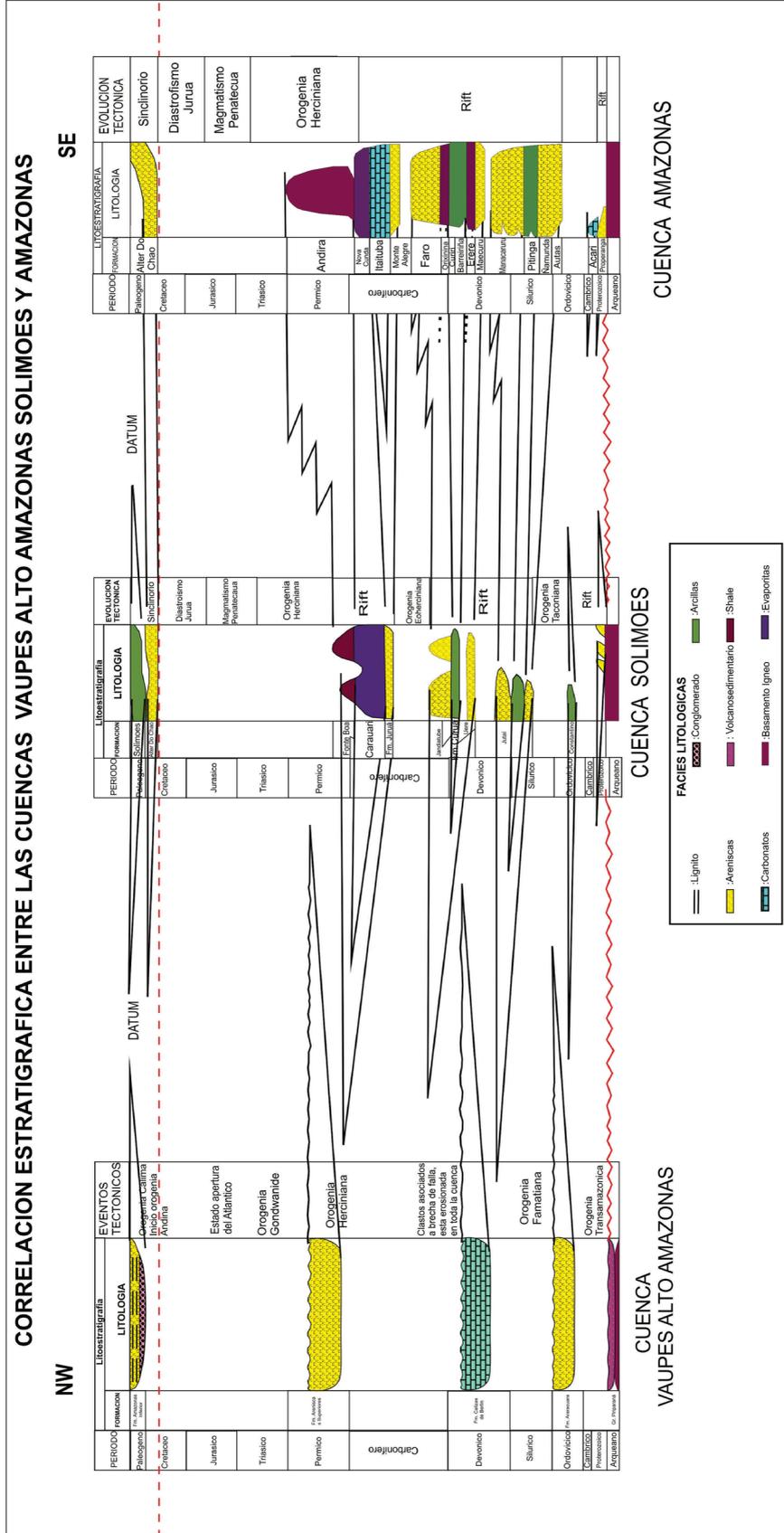


FIGURA 4. Correlación estratigráfica entre las cuencas Vaupés-Amazonas (Colombia), Solimões (Brasil) y Bajo Amazonas (Brasil). Nótese cómo la secuencia sedimentaria se va acunando hacia el este. En el bajo Amazonas del Brasil la secuencia es más espesa y completa, mientras que en Colombia gran parte de la secuencia se ha erosionado. Esta figura ilustra cómo la Cuenca Vaupés-Amazonas ha estado aislada de la Cuenca Solimões por altos estructurales.

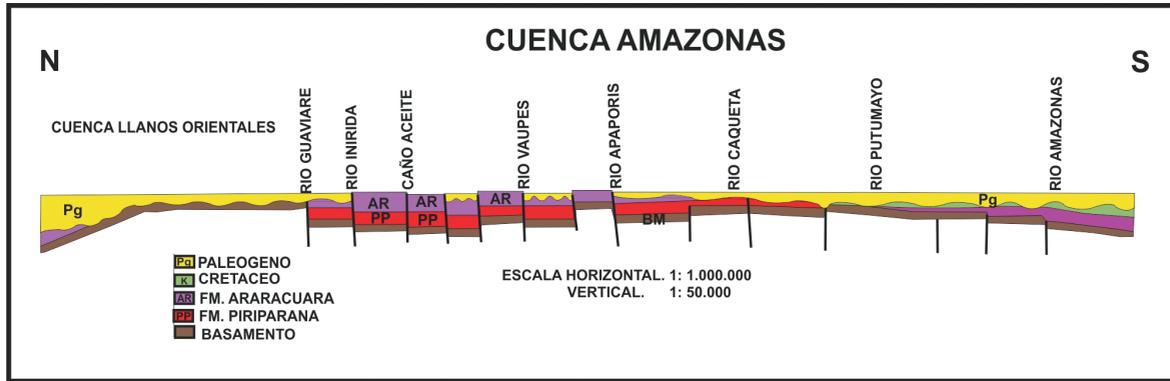


FIGURA 5. Corte estructural conceptual de la Cuenca Vaupés-Amazonas en dirección norte-sur. Modificado de Córdoba *et al.* (1992).

La orientación de estos altos estructurales de la Amazonia Colombiana (NNW–SSE) es similar a la de los arcos de Carauri y Purús en la Cuenca Solimões del Brasil, como también a la del Arco de Iquitos en el Perú.

En la Cuenca Vaupés-Amazonas se observa una red de lineamientos regionales con una distribución sistemática en sus orientaciones, producto del tectonismo relativamente reciente de grandes bloques, el cual al parecer se relaciona con la formación del sistema andino. Según Galvis *et al.* (1979), estos lineamientos están relacionados con una tectónica desde los inicios del Precámbrico. Este importante sistema de fallas y lineamientos presenta dos direcciones predominantes, una NNE-SSW y una segunda NW-SE (FIGURA 6).

