

Métodos geofísicos integrados en la exploración petrolera de los cinturones de cabalgamiento

Guillermo Miró Pagés

correo electrónico: gmiro@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Artículo Original

José Gemén Luis Prol Betancourt

correo electrónico: prol@digi.cupet.cu

Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

María Caridad Rifá Hernández

correo electrónico: rifa@digi.cupet.cu

Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Youilen María Echagarruga Palomo

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Resumen

Las zonas geológicas de tectónica compresiva correspondientes a los llamados cinturones de cabalgamiento, presentan un gran interés exploratorio a escala mundial, por el hecho de que cerca del 14 % de las reservas petroleras descubiertas y el 15 % del volumen que según se estima está aún por descubrir, se localiza en estas regiones. Especialmente en Cuba, la producción petrolera principal se sitúa en una de estas zonas conocida como Cinturón Plegado Norte Cubano; de ahí la importancia de estudiar otras áreas del mundo con características tectónicas similares y los criterios prospectivos empleados en las mismas. El presente artículo analiza múltiples experiencias sobre exploraciones combinadas realizadas en estas áreas; sus objetivos son divulgativos y docentes, pues están dirigidos a contribuir a la prospección geofísica petrolera nacional y a lograr una mayor argumentación y contenido de la asignatura Métodos geofísicos aplicados a la prospección exploración y explotación de yacimientos de hidrocarburos, que imparten conjuntamente los autores, al quinto año de la carrera de Ingeniería Geofísica. En el trabajo se refieren variadas experiencias concernientes a los métodos sísmicos y de campos potenciales por ser habitualmente estas, las técnicas geofísicas más empleadas en este campo.

Palabras claves: geofísica, métodos, cinturón de cabalgamiento, exploración

Recibido: 19 de septiembre del 2016 Aprobado: 16 de diciembre del 2016

INTRODUCCIÓN

Las zonas geológicas de tectónica compresiva correspondientes a los llamados cinturones de cabalgamiento, presentan un gran interés exploratorio a escala mundial, por el hecho de que cerca del 14 % de las reservas petroleras descubiertas y el 15 % del volumen que según se estima está aún por descubrir, se localiza en estas regiones [1]. Especialmente en Cuba la producción petrolera principal se concentra en una de estas zonas, conocida como Cinturón Plegado Norte Cubano; de ahí la importancia de estudiar otras áreas del mundo con caracte-

rísticas tectónicas similares y los criterios exploratorios empleados en las mismas.

Para los métodos geofísicos, el medio geológico confinado en estos sectores de la corteza terrestre, presenta grandes retos tales como la variabilidad que sufren las propiedades físicas de las rocas en las direcciones vertical y horizontal, lo que hace difícil la interpretación geológica de los datos. Por lo anterior, se hace necesario en estas regiones combinar la aplicación de distintos métodos de exploración capaces

de ofrecer respuestas diferentes, cuya interpretación integrada propicie una mayor aproximación del modelo interpretado al modelo geológico real.

El presente artículo consiste en el análisis de múltiples experiencias sobre prospecciones realizadas en distintas regiones del mundo, que han sido publicadas en diferentes fuentes bibliográficas y también de investigaciones realizadas por los propios autores, con fines exploratorios y docentes. El trabajo está dedicado principalmente a los métodos sísmicos y de campos potenciales por ser habitualmente estas las técnicas geofísicas más empleadas en este campo.

Por último, es necesario aclarar que en la literatura de la geología, la geofísica y la prospección petrolera existen actualmente numerosos términos y conceptos en idioma inglés cuya traducción al idioma español no siempre ha sido totalmente reconocida; por lo que en este artículo y en las figuras que contiene, cuando estos aparecen, los mismos son expresados en idioma inglés.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LAS REGIONES DE LOS CINTURONES DE CABALGAMIENTOS

En diversas regiones del mundo los geólogos han reconocido desde hace mucho tiempo, fallas extensas casi horizontales que separan rocas más antiguas yaciendo sobre otras más jóvenes asociadas a los llamados cinturones de cabalgamientos o de sobrecorrimentos.

