

MODELADO 3D DEL BASAMENTO DE LA CUENCA DE SAN FRANCISCO, MINAS GERAIS-BRASIL

SAID ROA, NURIS ORIHUELA

Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela. e-mail: saidroa89@gmail.com
nurisorihuela@gmail.com

Recibido: diciembre 2012

Recibido en forma final revisado: octubre 2013

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad la obtención del modelo 3D del basamento de la Cuenca de San Francisco en Minas Gerais (Brasil), entre las coordenadas 15°-18°N y 43°-45°W, con el propósito de describir su forma y determinar las zonas más prospectivas para la explotación de hidrocarburos. El modelo se obtuvo a través de la realización de perfiles gravimétricos 2D en dirección noroeste-sureste y noreste-suroeste sobre mapas de Anomalía de Bouguer (AB) y Magnética (AM), de origen satelital. Las profundidades modeladas en los perfiles fueron controladas a través de análisis espectrales, deconvolución de Euler 2D y 3D e interpretación de secciones sísmicas. Producto de esta investigación, se obtuvieron mapas y superficies 3D de la Discordancia Neo-Mesoproterozoica y del Basamento, caracterizándose el mismo por ser muy irregular y estar constituido por una serie de altos y bajos estructurales. Se confirmó la asociación entre la Depresión de Pirapora y la existencia de un aulacógeno subyacente, en el cual se halló un cuerpo granítico con forma diapírica; se definieron como las áreas más prospectivas los flancos del Alto de Januária, así como el límite entre la Faixa Araçuaí y la cuenca. Adicionalmente se corroboró que la cupla y demás anomalías magnéticas, son generadas por cuerpos intrabasamento. Se recomienda complementar este estudio con prospecciones aeromagnéticas y magnetotéluricas en la zona, así como la realización de perfiles sísmicos que crucen el Aulacógeno de Pirapora, para aumentar la exactitud en la delineación del basamento e información sobre estructuras entrampantes en la zona.

Palabras clave: Basamento, Cuenca de San Francisco, Gravimetría, Hidrocarburo, Modelo 3D.

BASEMENT 3D MODELLING OF SAN FRANCISCO BASIN, MINAS GERAIS-BRAZIL

ABSTRACT

This research aimed to obtain a 3D model of the basement of San Francisco Basin in Minas Gerais (Brazil) between the coordinates 15° -18° N and 43°-45° W, in order to describe its shape and define the most prospective areas for hydrocarbon production. The basement model was obtained by performing 2D forward modeling made in a northwest-southeast and northeast-southwest directions over Bouguer Anomaly (AB) and Magnetic Anomaly (AM) from satellite data. The depths to the different horizons in the profiles were constrained by performing Spectral Analysis; 2D and 3D Euler Deconvolution, and interpretation of seismic sections. As result of this research, maps and 3D surfaces of the Neo-Mesoproterozoic Unconformity and Basement were obtained, finding that the basin's basement is characterized as being very irregular and conformed in structural highs and lows; an association between Pirapora Depression and the Pirapora Aulacogen was discovered, finding also that there is a granite body underlying the said structure. The flanks of Alto de Januária, and the boundary between the Faixa Araçuaí and the basin were defined as the most prospective areas. Additionally, it was confirmed that the magnetic dipole anomaly and other magnetic anomalies are generated by intrabasement bodies. Finally, an expansion of this study through aeromagnetic and magnetotelluric studies in the area, as well as conducting seismic profiles crossing the Pirapora Aulacogen is recommended in order to increase the accuracy in the delineation of the basement and the information on the possible trapping structures in the area.

Keywords: Basement, San Francisco Basin, Gravity, Hydrocarbon, 3D Model.

INTRODUCCIÓN

Mundialmente la explotación de hidrocarburos se encuentra en un proceso en el que la demanda y el agotamiento de las reservas, hace necesaria la búsqueda de nuevas provincias gasíferas o petrolíferas en zonas no convencionales o áreas de frontera exploratoria. En el caso del Brasil, se ha estado experimentando un crecimiento apreciable en la exploración, descubrimiento y certificación de sus reservas. Los últimos descubrimientos encontrados en aguas profundas pre-sal, han llamado la atención de la industria petrolera; sin embargo, el desarrollo y producción en aguas profundas es considerado como una operación considerada crítica y costosa, existiendo grandes partes del interior del Brasil con potencial gasífero y petrolero que están poco explotadas (Neves *et al.* 2010).