Las fallas con dirección NNE-SSW de probable edad Proterozoica delimitan bloques levantados y hundidos a modo de *graben* y *horst*. Estas fallas presentaron actividad durante el Paleozoico inferior, algunas de ellas fueron activas en el Cenozoico y permanecen activas actualmente.

La segunda dirección predominante de fallas NW-SE, fueron probablemente originadas en el Proterozoico inferior y con reactivación en el post-cretácico (FIGURA 6). Mosmann *et al.* (1986) describen dos patrones de lineamientos estructurales en las cuencas de Solimões y Amazonas con orientaciones NE-SW y NW-SE, los cuales coinciden con los reportados en la Cuenca Vaupés-Amazonas. De acuerdo con Mosmann *et al.* (1986), los lineamientos con orientación NE-SW están asociados a pliegues formados por esfuerzos compresivos que se presentaron en el Jurásico.

INFORMACION GEOFÍSICA

La FIGURA 7 tomada del mapa de Colombia de Anomalia Bouguer Total (Briceño *et al.*, 2008) insinúa

la delineación de tres depocentros: Chiribiquete, Vaupés y Amazonas, hacia el sur; sin embargo, esta delineación no es muy clara. Con base en la información gravimétrica (Córdoba *et al.*, 1992) generaron un mapa estructural al tope del basamento en donde se identifican los siguientes depocentros: -El Depocentro del Caguán, localizado al W de la Cuenca Vaupés-Amazonas, que alcanza 1.500 m de profundidad y está separado del depocentro de Chiribiquete por el Alto del Yari; -el Depocentro de Chiribiquete, localizado al centro de la cuenca, tiene una profundidad promedio de 2.000 m y está separado del depocentro del Vaupés por el Alto de Apaporis; -el Depocentro del Vaupés, localizado al E de la cuenca, el cual alcanza una profundidad de 4.000 m y limita al este con el Complejo Migmatítico de Mitú (FIGURA 8).

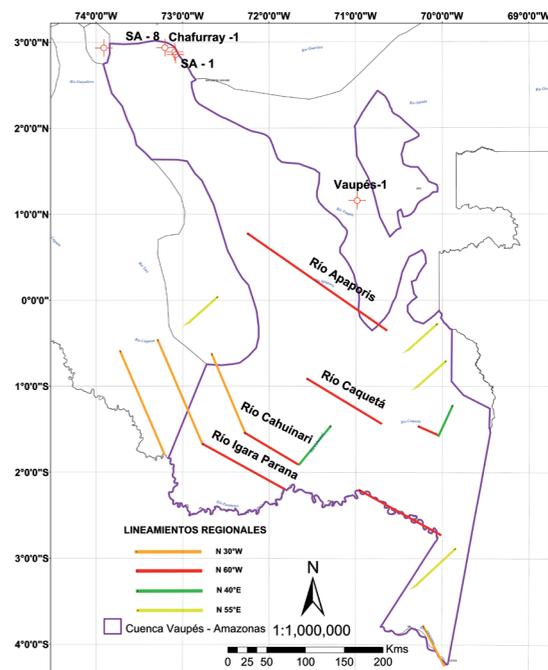


FIGURA 6. Principales fallas y lineamientos estructurales presentes en la Cuenca Vaupés-Amazonas.

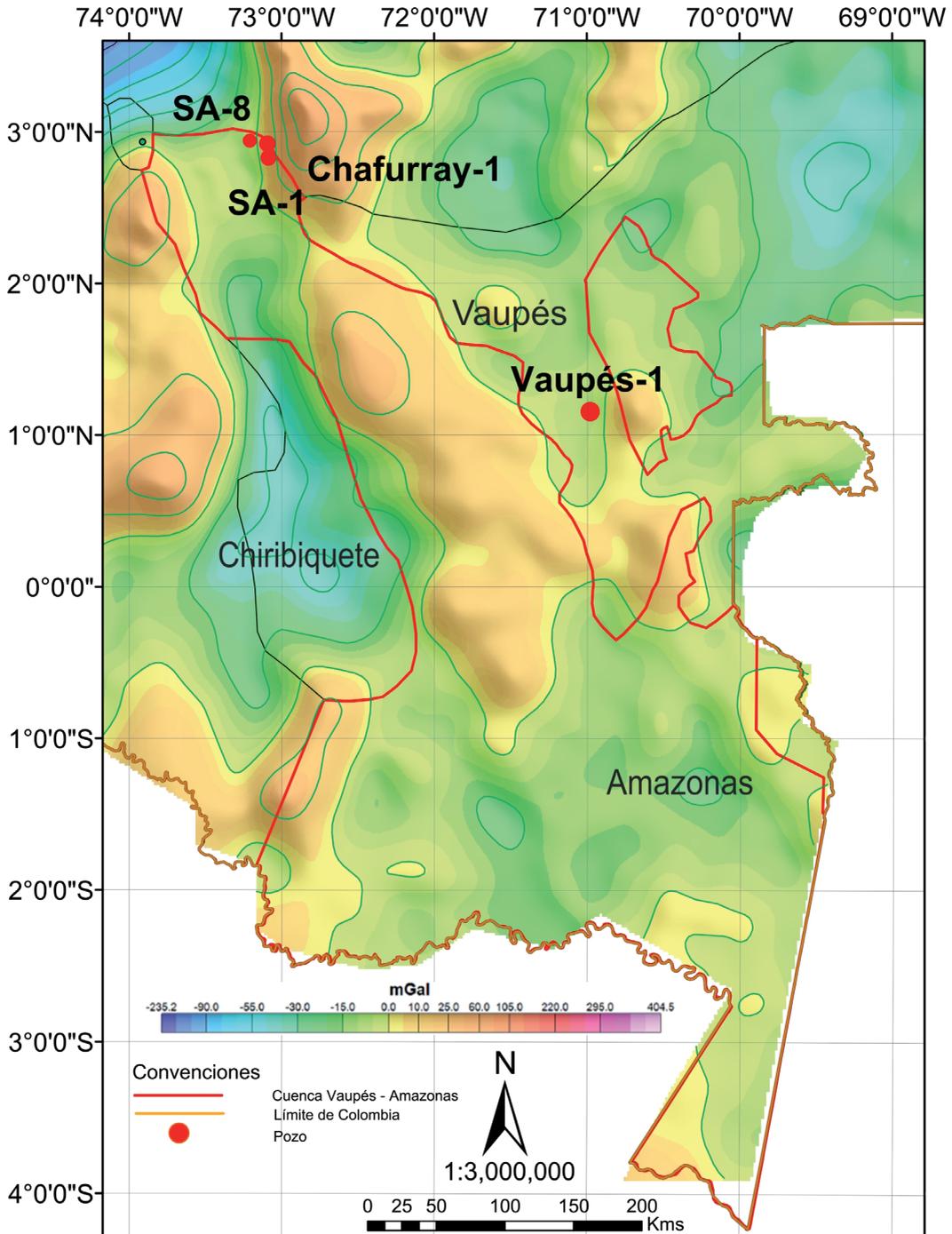


FIGURA 7. Mapa de anomalía total de Bouguer. Se pueden observar dos depocentros en la Cuenca Vaupés-Amazonas, correspondientes a las subcuencas de Chiribiquete y Vaupés. Modificado de Briceño *et al.* (2008).