Muy frecuentemente el ángulo de buzamiento del plano de falla observado, es solamente de unos pocos grados. Tales estructuras fueron identificadas por vez primera en la región de los Alpes cerca de 1840 e intrigaron a los geólogos desde entonces, concluyéndose que los elementos que caracterizan tales regiones son los siguientes:

- Los planos de fallas de despegue tienen ángulos de buzamientos muy pequeños, generalmente menores de 10° .
- Los espesores de los bloques sobrecorridos de rocas pueden ser del orden de 5-10 km.
- La traza de las fallas anteriormente referidas en la superficie terrestre puede ser muy extensa, en ocasiones del orden de 100-300 km.
- Los bloques de rocas pueden ser desplazados largas distancias del orden de 10-100 km.
- Los cinturones son el resultado de un acortamiento horizontal y un engrosamiento vertical con relación a las dimensiones originales de las capas.

Un rasgo muy distintivo de estas regiones consiste en la presencia de plegamientos apilados unos sobre otros (sobrevolcados), lo que está aparejado a la aparición de condiciones sismogeológicas muy desfavorables tales como formación de fronteras sísmicas internas a los bloques, relativamente poco extensas y con grandes buzamientos, variaciones laterales intensas de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas, aparición de ondas laterales, difractadas etcétera.

En muchas regiones del mundo estas áreas (que pueden ser ejemplificadas en la región de Zagros, Irán, la que según se estima abarca el 49 % de las reservas de hidrocarburos acumuladas en los cinturones de cabalgamiento), son perspectivas para la exploración gasopetrolífera ya que en ellas se produce con frecuencia, una favorable combinación de diferentes premisas básicas de los sistemas petroleros: existencia de materia orgánica, rocas madres, maduración térmica, condiciones de reservorios, de trampas, sellos etc. Sin embargo, las capas alóctonas sobrecorridas que constituyen estas regiones, presentan patrones conformados por diferentes litologías y se manifiestan fracturadas y falladas lo que da lugar generalmente a una respuesta sísmica de muy baja calidad como fue señalado anteriormente.

La exploración de las zonas de cinturones de cabalgamientos, similares a la que constituye la franja petrolera norte de crudos pesados, constituye hoy en día un objetivo de primera importancia en muchas regiones del mundo [1].

Entre las principales zonas de este tipo, acerca de las cuales se han publicado diversos artículos se encuentran: la región de Wyoming en los EE.UU., Papúa (Nueva Guinea), cordillera oriental de Colombia, zona subandina de Bolivia, Apeninos centrales de Italia, área sureña terrestre de Trinidad, sector sureño de los Alpes italianos, montes Zagros en Irán, etc.

En la región de las Montañas Rocosas, por ejemplo, que se extiende desde Canadá hasta Méjico, se considera que existen muchas trampas petroleras provocadas por el choque de la placa oceánica del Pacífico contra la placa continental norteamericana. Las trampas petroleras formadas, aparecen localizadas desde Canadá hasta Wyoming, en las que millones de barriles de petróleo han sido descubiertos desde 1970. Esta región está, sin embargo, todavía subexplorada, a pesar de sus gigantes reservas potenciales, debido a que su exploración es muy costosa y los datos sísmicos obtenidos, aún con las más modernas tecnologías, no son siempre muy confiables.

Según se reporta por numerosos autores cubanos y extranjeros [2-4], la aplicación del Método Sísmico del Punto de Reflexión Común, habitualmente identificado por sus iniciales en idioma inglés (MCMP), tropieza en estas áreas con diversas limitaciones que dificultan mucho la interpretación geológica de sus resultados, tales como: irregularidades pronunciadas del relieve superficial, altas complejidades de las estructuras geológicas investigadas, lo que da origen a efectos de dispersión e interferencias destructivas con energía proveniente de diferentes planos del espacio, existencia de capas de altas velocidades en la parte superior de los cortes constituidas por rocas muy compactas tales como calizas, ofiolitas etc., lo que aconseja la aplicación combinada de la sísmica con otros métodos geofísicos como los de campos potenciales para disminuir el grado de ambigüedad de la interpretación de sus datos.

En muchas regiones caracterizadas por la tectónica compresiva de los cabalgamientos, se aprecian severas complicaciones del campo de velocidades lo que da lugar en los cortes sísmicos de tiempo (por ejemplo, los correspondientes al cinturón sobrecorrido de las Montañas Rocosas) a la formación de anomalías de falsos altos estructurales (*pull-up*) por el efecto de las velocidades en el medio sobreyacente, fallamientos, difracciones etcétera.

A continuación se exponen brevemente algunas experiencias sobre la aplicación de los métodos geofísicos más empleados en la investigación de estas regiones; no obstante, debe resaltarse que dadas las complejidades de las mismas, en ocasiones son también empleados otros adicionales como los métodos eléctricos, los radiométricos, los geomorfológicos, los geoquímicos etcétera.