Es por ello que el Gobierno Federal del Brasil, ha decidido explorar áreas de fronteras exploratorias fuera del rectángulo pre-sal; la Cuenca de San Francisco es una de dichas áreas, localizada en el centro-este del Brasil, tiene una extensión de 379.357 km². La ventana de estudio está enmarcada entre los 43°- 45° W y 15°- 18° S, comprendiendo la región sudeste de la cuenca en el estado de Minas Gerais. La cuenca se caracteriza por tener relleno sedimentario predominantemente proterozoico y dos (2) secuencias depositacionales principales, las cuales se encuentran separadas por una importante estructura erosional. La secuencia rifética (Períodos Ectásico, Esténico y Tónico) corresponde a varios grupos estructurales: Macaúbas (conglomerados y diamictitas de ambientes marino-glacial) y Paranoá (cuarcitas de ambientes transicionales). La secuencia más reciente es Védica (Ediacárico), está conformada por el Supergrupo Bambuí (intercalaciones de carbonatos y arcilla de ambiente marino) subyacente a la Formación Três Marías (arenas deltáicas). Mientras que el basamento lo constituyen mayormente rocas migmatíticas y granitoides del cratón de San Francisco, metasedimentos altamente plegados del grupo Araí (limolitas y cuarcitas) y Supergrupo Espinhaço (cuarcitas), (Travassos & Menezes, 1999).

Las primeras evidencias de hidrocarburos en esta cuenca, datan de los años 70 con la presencia de emanaciones de gas termoquímico en pozos de agua, afloramientos, ríos y lagos alrededor de toda la cuenca (Duarte, 2008); posteriormente, también se evidenciaron flujos sub comerciales de gas en tres pozos perforados provenientes de las rocas carbonáticas del Grupo Bambuí, y la existencia de bitumen en dolomitas y de arcillas negras ricas en material orgánico de la formación Trairas, sugiriendo la presencia de un sistema petrolífero en la Cuenca de San Francisco (Bruno *et al.*

2009). Adicionalmente se realizaron estudios de sísmica 2D en la cuenca los cuales denotan la existencia de estructuras como anticlinales tipo *pop-up*, tipo *snake-bed*, estructuras en flor y *trust-sheets* que servirían como trampa para los hidrocarburos (Clark, 2002).

Tomando en cuenta que aun cuando los riesgos asociados con la exploración de petróleo en cuencas proterozoicas son considerables, actualmente está bien establecido que es posible encontrar acumulaciones de petróleo y gas de interés comercial en las mismas, como sucede en los grandes yacimientos en la plataforma Siberiana, la producción petrolera en Omán y la producción de gas del Siniano en China (Romeiro *et al.* 1998). Considerando que en muchas ocasiones la exploración en alguna de estas áreas de frontera exploratoria ha sido obstaculizada por su tamaño, lejanía o complejidad geológica, la interpretación con datos de una herramienta novedosa como lo constituyen los datos gravimétricos y magnéticos satelitales, resulta un camino efectivo para entender la geología de dichas áreas; mientras que la aplicación de la descomposición espectral y de técnicas automáticas de estimación de profundidades como la Deconvolución de Euler, hacen posible conocer la forma y fuente de las anomalías.

Por ello, el obtener un modelo 3D del basamento de la cuenca, permitirá observar la distribución de los espesores sedimentarios, identificar depocentros, aumentar el conocimiento sobre la formación del basamento y sus capas sobreyacentes; así como también, describir la dirección preferencial de las estructuras o fallas que producen las respuestas anómalas, pudiendo así evaluar finalmente la posibilidad de algún control estructural presente que influya sobre los sistemas petrolíferos y facilitar así la delineación de las aéreas prospectivas más promisorias, permitiendo ahorrar tiempo y recursos en la futura detección de zonas con presencia de hidrocarburos y su posterior explotación en esta cuenca. De allí que la metodología aquí expuesta podría servir de guía a futuras investigaciones que usen esta herramienta o que se realicen en áreas que presenten características geológicas y estructurales similares a la cuenca de San Francisco.