La información sísmica de la Cuenca Vaupés-Amazonas es muy escasa y se reduce a cinco programas sísmicos: Río Putumayo con 540 km, Río Amazonas con 116 km, Río Caquetá con 344 km, Río Guaviare Occidental con 220 km y Río Guaviare Oriental con 280 km (ver FIGURA 9). En el presente trabajo se incluyen ejemplos de cuatro líneas sísmicas en la Cuenca Vaupés-Amazonas.

La interpretación de las líneas sísmicas que se presentan a continuación fue realizada mediante analogías con los trabajos de Pietrobon (2006) y de Mosmann *et al.* (1986) quienes reportan líneas sísmicas de la Cuenca Solimões con características muy similares a las encontradas en la Cuenca Vaupés-Amazonas.

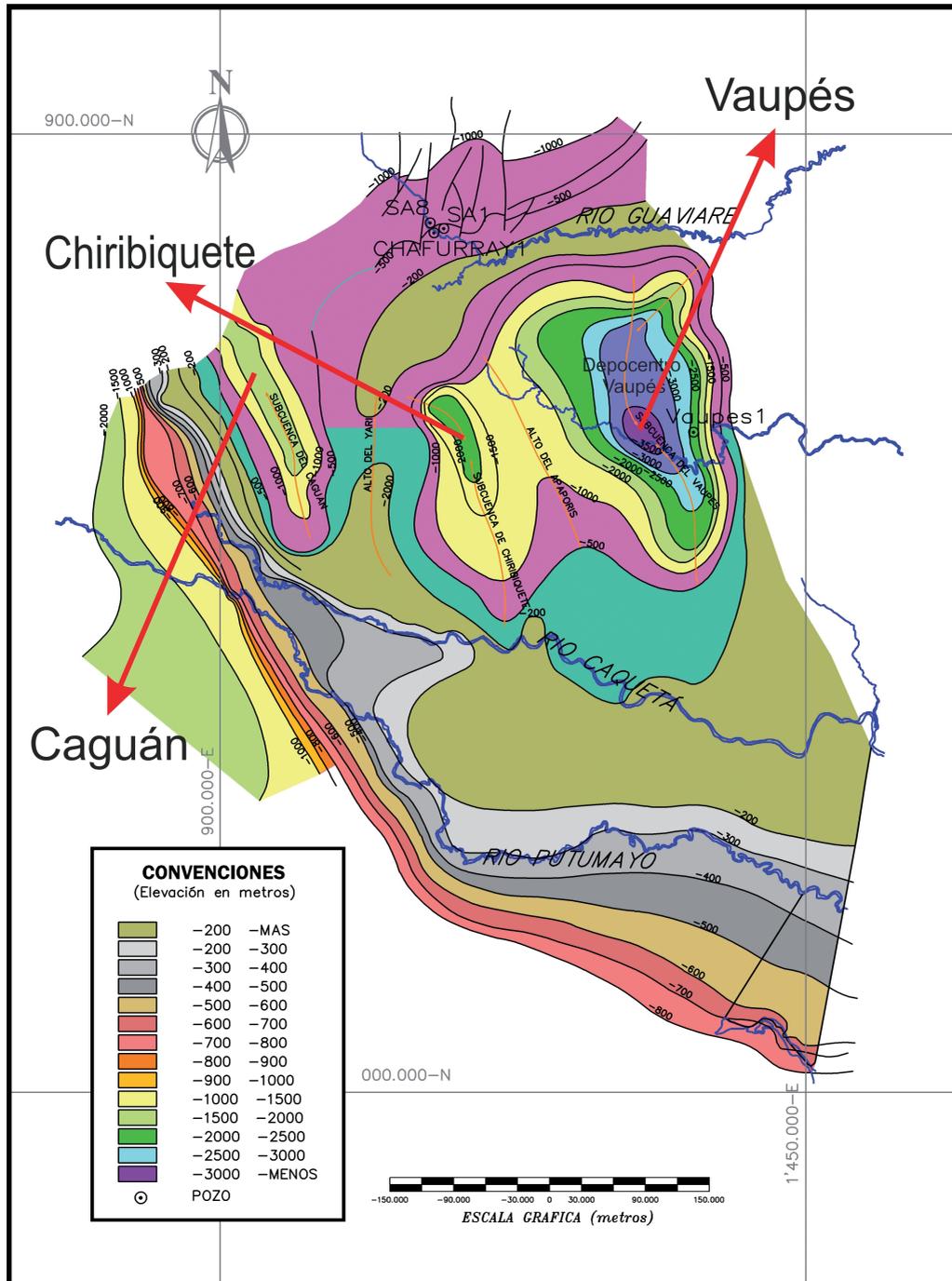


FIGURA 8. Localización de depocentros a partir de estudios de gravimetría y sísmica. Las curvas ilustran el tope del basamento, pudiéndose identificar tres subcuencas o depocentros en el área de estudio que son de oeste a este: Caguán, Chiribiquete y Vaupés.

Las líneas sísmicas de la cuenca Vaupés-Amazons se caracterizan por presentar horizontes sísmicos subhorizontales con excelente continuidad lateral en donde fue posible identificar tres horizontes correspondientes a discordancias fácilmente reconocibles en la mayoría de las líneas sísmicas con las siguientes características:

El horizonte No. 1: separa una secuencia caracterizada por estratos con reflexiones altas y con amplitud considerable, correspondiente al basamento cristalino de una secuencia arenosa basal suprayacente que puede ser del Paleozoico. La reflexión del basamento cristalino se encuentra entre 500 - 550 milisegundos en el Río Caquetá y se profundiza hacia el sur encontrándose este

mismo reflector a 650 y 750 milisegundos en los ríos Putumayo y Amazonas, respectivamente.