MÉTODOS SÍSMICOS

Adquisición

Cualquier información estructural del subsuelo reflejada en una imagen sísmica, se basa en los datos adquiridos desde la etapa del levantamiento; las consecuencias de una mala adquisición son irreparables y ningún algoritmo es capaz de subsanar las faltas metodológicas cometidas en esta. A continuación se refieren algunas de las estrategias de adquisición que son más aconsejadas en estas regiones a escala internacional:

- Cálculo de los parámetros de adquisición a emplear mediante técnicas de modelación sísmica, que simulen las características de las regiones a investigar, aunque una frecuente limitación en este sentido, es que en los lugares donde más se requiere de las modelaciones es donde muchas veces menos se conocen los detalles propios de los campos de velocidades necesarios para realizar estas.
- Empleo preferente de la modalidad 3D de adquisición sísmica.
- Adecuación de la longitud del tendido sísmico y disminución de la extensión de las bases de los agrupamientos de geófonos empleados, a partir de análisis de modelaciones realizadas previamente a las campañas de adquisición; utilización de *offset* cortos y largos con magnitudes por ejemplo del orden de 75 m y 2 450 m respectivamente y selección apropiada de las magnitudes y profundidades de las cargas explosivas, cuando tal procedimiento de excitación es empleado, lo que logra mejorar sensiblemente en ocasiones la calidad de las imágenes sísmicas.
- Aumento del número de canales de registro sobre todo en sísmica 3D (hasta el orden de los cientos) y del grado de recubrimiento (cobertura) de las fronteras reflectoras en magnitudes del orden de 120-180 veces y aun mayores lo que acarrea mejoras sensibles de las imágenes sísmicas.

- Selección del tipo de sistema de observación a emplear, es decir, si será de tiro central (*split-spread*) o de flanco (*end-on*). Como resultado de algunas campañas terrestres realizadas en áreas de tectónica compleja, se reporta como más conveniente el sistema de tiro central, pero tal conclusión no puede ser tomada como una "receta" general sino que tiene que ser verificada en cada área concreta, basándose en un determinado volumen de trabajos de modelación y experimentales.
- Evaluación de algunos requerimientos del proceso de migración, tales como la longitud requerida del perfil (apertura) y la dirección del tramo en que se extenderá la recepción, mas allá de los límites supuestos de la estructura subterránea y valoración de las dimensiones superficiales del levantamiento en relación con las supuestas de la estructura profunda a cartografiar, para garantizar un adecuado grado de recubrimiento en el tramo de interés.
- Incremento de la energía de las fuentes vibratorias, cuando estas son empleadas, mediante distintas alternativas tales como el aumento de la duración de las emisiones ondulatorias (*sweeps*), el empleo simultáneo de varios vibradores a la vez y/o la suma vertical de varios *sweeps* emitidos en forma consecutiva.

Procesamiento

El procesamiento de los cortes sísmicos de las regiones de cinturones de cabalgamiento puede decirse que es de los más sofisticados y complejos que se llevan a cabo en el mundo.

En algunas publicaciones actuales dedicadas a este tema, se destaca que las estructuras geológicas en estas regiones son muy complejas y de carácter generalmente 3D, por cuya razón no debe esperarse que la sísmica 2D en ninguna de sus modalidades (migración en tiempo o en profundidad) produzca imágenes confiables y resolutivas del subsuelo, lo que solo se logra mediante la migración 3D en profundidades, a pesar de los mayores costos que este proceso exploratorio acarrea.

Desde hace años se ha hecho obvio, que la demanda de pericia sobre el procesamiento especializado para resolver los problemas de creación de imágenes en regiones con topografía extrema y estructuras complejas es un aspecto crucial. Ha quedado claro que para mejorar la calidad de la imagen en estas condiciones, hay que prestar especial atención a factores tales como: perfeccionamiento del cálculo de las correcciones estáticas para atenuar el pernicioso efecto de la superficie terrestre, maximización de la atenuación de los ruidos coherentes e incoherentes y el efecto del Normal Move Out (NMO) no hiperbólico debido a la influencia de gradientes laterales de velocidades y anisotropía, realización de migraciones tanto en tiempos como en profundidades (presuma) etcétera.

Según aconseja la experiencia, en la etapa del procesamiento, cada línea sísmica debe ser tratada específicamente y no deben ser empleados parámetros de procesamiento uniformes para extensas regiones.