METODOLOGÍA

Para realizar la presente investigación, se usaron datos gravimétricos y magnéticos satelitales, registros de un pozo y una línea sísmica. Los datos gravimétricos fueron tomados del modelo EGM2008, con una resolución de 0.03°. Los datos magnéticos provienen del modelo EMAG2. El pozo 1-RF-1-MG se encuentra localizado en las coordenadas geográficas (16°43'35.87''S, 45°5'13.85''W). La línea

sísmica (en dominio del tiempo) que se encuentra localizada al suroeste de la zona en estudio, posee una longitud de 95 km; tanto los datos de pozo como la sísmica pertenecen a la Agencia Nacional del Petróleo del Brasil y fueron suministrados por la empresa *Geoquasar*.

Durante el transcurso de la investigación, para el procesamiento e interpretación de los datos gravimétricos y magnéticos se usó el programa *Oasis Montaj*, se emplearon los módulos: GRID, para la elaboración de mapas y MAGMAP para el proceso de filtrado, mientras que en la interpretación estadística de los datos de anomalías gravimétricas o magnéticas se usó el programa (*PASW Statistics 18*).

En la estimación de profundidades, se usó el análisis espectral y técnicas automáticas de estimación de profundidades como la Deconvolución de Euler en perfiles y en tercera dimensión.

Para realizar el análisis espectral se usó nuevamente el módulo MAGMAP para obtener una curva espectral a través de la cual se conocieron las profundidades de las fuentes que originan la respuesta magnética y gravimétrica, siguiendo la metodología de Spector & Grant (1970), que divide la curva en tendencias, a las que se les miden sus pendientes y su valor se divide entre 4π , siendo dicho valor el equivalente a la profundidad de la fuente. Posteriormente se realizaron espectros en pequeñas ventanas dentro de la zona de estudio, con unas dimensiones de al menos seis (6) veces la mayor profundidad registrada en el espectro, con un solapamiento de al menos un 25% entre ventanas, para así obtener mapas de profundidad de las diversas fuentes gravimétricas o magnéticas.

En las técnicas automáticas de estimación de profundidades, se usó el módulo EULER 3D para la deconvolución de Euler en tercera dimensión, cuyos resultados fueron escogidos siguiendo el criterio expresado por Yaghoobian *et al.* (1992) y el módulo P-DEPTH para la estimación de profundidad al basamento a través de perfiles 2D.

Para la interpretación y conversión al dominio del tiempo de los datos sísmicos se usó el programa *Petrel*.

Para realizar el modelaje de los perfiles gravimétricos se usó el módulo *GM-SYS*, y *GM-SYS 3D* para obtener el modelo gravimétrico 3D de la cuenca.

Finalmente se graficaron en vista 3D de forma separada las diferentes capas y el basamento señalándose en ellos las estructuras más resaltantes; posteriormente, se realizó el

análisis de trampas estructurales y depocentros de interés prospectivo, tomando en cuenta dos (2) principales factores: la topografía del basamento y las zonas de cizalla asociadas con la posible de reactivación de fallas del basamento (Parker, 1995).

La metodología usada en el presente trabajo se resume en un diagrama de flujo que muestra los pasos principales y secundarios en la Figura 1.

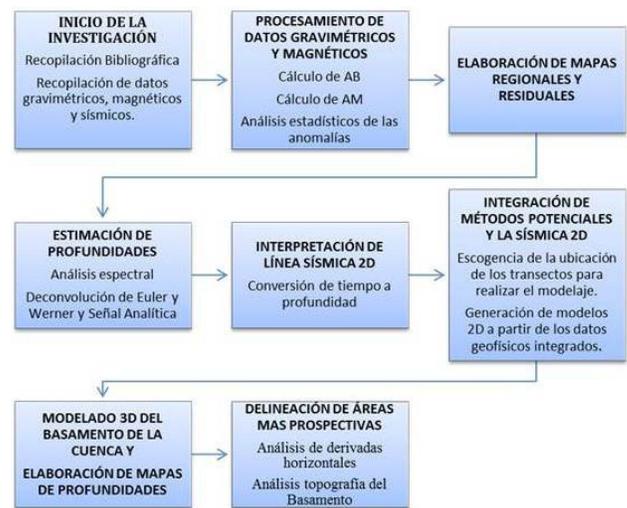


Figura 1. Resumen de metodología utilizada

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapa de AB (Figura 2a) presenta una respuesta compleja, lo que da indicios de la intrincada geología de la zona o de la heterogeneidad del basamento subyacente.