El horizonte No. 2: corresponde al límite de la secuencia arenosa basal y un amplio paquete de rocas calcáreas de espesor constante en el área sur, pero que varía en la parte norte de manera considerable. Constituye un contacto discordante y sus reflexiones se caracterizan por picos positivos claramente reconocibles en las líneas disponibles en el área de estudio. Este horizonte se encuentra a 500

milisegundos en el Río Amazonas, 420 milisegundos en el Río Putumayo y 400 milisegundos en el Río Caquetá.

El horizonte No. 3: corresponde a un contacto claro, inconforme entre el paquete de calizas y la secuencia arenosa del Cenozoico. Este horizonte es evidente en la región sur, a diferencia de la región norte donde es menos claro. Este horizonte se encuentra a 300, 250 y 200 milisegundos en los Ríos Amazonas, Putumayo y Caquetá, respectivamente.

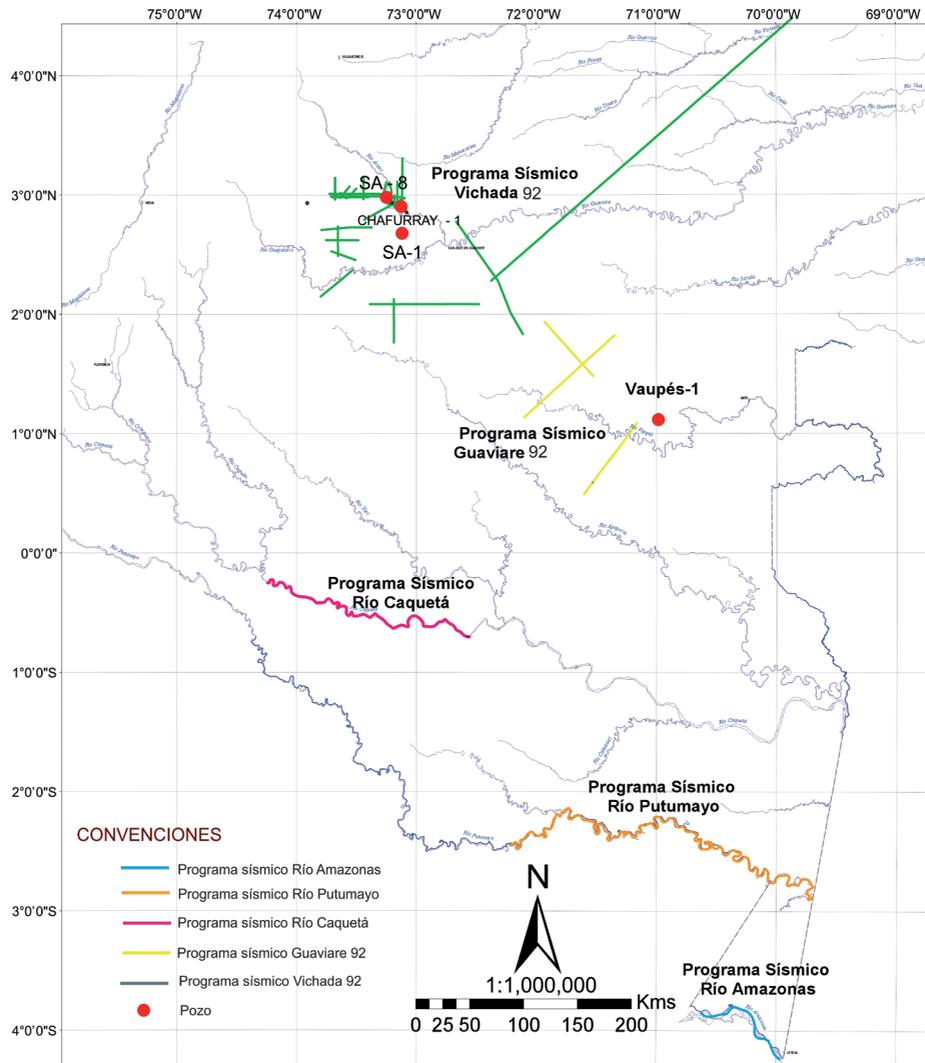


FIGURA 9. Localización de las líneas sísmicas interpretadas en el presente estudio: RC-1991-02 en el Río Caquetá, RP-1991-08 en el Río Putumayo, y RA-1991-01 en el Río Amazonas. Localización del pozo Vaupés-1.

Los anteriores horizontes fueron identificados en las líneas: RA-1991-01, ubicada en el área del Río Amazonas atravesando la Ciudad de Leticia; RP-1991-08, en las inmediaciones del Río Putumayo; y la RC-1991-01, en el Río Caquetá, todas pertenecientes al programa sísmico “Ríos 91” (FIGURAS 10, 11 y 12).

Con base en las imágenes sísmicas suministradas también fue posible identificar fallas inversas de bajo ángulo las cuales están asociadas a pliegues de arrastre, este tipo de estructuras es reportado en la contigua Cuenca de Solimões en Brasil por Mosmann *et al.* (1986) y por Pietrobon (2006).

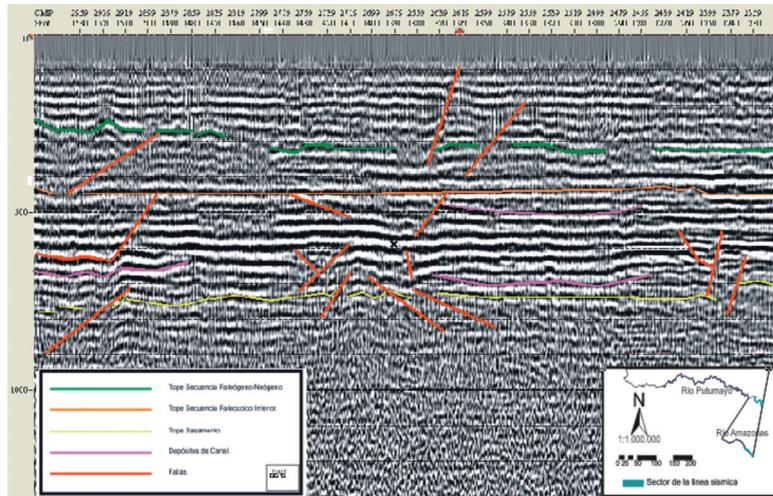


FIGURA 10. Línea sísmica migrada RA-91-01, en dominio de tiempo del Río Amazonas. Nótese que predomina el fallamiento normal en la secuencia Paleógeno-Neógeno y fallamiento inverso en la Secuencia del Paleozoico inferior.