Últimamente han sido reportados algunos ejemplos muy exitosos, sobre el empleo de la migración en profundidades antes de la suma mediante algoritmos anisotrópicos, los cuales son capaces de corregir desplazamientos laterales de las fronteras que se manifiestan en las imágenes, precisar las posiciones de los eventos en profundidad y focalizar los ejes cofásicos de las difracciones.

Actualmente se considera que la efectividad de la migración presuma de Kirchhoff mediante algoritmos que consideran la real curvatura de los rayos sísmicos, permite cartografiar mucho mejor tanto las capas de buzamientos muy agudos como los planos de fallas, en comparación con los algoritmos estándar de migración.

En el trabajo [5], se analiza el estado alcanzado del procesamiento de los datos sísmicos que se mantiene en la actualidad, el que se resume en la figura 1, la cual muestra que con el incremento de la complejidad estructural de las áreas investigadas, es recomendable pasar de los algoritmos de migración possuma en tiempo a los algoritmos de migración presuma en profundidad.

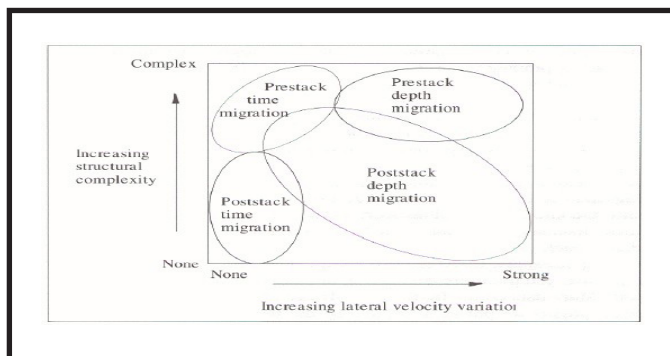


Fig. 1. Variación de los algoritmos de migración con la complejidad estructural de las regiones investigadas [5].

Interpretación

En numerosas fuentes bibliográficas extranjeras se reporta el positivo empleo que han tenido los atributos sísmicos (específicamente los de buzamientos, curvatura, azimuts y coherencia) para la interpretación de áreas complejas; por ejemplo, en algunas se expone la utilización de los atributos de buzamientos y azimuts para el análisis estructural de campos petroleros en el cinturón cabalgado de los Alpes y en el lago Maracaibo respectivamente, evidenciándose la capacidad resolutive de los mismos; también en algunas fuentes bibliográficas nacionales se reportan interesantes ejemplos sobre el exitoso empleo de los atributos geométricos que han permitido evidenciar discontinuidades de fronteras asociadas a fallas en los cubos sísmicos y de atributos físicos que han posibilitado sugerir directamente existencia de hidrocarburos. También la modelación de velocidades ha sido una

técnica de gran efectividad en el ámbito de la interpretación sísmica.

Como ya fue mencionado, para el estudio de estas regiones se emplea ampliamente la modelación sísmica [6] lo que permite realizar una interpretación menos ambigua de las mismas. En el trabajo referido, realizado en la Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil, se aborda el modelaje sísmico de una sección del cinturón de cabalgamiento norte cubano, que es el área petrolera por excelencia de la Nación, para lo cual se combinaron datos sísmicos y de pozos. En las figuras 2, 3, 4 y 5 se muestran respectivamente el modelo geológico, el petroacústico y la sección sintética 2D obtenida, luego de simplificar experimentalmente la configuración de las capas superiores; como resultado de este trabajo se esclarecieron interesantes aspectos para la interpretación sismogeológica de esta región.

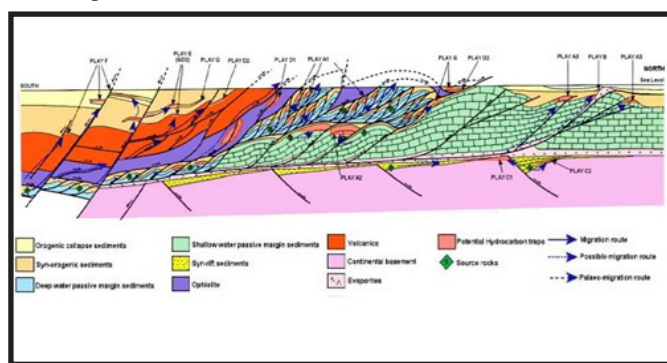


Fig. 2. Modelo geológico del cinturón de cabalgamiento norte cubano [6].