El mapa presenta anomalías con tendencia predominante Noreste-Suroeste. Hacia la parte noroeste del mapa, se puede observar alineación de las máximos relativos con tendencia $N45^{\circ}E$, atribuibles al alto del basamento denominado Alto de Januária. En el sureste del mapa, se observa otra tendencia con dirección $N20^{\circ}E$, correspondiente al cinturón de plegamientos de la Faixa Araçuá. Este mismo patrón se observa en el suroeste, asociados con los grandes anticlinales de Sierra de Cabral y Agua Fría, que se encuentran en una zona llamada Saliente de Pirapora.

El mapa de AB presenta unas anomalías cuyos valores varían entre los -20 a -152 mGal, el mínimo de mayor relevancia consiste en una anomalía circular con una magnitud de -152 mGal aproximadamente, ubicada entre N 8125000-8175000 y E 525000-575000 (dentro de la zona perteneciente a la depresión de Pirapora); asociándose en el presente trabajo con la posible presencia de un cuerpo granítico. El máximo absoluto del área de estudio se encuentra en las coordenadas E677000 y N 8110000,

estando asociado con un cuerpo antiformal de gran tamaño dentro del Alto de Januária.

En el mapa de AM (Figura 2b) se puede observar, de forma generalizada, que las anomalías se caracterizan por ser de gran amplitud, por lo que se podría sugerir que dichas anomalías tienen origen en elementos ubicados a grandes profundidades. La respuesta magnética puede dividirse en dos dominios principales, el primer dominio ubicado al sureste y el segundo al noroeste, separados principalmente por la cupla magnética que domina el área, la cual engloba el valor mínimo y máximo (233.93 y -441.47 gammas, respectivamente). Dichos dominios pueden ser relacionados con las provincias geológicas existentes en el área, como son la Provincia Mantiqueira al sudeste y la provincia San Francisco al noroeste. La cupla magnética presente en el mapa alcanza dimensiones de 1°45' en dirección este-oeste y 1°30' en la dirección norte-sur, siendo la misma atribuida a una disminución local de la susceptibilidad magnética.

Previo a la elaboración de los perfiles geológicos, se realizó la integración de los datos de la sísmica, la gravimetría y las densidades extraídas por registros de pozos, sobre la misma ubicación de la sección sísmica 240-RL-300 (Figura 3). Se obtuvo un modelo gravimétrico con profundidades controladas por la sísmica y el análisis espectral, así como las densidades de la secuencia neoproterozoica controladas por el registro de pozo; mientras que las densidades de las secuencias sedimentarias inferiores y del basamento, se obtuvieron ajustando la gravedad calculada a la respuesta real durante el proceso de modelado.

En la línea sísmica interpretada, se observa que el basamento alcanza profundidades de 4500m, organizado en estructuras tipo *Horst* y *Graben*, apreciándose la existencia de una megasecuencia tipo rifte/sag (Formaciones Espinhaço y Paranoá), una discordancia de carácter regional y una megasecuencia tipo antepaís (Formaciones Jequitá y Secuencia Neo-Proterozoica). La zona está dominada por fallas normales, las cuales sufrirían una inversión, bajo un contexto de deformación tipo *thick-skinned* durante la Orógenesis Brasiliana, lo que generaría los altos estructurales del Basamento.

Basado en las densidades controladas por el registro de pozo y la correlación de la sísmica durante el modelado gravimétrico de los perfiles geológicos, se obtuvieron tres (3) horizontes principales: La secuencia neoproterozoica (2.60 gr/cm³), la secuencia paleo-mesoproterozoica (2.75 gr/cm³) y Basamento (2.8 gr/cm³), adicionalmente sustentado en análisis espectrales y geología regional se graficó una interface dentro de corteza superior (2.85 gr/cm³), la discontinuidad corteza inferior-corteza superior (2.95 gr/cm³) y Discontinuidad de Moho (3.3 gr/cm³).