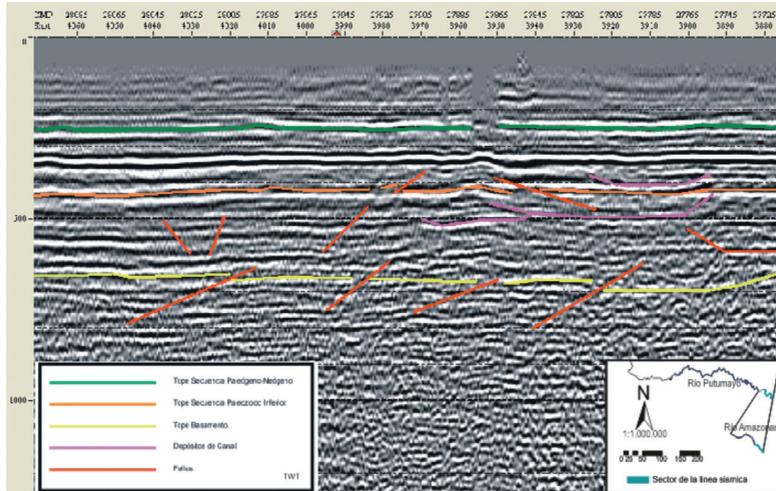


FIGURA 11. Línea sísmica migrada RP-91-08, en dominio de tiempo, Río Putumayo. Nótese que predomina el fallamiento normal en la secuencia Paleógeno-Neógeno y fallamiento inverso en la secuencia del Paleozoico.

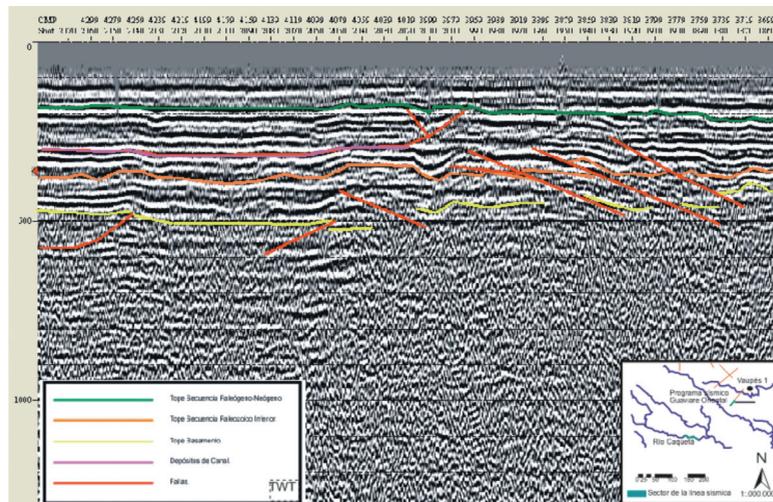


FIGURA 12. Línea sísmica migrada RC-91-02 del Río Caquetá, en dominio del tiempo. Nótese que predomina el fallamiento inverso en toda la sección, observándose depósitos de canal en la secuencia Paleógeno-Neógeno.

Es notoria una discordancia regional al tope de las formaciones del Paleozoico superior, en donde los sedimentos infrayacentes muestran estructuras propias de una tectónica extensiva. Las relaciones de “*onlap*”, así como algunas truncaciones erosionales son evidentes hacia la parte basal de la secuencia pos-Paleozoico superior. El espesor de este paquete es continuo a lo largo de las tres líneas y sólo debido a algunas fallas que afectan el basamento es posible observar leves cambios en la geometría de estas rocas (FIGURAS 10, 11 y 12).

Por encima de la discordancia del basamento (horizonte No. 1), se observan pequeñas fallas inversas, cabalgamientos, retrocabalgamientos y pliegues asociados a estas fallas inversas. La secuencia que suprayace el horizonte 2 correspondiente a la discordancia del tope del Paleozoico superior, en donde se observan fallas normales que limitan bloques.

El estilo estructural establecido en la Cuenca Vaupés-Amazonas exhibe en líneas generales, un estilo estructural cizallante. Las direcciones preferenciales de las fallas o lineamientos son NE-SW, variando de N70°-80°E a N50°-60°E, con ramificaciones de dirección E-O. Estos grandes lineamientos de 100 a 300 km de extensión, ilustrados en la FIGURA 6, fueron inicialmente identificados por Galvis *et al.* (1979). También se han identificado fallas inversas que parecen estar asociadas a fallas regionales de tipo transcurrente. Este patrón de fallamiento ha sido reportado por Mosmann *et al.* (1986) y Pietrobon (2006) en la Cuenca Solimões.

Es de anotar que la escasa información sísmica y de pozos no permitió correlacionar los anteriores horizontes sísmicos con la información estratigráfica del pozo Vaupés-1 en razón a que este pozo no perforó la secuencia Paleozoica observada en las líneas sísmicas.

GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO

Por analogía con la Cuenca Solimões del Brasil y con base en la interpretación de las líneas sísmicas de los ríos Putumayo y Amazonas, se evidencia que la secuencia del Paleozoico identificada mediante perforaciones en la Cuenca de Solimões en Brasil, tiene su continuidad en la Cuenca Amazónica Colombiana como se plantea en las interpretaciones de Mosmann *et al.* (1986) y Pietrobon (2006). Esta interpretación se apoya en que las cuencas del Vaupés-Amazonas y

de Solimões exhiben un estilo tectónico similar con la presencia de reflectores sísmicos horizontales de muy buena continuidad lateral, sin embargo, en la región sur de la Cuenca Vaupés-Amazonas no existen pozos que permitan correlacionar la información sísmica con información de pozos.

Para la Cuenca de Solimões, Da Cruz Cunha *et al.* (1988) y Mello *et al.* (1994) determinaron la presencia del sistema petrolífero Barreirinhas-Itaituba (!) el cual se propone, se podría extender hacia el norte en el territorio colombiano. En este sistema petrolífero, las lutitas del Miembro Barreirinhas del Devónico son las rocas generadoras. Esta formación presenta Kerógeno tipo II, carbón orgánico total hasta 6% y valores de reflectancia de vitrinita iguales o mayores a 1.35%, es decir, sobremaduras Mello *et al.* (1994).

En el presente trabajo se plantea que los *shales* de la Formación Curuá del Devónico se correlacionan con la unidad estratigráfica del Devónico Calizas de Berlín, la cual se extiende al norte en la Cuenca Vaupés-Amazonas, como lo ilustra las líneas sísmicas antes descritas. Igualmente, los *shales* del Miembro Barreirinhas, perteneciente a la Formación Curuá, presentan características geoquímicas como son altos contenidos de TOC (entre 2 y 6%) y altos valores de Ro(>1.35%), los cuales permiten en consecuencia plantear la presencia de yacimientos no convencionales de gas en lutitas, conocidos como yacimientos tipo *shale gas* en las cuencas Vaupés-Amazonas y Solimões.