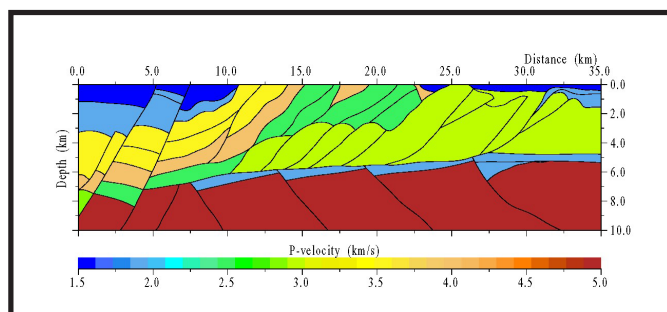


Fig. 3. Modelo petroacústico correspondiente a la sección representada en la figura 2 [6].

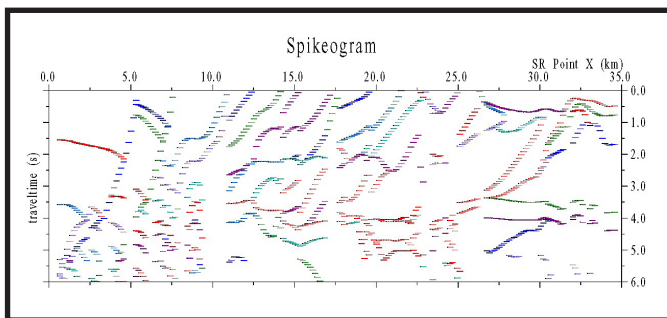


Fig. 4. Corte sísmico sintético migrado correspondiente al modelo de la figura 3 para una distancia entre canales $\Delta x = 15$ m y el pulso original emitido transformado en un spike [6].

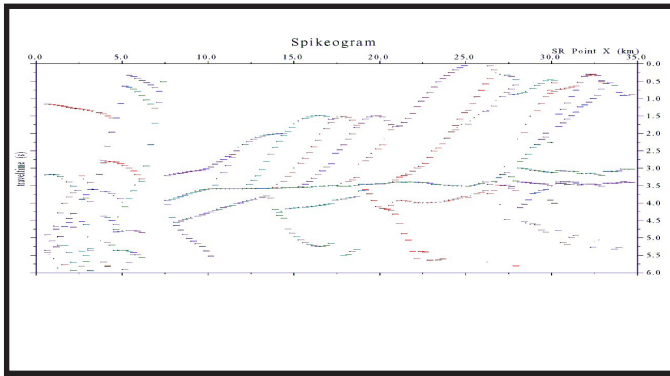


Fig. 5. Corte en tiempo sintético correspondiente al modelo de la figura 3, habiendo simplificado la representación de la constitución superior del medio para una distancia entre canales de recepción $\Delta x = 25$ m [6].

Resumiendo lo antes expuesto puede concluirse, que el método sísmico a pesar de la elevada resolución que generalmente caracteriza sus resultados, tiene limitaciones propias para el estudio por sí solo de estas regiones, lo que unido a la ambigüedad inherente a la interpretación, aconseja su aplicación combinada con otros métodos geofísicos, tales como los de campos potenciales, que han demostrado su potencialidad informativa en estos ambientes.

MÉTODOS DE CAMPOS POTENCIALES

La exploración geofísica involucra un complejo de métodos con el fin de estudiar el subsuelo y así lograr un pronóstico más acertado del modelo geológico real. En ese sentido los campos potenciales (gravimetría y magnetometría) han jugado un importante papel debido a la incertidumbre que presenta el método sísmico para la interpretación por sí solo, en las regiones de cinturones de cabalgamiento. La formación de un cinturón plegado y cabalgado implica contactos tectónicos entre rocas que fueron inicialmente depositadas en lugares distanciados centenares de kilómetros. Así, las propiedades físicas del corte geológico presentan una amplia variabilidad tanto en superficie como en profundidad. Se deduce de esta afirmación, que los campos gravitacionales y magnéticos sobre estos sectores de la corteza terrestre los que son medidos en miligales (10^{-5} m/s²) y nanoteslas (10^{-9} teslas) respectivamente, dependen de los tipos de rocas involucradas en los plegamientos.