Posteriormente, se obtuvo un modelaje 3D del basamento producto de las superficies exportadas de cada uno de los perfiles geológicos, en la Figura 4b.

Si se realiza una comparación entre el resultado obtenido por el cálculo gravimétrico del modelo 3D (Figura 4a) y el mapa de AB original (Figura 2a), se observa que los mismos se asemejan en gran medida, las diferencias establecidas a simple vista corresponderían a cuerpos intrusivos ácidos o máficos, presentes principalmente en la Faixa Araçuai. Al realizar un análisis cuantitativo de la relación obtenida mediante la división del mapa de AB producto del modelo 3D, entre el mapa de AB original, da como resultado una relación que varía entre 0,83 a 1,23 (entre un 17% de subestimación a un 23% de sobrestimación).

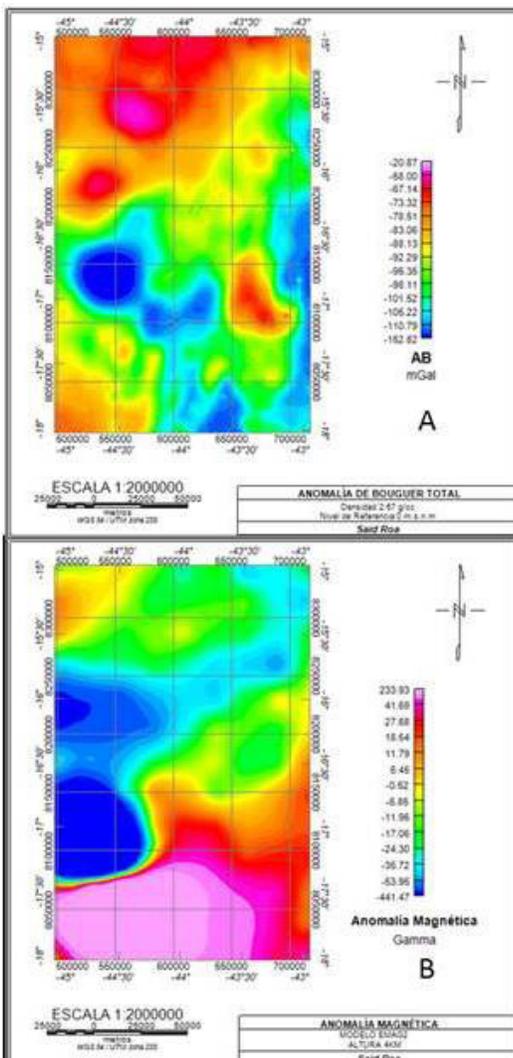


Figura 2. Mapa de Anomalia de Bouguer (a) y Anomalia Magnética (b)

La topografía del basamento es bastante irregular, organizándose, de forma general, en un conjunto de anticlinales y sinclinales. Las trampas principales estarían asociadas con grandes anticlinales, así como trampas estratigráficas tipo *pinchout* y fallas en sus flancos que facilitarían la migración de hidrocarburos. Hacia el oeste de la zona de estudio, se encuentran los principales depocentros, donde por presión litostática se hace más probable que se den las condiciones para la generación de hidrocarburos. Las direcciones de migración lateral pueden definirse en forma perpendicular a los contornos estructurales obtenidos por los modelos 3D o perpendicular a los contornos de AB residual (Ngdousa *et al.* 2007).