De manera similar las areniscas de la Formación Itaituba del Carbonífero que suprayacen las lutitas, también podrían estar presentes en la Cuenca Vaupés-Amazonas, sin embargo, la presencia de la secuencia superior del Paleozoico fue expuesta a erosión, por lo cual su presencia es limitada en Colombia. Por esta razón se considera que el principal potencial de la Cuenca Vaupés-Amazonas se limita a yacimientos de *shale gas*.

Los resultados de la campaña sísmica de ECOPEL “Ríos 91” permitió determinar que la Cuenca del Amazonas de Colombia es una continuación de la Cuenca de Solimões del Brasil, es así como a partir de las líneas sísmicas se puede documentar que la profundidad de enterramiento de la secuencia Paleozoica aumenta hacia el sur de la Cuenca Vaupés-Amazonas. Por esta razón se plantea en el presente trabajo que la región más prospectiva corresponde al extremo sur de la Cuenca Amazónica

Colombiana, en cercanías a la población de Leticia, donde se encontraría el mismo sistema petrolífero del Paleozoico identificado en la Cuenca de Solimões, como se puede deducir de la observación de las líneas sísmicas en las FIGURAS 10, 11 y 12, en las cuales los reflectores sísmicos se encuentran más profundos hacia la región sur.

De acuerdo con Mello *et al.* (1994), en la Cuenca Solimões los hidrocarburos se generaron durante el Pérmico superior, seguido por varios eventos de migración que se presentaron por actividad tectónica durante el Jurásico y el Aptiano (140- 110 Ma) que corresponden a la remigración de hidrocarburos hacia los pliegues formados por fallamiento inverso, los cuales también se encuentran en la Cuenca Vaupés-Amazonas como se ilustran en las FIGURAS 10, 11, y 12.

El pozo Vaupés-1, perforado en la Cuenca Vaupés-Amazonas, registro 5.053 pies en areniscas precámbricas no prospectivas y 201 pies de gabro, en donde terminó la perforación.

Las paleo temperaturas estimadas (a partir de estudios de inclusiones fluidas) en los cementos autigénicos presentes, indican que las areniscas estuvieron sometidas a temperaturas de 200°C, y en la zona de contacto entre las arenisca y el intrusivo de composición gabroide temperaturas de 600°C (Alemán, 1988).

De la anterior información se concluye que el pozo Vaupés-1 no aportó datos significativos que permitieran identificar formaciones con algún potencial de generación y/o acumulación de hidrocarburos; así mismo, el pozo Vaupés-1 fue localizado en la margen oeste del depocentro del Vaupés, en donde el espesor de la secuencia sedimentaria está muy reducido.

MODELAMIENTO GEOQUÍMICO DE LA CUENCA VAUPÉS-AMAZONAS

El modelamiento geoquímico de la Cuenca Vaupés-Amazonas se realizó empleado el *software* Petromod versión 11, con el cual se obtuvieron modelos en una y dos dimensiones (1D y 2D). El modelo 1D corresponde al seudopozo Leticia-1, localizado en la ciudad de Leticia en Colombia. El modelo en 2D se obtuvo a partir de la línea sísmica RA-91-01 localizada en el río Amazonas, en inmediaciones de la ciudad de Leticia.

La historia termal calculada en el presente modelo geoquímico se basa en los valores de flujo de calor empleados por Gonzaga *et al.* (2000) quien emplea un flujo de calor inicial de 48 mW/m², el cual se incrementa a 62 mW/m² hacia el final del Carbonífero y comienzos de Pérmico. El flujo de calor inicial empleado para calcular los modelos geoquímicos de 48 mW/m² corresponde al flujo de cuencas intracratónicas según Welte *et al.* (1997). Este modelo termal asume que el estilo tectónico y por consiguiente, la historia termal es similar en la región sur de la Cuenca Vaupés-Amazonas y la Cuenca del Amazonas en Brasil.

En los modelos geoquímicos 1D y 2D se emplearon las características geoquímicas de la roca fuente del Devónico reportadas anteriormente. El valor de la energía de activación de generación hidrocarburos fue tomada de Gonzaga *et al.* (2000) y corresponde a 49 kcal/mol.

La FIGURA 13 ilustra la historia de subsidencia del seudopozo Leticia 1. Esta reconstrucción se elaboró con base en la información estratigráfica de las Cuencas Vaupés-Amazonas y de Solimões. En la FIGURA 13 también se superponen los resultados de la maduración termal de la roca fuente de hidrocarburos del Devónico (Calizas de Berlín), observándose que estas rocas generadoras entran a la ventana de generación de petróleo con un Ro de 1% en el Pérmico superior y obtienen valores de Ro de 2% en el Jurásico, indicando que esta formación se encuentra en la ventana de generación de gas seco. Resultados similares a los obtenidos en el presente modelo de generación de hidrocarburos son reportados por Gonzaga *et al.* (2000).

El modelo geoquímico 2D se ilustra en la FIGURA 14, la profundidad del perfil sísmico fue obtenida a partir de la línea sísmica RA-91-01 empleando velocidades entre 2500 y 4500 m/s, que corresponden a los valores empleados por Petrobon (2006) en la Cuenca Solimões. Los resultados obtenidos indican que la secuencia del Paleozoico superior presenta generación, migración y acumulación de hidrocarburos. El resultado del modelo geoquímico 2D permite plantear la hipótesis del potencial de hidrocarburos del área de Leticia, en donde los yacimientos de sistema petrolífero de Paleozoico pueden corresponder a acumulaciones de petróleo y gas en yacimientos convencionales y no convencionales de tipo *shale gas*.