En el caso del Cinturón Plegado de Hawasina [3] por ejemplo, localizado en la región de Abu Dhabi, perteneciente a Emiratos Árabes Unidos, los sedimentos plegados correspondientes a facies profundas, con densidad $2\,700$ kg/m³ forman un corrimiento ciego que se introduce entre los sedimentos del Cretácico Superior con densidad $2\,600$ kg/m³. El modelo calculado, indica que la elevación de carbonatos de banco autóctonos bajo los

sedimentos del Cretácico Superior, está contribuyendo a la existencia de un máximo local de la gravedad. En ausencia de rocas ígneas ricas en magnetita, el campo magnético presenta anomalías muy débiles en un campo regional aproximadamente constante (figura 6), medidos en miligales (10^{-5} m/s²) y nanoteslas (10^{-9} tesla) respectivamente, dependen de los tipos de rocas involucradas en los plegamientos.

En el caso del Cinturón Plegado Cubano (figura 7) sin embargo, el campo magnético se comporta de una manera más complicada que la referida anteriormente, debido al corrimiento de las ofiolitas sobre los sedimentos plegados del paleomargen continental.

En el ejemplo señalado, la interpretación del campo magnético es cualitativa; no obstante, se reconocen características del campo según las cuales se pueden fijar límites en el modelo; además, se puede comprobar que el mínimo local del campo magnético, marca el borde frontal de los cuerpos magnetizados.

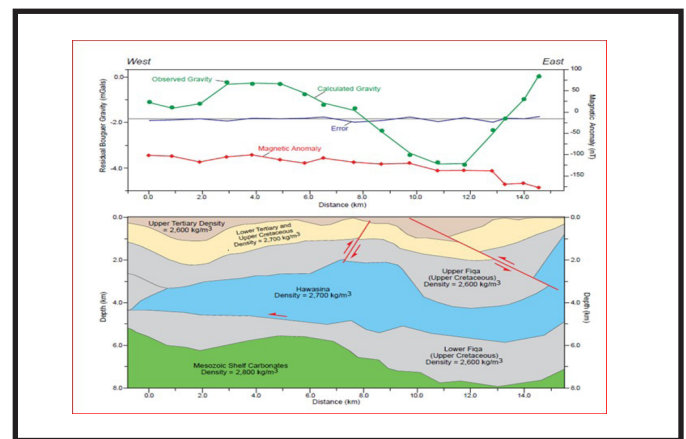


Fig. 6. Modelo calculado sobre el cinturón plegado de Hawasina [3].

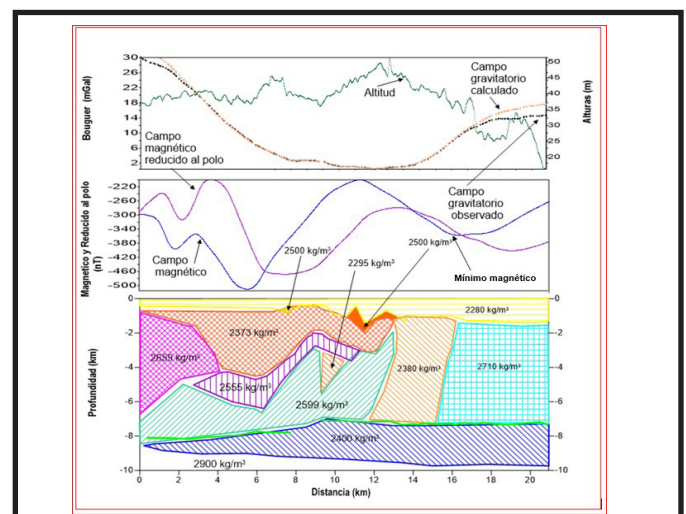


Fig. 7. Modelo calculado a partir de datos correspondientes a un perfil con dirección Sur- Norte en la provincia de Ciego de Ávila [7].

En el campo reducido al polo, el límite mencionado coincide con el incremento del gradiente horizontal magnético. Al sur de este límite, existen rocas ígneas en el corte geológico correspondientes a las ofiolitas y al Arco Volcánico Cretácico. Por su parte, la interpretación cuantitativa del campo gravitacional corrobora las conclusiones alcanzadas a partir del análisis del campo magnético. Al norte se encuentra un enorme espesor de sedimentos de banco carbonatado con una densidad de unos $2\,710\text{ kg/m}^3$.

El límite sur del banco carbonatado se conoce con el nombre de Falla Las Villas, y se trata de una estructura de carácter regional. Inmediatamente al sur aparece un sector de rocas depositadas y comprimidas contra la paleoplataforma durante la Orogenia Cubana que sucedió entre el Campaniano y el Eoceno Medio. Esta paleocuenca de antepaís recibió el aporte de las rocas ígneas que existían al sur, cuyos fragmentos se depositaron en una matriz más joven; el paquete tiene una densidad media de $2\,380\text{ kg/m}^3$. Los fragmentos del arco volcánico y las ofiolitas aumentan la susceptibilidad magnética media de esta cuenca.