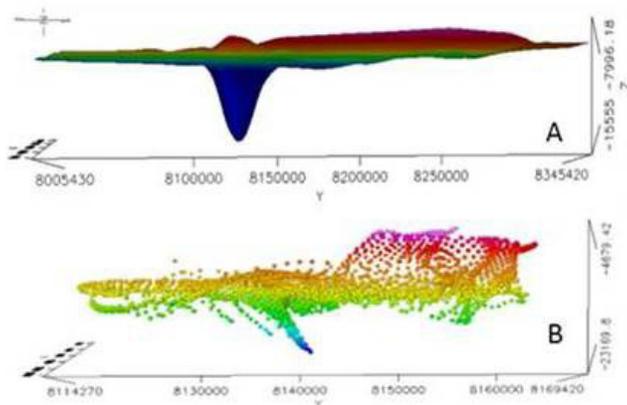


Figura 6. Cuerpo diapírico granítico subyacente al Aulacógeno de Pirapora (exageración vertical 1:10)

La zona sur y este del basamento se hallan fuertemente fracturadas; por lo que podrían encontrarse en ésta área plegamientos, trampas tipo *pinchout* y trampas asociadas con fallas de zonas de cizalla, así como la posible generación de yacimientos fracturados en calizas y dolomitas (Clark, 2002) siendo atribuible la presencia de *sweeps* en superficie a dicho fracturamiento.

Producto del conocimiento geológico del área y del análisis de la sección sísmica, se plantea la existencia de una trampa asociada con la discordancia, ubicada entre la secuencia neoproterozoica y mesoproterozoica, pudiendo la misma actuar como trampa estratigráfica de carácter regional.

CONCLUSIONES

La respuesta de la anomalía de Bouguer es bastante compleja, reflejando la heterogeneidad tanto del basamento, como de la geología en la zona. Producto del análisis espectral y la aplicación de la deconvolución de Euler sobre el mínimo absoluto de AB, se asoció el origen del mismo con un cuerpo diapírico granítico intrabasamento subyacente al Aulacógeno de Pirapora. Los valores máximos de AB

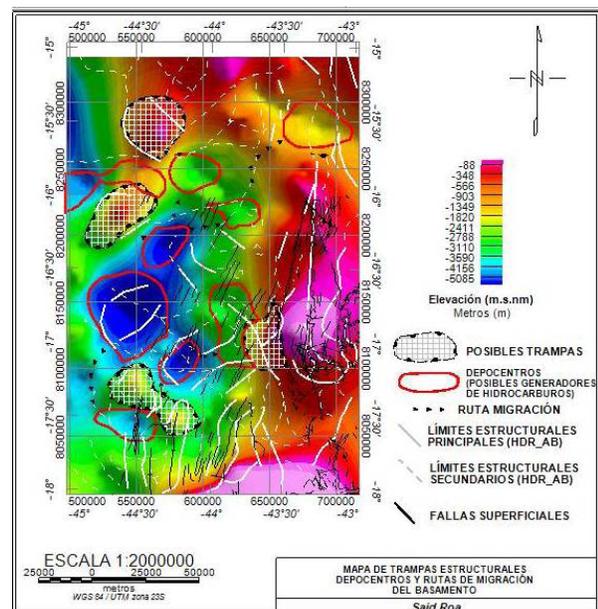


Figura 7. Mapa con depocentros, trampas y posibles rutas de migración de hidrocarburos

se encontrarían asociados con el Alto de Januária y a intrusiones máficas.

El mapa de AM presenta anomalías de gran amplitud, las mismas tienen origen en profundidades mayores a la del basamento definido mediante la gravimetría o la sísmica, siendo notable la existencia de una cupla magnética causada por un descenso marcado de susceptibilidades magnéticas en la zona respecto al entorno.

En líneas generales, se puede afirmar que gran parte de la respuesta gravimétrica del área se debe a cambios en la densidad y topografía del basamento, mientras que los datos magnéticos reflejan la naturaleza del mismo y su división en provincias.

Al realizar la integración entre el modelaje gravimétrico y la interpretación sísmica realizada sobre la línea 240-RL-300, se observa que el basamento se caracteriza por estar compuesto de estructuras tipo Graben y Horst, presentando un conjunto de fallas normales, varias de las cuales han sufrido inversión. La secuencia sedimentaria alcanza un espesor máximo de 4500 m, estando organizada en una secuencia paleo-Mesoproterozoica y una secuencia neoproterozoica separadas por una discordancia regional. Se recomienda la realización de una línea sísmica que se encuentre perpendicular a la interpretada, que cruce tanto el depocentro principal ubicado en la Depresión de Pirapora como el Alto estructural de Januária, para así tener mayor certidumbre sobre las características estructurales de las áreas que son más favorables para la generación y entrapamiento de hidrocarburos.