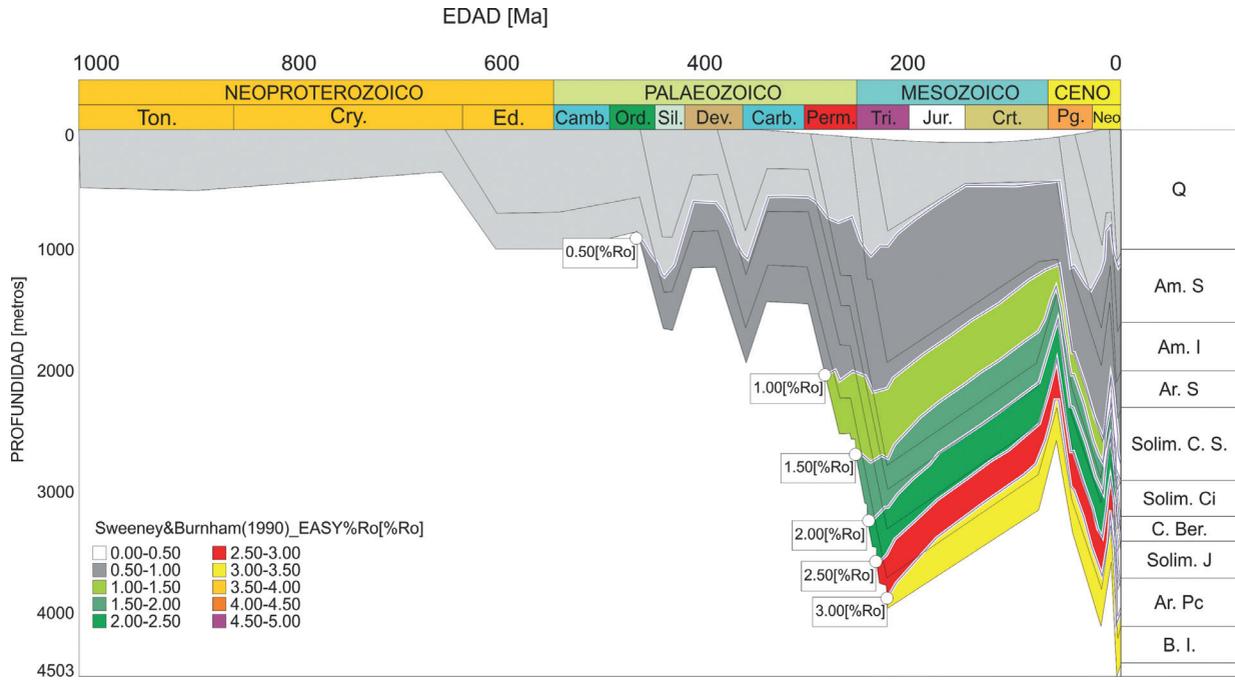


FIGURA 13. Modelo geoquímico 1D mostrando la variación del porcentaje Ro con la profundidad y el tiempo para el pseudopozo Leticia-1. El porcentaje actual de Ro en el pozo está en el rango 0,35%–0,65%. **Convenciones:** Q: Cuaternario; Am. S: Amazonas Superior; Am. I: Amazonas Inferior; Ar. S: Arenas Superiores; Solim. C. S: Solimões Carauari Shale; Solim. C. S: Solimões Carauari; C. Ber: Calizas de Berlín; Solim. J: Solimões Jutai; Ar. Pc: Areniscas del Precámbrico; B.I.: Basamento Ígneo.

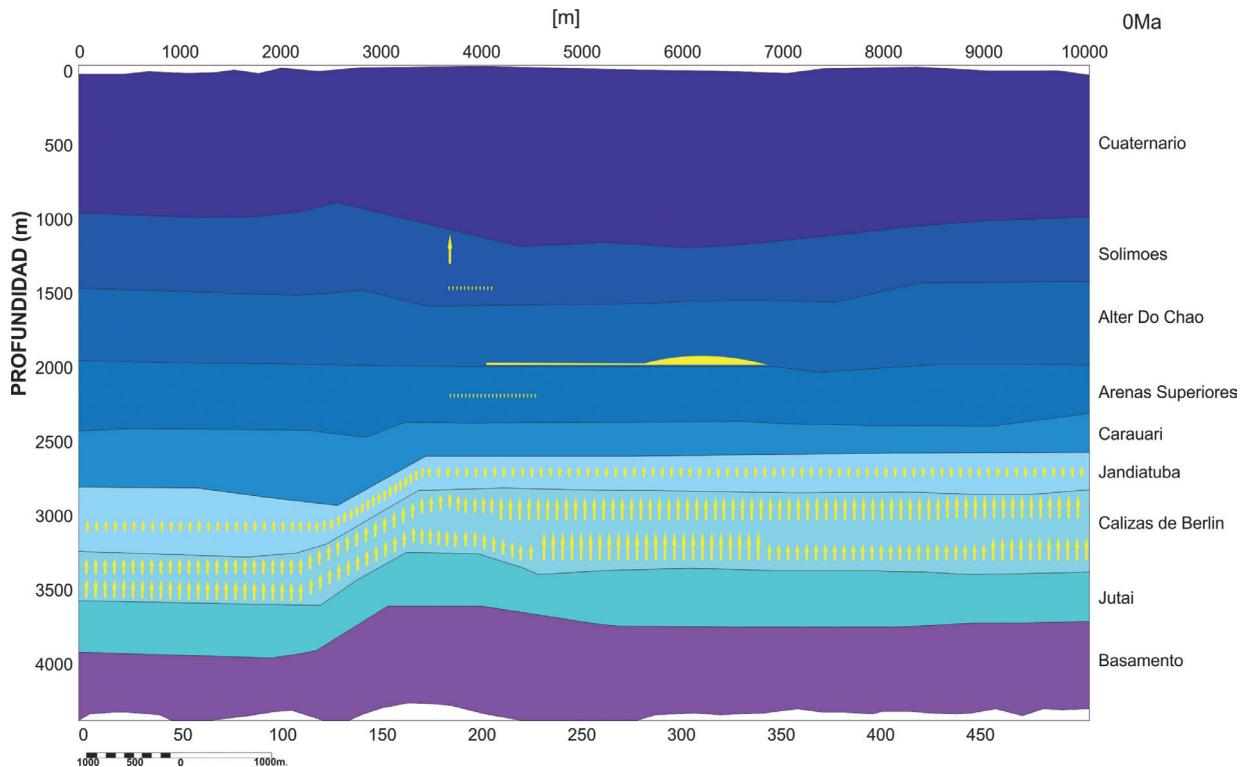


FIGURA 14. Modelamiento geoquímico 2D de la línea sísmica RA 91-01 en el Río Amazonas. Se ilustra la generación y acumulación de hidrocarburos, indicados en color amarillo.

CONCLUSIONES

En la cuenca Vaupés-Amazonas se propone la presencia del sistema petrolífero del Paleozoico superior, el cual se prolonga desde el sureste en la Cuenca de Solimões hacia el noreste en la Cuenca Vaupés-Amazonas.

De acuerdo con la información geológica en la Cuenca Vaupés-Amazonas, la prospectividad de hidrocarburos está principalmente en el área sureste de la cuenca, en cercanías de la población de Leticia, donde la sísmica muestra la continuidad de los reflectores sísmicos del Paleozoico, identificados en la Sub-cuenca de Jandiatura (Cuenca Solimões de Brasil), los cuales se extienden hacia el territorio colombiano.