Las ofiolitas corridas sobre los sedimentos del paleomargen continental debido a los procesos tectónicos que las afectaron, presentan una densidad disminuida de $2\,373\text{ kg/m}^3$. Debajo de ellas yacen los sedimentos depositados, plegados y corridos durante la orogenia cuya densidad alcanza $2\,555\text{ kg/m}^3$; debajo de los cuales se encuentran los espesores sedimentarios plegados y corridos de facies batiales, que se depositaron en el talud continental desde el Jurásico hasta la parte inferior del Cretácico Superior. La densidad de estos últimos se estima en $2\,599\text{ kg/m}^3$ (figura 7) [7].

Como puede observarse el carácter de los campos gravitacional y magnético en los cinturones plegados y corridos suele ser extremadamente complicado debido al contacto abrupto entre rocas formadas en condiciones geológicas muy diferentes. Los ejemplos citados, para cuya elaboración se han combinado datos de campos potenciales, sísmicos y geológicos de superficie y pozos, muestran los rasgos generales de los modelos respectivos y corroboran, que solo el análisis integrado de diferentes informaciones puede disminuir las ambigüedades inherentes a la interpretación sobre la constitución de estas complejas regiones.

ROL DE LA COMBINACIÓN DE MÉTODOS

Como fue anteriormente señalado, la aplicación combinada de diferentes datos geólogo-geofísicos, en las complejas condiciones geológicas de los cinturones de cabalgamiento, resulta imprescindible para elevar la efectividad de la búsqueda y prospección gasopetrolífera. Las informaciones de los diferentes métodos se complementan unas con otras, permitiendo, con una mayor confiabilidad valorar los rasgos estructurales y tectónicos de los territorios investigados [8-12].

La interpretación combinada, se realiza mediante estrategias tales como: comparación directa de los resultados obtenidos por los distintos métodos (interpretación cualitativa) [13-15] en perfiles o en área; en este último caso, es muy empleada la herramienta informática de los Sistemas de Información Geográfica (SIG); recálculo de los parámetros propios de un método en los de otro; establecimiento de relaciones de correlación entre los datos de los distintos métodos; solución de la tarea directa combinada (modelación) etcétera.

CONCLUSIONES

La principal importancia del presente trabajo, consiste en que el marco de su elaboración, fue realizada una amplia investigación bibliográfica sobre las características de la adquisición, procesamiento e interpretación sísmica y de campos potenciales, así como la contribución del análisis combinado de los datos de estos métodos en regiones de cinturones de cabalgamiento similares al que conforma la franja de crudos pesados norte cubana, e identificadas algunas alternativas para lograr una mayor confiabilidad de la información que estos proporcionan, las que pueden ser útiles tanto para la prospección geofísica petrolera nacional como para la docencia universitaria en este campo.

REFERENCIAS

1. USGS. "US Geological Survey World Petroleum Assessment 2000. Description and Results", *USGS Digital Data Series*, 2000 [ref. Julio 2004]. Disponible en Web: <https://geology.cr.usgs.gov/energy/dds-060/.../woutsum.pdf>, [consultado en septiembre 2016].
2. **SOLEIMANI, Mehrdad**. "Improvement of seismic structural interpretation of Zagros fold-thrust belt by dip scanning in common diffraction surface imaging method". *Acta Geod. and Geophys.* 2016. Disponible en Web: <https://www.researchgate.net/publication/306096258>, [consultado en noviembre 2016].
3. **ALÍ, Mohammed**. "Geophysical investigation of Al Jaww Plain, eastern Abu Dhabi: Implications for structure and evolution of the frontal fold belts of the Oman Mountains". *GeoArabia*, 2008, vol. 13, núm. 2. pp. 91-118.
4. **GONZÁLEZ, RODRÍGUEZ Esther M.; DOMÍNGUEZ, GARCÉS B. René et. al.** "Características estructurales internas de la región Varadero-Bahía de Matanzas", en memorias del V Congreso Cubano de Petróleo. 2015, ISSN: 2307-499X.
5. **LINNER, Christopher**. "On the history and culture of geophysics and science in general" *Revista The Leading Edge*. Febrero 1999 Online ISSN: 1938-3789 Disponible en Web: tle.geoscienceworld.org/content/17/12/1682 [consultado junio 2015].