Al analizar los resultados del modelado en 3D, se observa que el basamento alcanza su punto más profundo a 6500m, en un depocentro asociado con el Aulacógeno de Pirapora. Analizando la correlación entre el mapa de AB generada a través del modelo 3D y AB original, se observa una buena correlación que varía entre 0,83 y 1,23 (aproximadamente un 80% de exactitud), lo que confirmaría la calidad del modelado.

Se identificaron como zonas de interés para la explotación de hidrocarburos los flancos del Alto de Januária y la franja que marca el límite entre el cratón y la cuenca. Se plantea la posibilidad de existencia de trampas tipo *pinchout* y trampas asociadas conantiformes y fallas. Se identificaron como depocentro y posible sitio de generación la zona perteneciente al Aulacógeno de Pirapora, también se observó que se dan las condiciones estructurales necesarias para la existencia de un sistema petrolero en la secuencia Paleo-mesoproterozóica de la cuenca, donde la discordancia sobreyacente fungiría de trampa estratigráfica. Es por ello que se recomienda la perforación de pozos en las zonas de mayor interés, siendo ideal que dichos pozos rebasaran la discordancia Neo-Mesoproterozóica y llegasen a basamento, para constatar la presencia de un sistema petrolero en la secuencia basal de la cuenca, permitiendo a su vez un mayor control de profundidad en futuros modelajes e inversiones.

Con el fin de aumentar los conocimientos geofísicos y geológicos de la zona se recomienda el análisis de datos aeromagnéticos, para así obtener un mapa más detallado sobre el basamento, zonas de cizalla, cambios litológicos y fuentes magnéticas residuales. También sería gran utilidad realizar perfiles magnetotélúricos sobre la línea sísmica disponible y los perfiles geológicos realizados en el presente trabajo, para así diferenciar con mayor exactitud cada una de las formaciones que integran tanto la secuencia neoproterozóica como Meso-Paleoproterozóica; como fue previamente realizado al sur de la ventana de estudio, en los trabajos de Travassos y Menezes (1999).

REFERENCIAS

- BRUNO, P., MÍO, E., MELLO, M. (2009). Petroleum System Overview of São Francisco Basin: A New Gas Province Onshore Brazil. AAPG International Conference and Exhibition. Río de Janeiro.
- CLARK, J. (2002). Quarta Rodada de Licitações. Bacia do São Francisco [Presentación en láminas]. ANP.
- DUARTE, K. (2008). Décima Rodada de Licitações Bacia Do São Francisco [Presentación en láminas]. ANP.
- NEVES, SORDI, D., EGOROV. (2010). Frontier Basins Onshore Brazil. AAPG International Conference and Exhibition. Río de Janeiro.
- NGDOUSA-MBARGA, T., MANGUELLE, E., CAMPOS, J., ATANGANA, Q. (2007). Gravity anomalies, sub-surface structure and oil and gas migration in the Manfe, Cameroon-Nigeria, sedimentary basin. *Geofísica Internacional*, 46(2), 129-139.
- PARKER, S. (1995). Basement Control of Selected Oil and Gas Fields in Kansas as Determined by Detailed Residual Aeromagnetic Data. En *Kansas Geophysical Atlas*. Lawrence, Kansas: Kansas Geological Survey.
- ROMEIRO, P., BRAUN, O., ZALÁN, P., DE PAULA, L., MATTLINS, M. (1998). São Francisco Basin - Exploration Frontier for Gas in Central Brazil. ABGP/AAPG International Conference and Exhibition. Río de Janeiro.
- SPECTOR, A. & GRANT, F. (1970). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35, 293-302.
- TRAVASSOS, J. & MENEZES, P. (1999). Geoelectric structure beneath limestones of the Sao Francisco Basin. *Earth Planets Space*, 51(1), 1047-1048.
- YAGHOUBIAN, A., BOUSTEAD, G., DOBUSH, T. (1992). Object delination using Euler's homogeneity equation. *Proceedings of SAGEEP '92*. Sunnyvale: Geosoft Inc.