Los descubrimientos de hidrocarburos en la Cuenca de Solimões están relacionados al sistema del Paleozoico superior y a lineamientos y fallas inversas con orientación NE-SW. Por consiguiente, la localización de prospectos en Colombia debe estar enfocada primordialmente en las formaciones del Paleozoico superior y a lineamientos con similar orientación, los cuales se han identificado en la región sur de la Cuenca Vaupés-Amazonas.

La información sísmica estudiada muestra la presencia de estructuras anticlinales asociadas a fallas inversas con orientación NE-SW. Estas estructuras son de interés prospectivo para yacimientos convencionales de hidrocarburos, sin embargo, no se descarta la presencia de yacimientos no convencionales tipo *shale gas*, de acuerdo con las características geoquímicas identificadas en la Cuenca de Solimões en Brasil.

Las anteriores conclusiones son un aporte a la visión general de la prospectividad de hidrocarburos en la cuenca frontera Vaupés-Amazonas y permiten enfocar los futuros trabajos de exploración en la región sur de la cuenca.

REFERENCIAS

Acosta, R., Eland, H., Ellwood, P., Galvis, J., González, M., Laing, J., Marshall, P., McSherry, A., Pegg, D. and Stewart, D. 1988. Geological Reconnaissance of the Colombian Amazonas area, R88-151-001-E, Roberson Research y Amoco. ECOPEPETROL, Informe geológico, 1781, V-1, C-3.

Alemán, A. 1988. Geological Reconnaissance of the Eastern Segment of the Leticia Block, Amoco. ECOPEPETROL, Informe interno, 2084.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. and Martínez, J. 2007. Colombian sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal, ANH, 91p.

Bogotá, R.J. 1983. Estratigrafía del Paleozoico inferior en el área Amazónica de Colombia, Geología Norandina, 6: 29-38.

Briceño, L.A., Rey, C., Vargas, C.A., Hernández, O., and Zamora, A. 2008. New Gravity Map of Colombia, CBAM-2008. In: Earth Sciences Research Journal, 12, Special ed.: 13-22. Disponible en www.anh.gov.co.

Cediel, F., Etayo, F., y Cáceres, C. 2003. Mapas de distribución de facies sedimentarias y armazón tectónico de Colombia a través del Proterozoico y del Fanerozoico. INGEOMINAS.

Córdoba, F., González, J.A., Meneses, H., y Ruge, P. 1992. Proyecto 15. Ríos Guaviare 92 Cuenca Amazonas, Configuración y modelo geotécnico preliminar de la cuenca. Informe de compilación y evaluación de la información técnica. Bogotá: ECOPEPETROL, Informe interno 3360.

Da Cruz Cunha, P.R., Braga da Silva, O., y Fernández, E. J. 1988. Interpretación facial y ambiental de los principales reservorios de hidrocarburos de la cuenca Solimões-Area. XXXV. Congreso Brasileiro de Geología, 6: 1 - 2441.

Etayo, F., Barrero, D., Lozano, H., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, I., Forero, H., Ramírez, C., Zambrano, F., Duque, H., Vargas, R., Núñez, A., Álvarez, J., Ropain, C., Cardoso, E., Galvis, N., y Sarmiento, L. 1983. Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Publicaciones Especiales del INGEOMINAS, 14: 1-235.

Galvis, V.J., Huguett, G., y Ruge, P. 1979. Geología de la Amazonía colombiana. Boletín Geológico, INGEOMINAS, 22 (3): 3-86.

Gonzaga, F.G., Coutinho, L.F., and Goncalves, F.T.T. 2000. Petroleum Geology of the Amazonas Basin, Modeling of Hydrocarbon generation and Migration. En: Mello M.R., and B.J. Katz, eds. Petroleum systems of South Atlantic margins: AAPG Memoir 73: 159-178.

Herrera, A., y Velásquez, B.E. 1978. Estratigrafía de la sección de Araracuara (Amazonía), Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

- Hoorn, C. 1991. Nota Geológica. La Formación Pebas (“Terciario Inferior Amazónico”): depósitos fluvio-lacustres del Mioceno medio a superior. Colombia Amazónica, Bogotá, 5 (2): 119-130.
- Hoorn, C. 1993. Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern Amazonia: Results of a palynostratigraphic study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 105: 267-309.
- Hoorn, C. 1994a. Fluvial palaeoenvironments in the intracratonic Amazonas Basin (Early Miocene - Early Middle Miocene, Colombia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 109: 1-54.
- Hoorn, C. 1994b. An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle to Late Miocene, NW Amazonia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 112: 187-238.
- Hoorn, C. 2006. Mangrove Forests and Marine Incursions in Neogene Amazonia (Lower Apaporis River, Colombia). *PALAIOS*, 21: 197–209.
- Kaandorp, R.J.G., Wesselingh, F.P., and Vonhof, H.B. 2006. Ecological implications from geochemical records of Miocene western Amazonian bivalves, Special Issue on Neogene Amazonia, *Journal of South American Earth Sciences*, 21(1-2): 54-74.
- Mello, M.R., Mohriak, W.U., Koutsoukos, E.A.M., and Bacoccoli, G. 1994. Selected Petroleum Systems in Brazil. In: Magoon, L.B. and W.G. Dow, eds. *The petroleum system—from source to trap*. AAPG Memoir, 60: 499 – 511.
- Mosmann, R., Falkenhein, F.U., Goncalves, A., and Fiho, F.N. 1986. Oil and Gas Potential of the Amazon Paleozoic Basins; In Halbouty, M.T. ed. *Future Petroleum Provinces of the World*. AAPG, 40: 207-241.
- Pietrobon, M.O. 2006. Modelo Estrutural Da Sub-Bacia Do Juruá (Bacia DoSolimões/Am), Baseado Em Interpretação De Dados Sísmicos E Influência Da Tectônica Pré-Andina Na Geração De Trapas. En: *Monografia Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, Campus de Rio Claro*.
- Pinson, W.H., Hurley, P.M., Mencher, E., and Fairbairn, H.W. 1962. K/Ar and Rb/Sr ages of biotites from Colombia, South America. *Geol. Soc. Am., Bull.*, 73 (3): 907- 910, Boulder-Colorado.
- Ramos, B.I. 1988. El Potencial petrolífero y las perspectivas exploratorias de la Cuenca Solimões, Brasil. ECOPETROL, Informe Geológico, 3030.
- Welte, D.H., Horsfield, B., and Baker, D.R. (eds.). 1997. *Petroleum and basin Evaluation*. Berlin, Springer.

Trabajo recibido: noviembre 21 de 2012

Trabajo aceptado: septiembre 13 de 2013