6. **MIRÓ, Guillermo; SILVA, Josías; LANDAU, Luiz.** "Aplicación del modelaje sísmico 2D al estudio del cinturón de sobrecorrimiento norte cubano". III Congreso de Geofísica, 2007, Habana, Cuba. ISBN: 978-959-7117-16-2.
7. **RIFÁ HERNÁNDEZ, María; PROL, José** "Caracterización geológica de los datos geofísicos en el sector Brujo" IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, 2011, Habana, Cuba. ISBN: 978-959-7117-16-2.
8. **SOLEIMANI, Mehrdad** "Seismic imaging of mud volcano boundary in the east of Caspian Sea by common diffraction surface stack method" [En línea]. [Ref. febrero 2016]. Disponible en Web: https://www.researchgate.net/profile/Mehrdad_Soleimani2/ [consultado en septiembre 2016].
9. **ARANGO ARIAS, Eduardo Diego; PÉREZ FLORES Marco Antonio; BATISTA RODRÍGUEZ José Alberto** "Crustal structure of eastern Cuba, derived by constrained 3D gravity inversion", Versión impresa 2014, *Revista Geofísica. Internacional*, vol.53 núm.3, México jul./sep. 2014. ISSN: 0016-7169,
10. **LUAN, C.; NGUYEN MANN, Paul.** "Gravity and magnetic constraints on the Jurassic opening of the oceanic Gulf of Mexico and the location and tectonic history of the western main transform fault along the eastern continental margin of Mexico" [en línea]. [Ref. Enero 2016]. Disponible en Web: <http://library.seg.org/doi/abs/10.1190/INT-2015-0110.1> [consultado en agosto 2016].
11. **CHRISTINE GREGG, Andrea** "Tectonic evolution of the West Florida basin, Eastern Gulf of México", 2014, a thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Department of Geological Sciences in the Graduate School of The University of Alabama. Disponible en Web: https://www.acumen.lib.ua.edu/u0015/.../u0015_0000001_0001726.pdf [Consultado en agosto 2016].
12. **KEITH H., James; AMELIN, Nikolay; MILES, Laslo** "Geology without Limits Investigation of Lithosphere Deep Structure of the Caribbean by Seismic Methods", 2015, 20th Caribbean Geological Conference, Disponible en Web: www.thegstt.com/wp.../Geology-Without-Limits-Abstract.pdf
13. **PROL BETANCOURT, José G.; RIFÁ HERNÁNDEZ, María C.; MIRÓ PAGÉS, Guillermo.** "Ubicación de zonas favorables para la exploración petrolera a partir del estudio de los campos potenciales en el sector Esmeralda". *Revista Ciencias de la Tierra y el espacio*, 2016, vol. 17, núm. 1, 2016, pp 81-96. ISSN: 1729-3790.
14. **PROL BETANCOURT, José G.; RIFÁ HERNÁNDEZ, María C.** "Modelo geológico conceptual de Cuba a partir de los campos potenciales y de las últimas con-

cepciones sobre la evolución tectónica del territorio". 2016, VIII Jornada científico- técnica CEINPET. ISBN: 978-959-7117-72-8.

15. **PROL BETANCOURT, José G.; RIFÁ HERNÁNDEZ, María C.** "Conversión de la velocidad de intervalo a densidad en el área Fragoso. Implicaciones para la exploración". V Congreso Cubano de Petróleo, 2015, ISSN: 2307-499X.

AUTORES

Guillermo Miró Pagés

Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular-Consultante, Departamento de Geociencias, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba. Miembro de la Sociedad Cubana de Geología; la Unión de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba y la Sociedad de Geofísica del Brasil

José Gemén Luis Prol Betancourt

Ingeniero Geofísico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Investigador Auxiliar, Profesor Principal, Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

María Caridad Rifá Hernández

Ingeniera Geofísica, Máster en Ciencias, Instructora, Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Youilen María Echagarruga Palomo

Ingeniera Geofísica, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Integrated Geophysical Methods in the Oil Exploration of the Overthrust Belts

Abstract

The geologic areas of tectonic compressive corresponding to the calls overthrust belts, present a great exploratory interest to world scale, for the fact that near 14% of the discovered oil reservations and 15% of the volume that as is considered it is still to discover, it is located in these regions [6]. Especially in Cuba the main oil production is located on one of these areas known as Belt Folded Cuban North; of there the importance of studying other areas of the world with characteristic tectonic similar and the approaches exploratory employees in the same ones. The present article consists on the analysis of numerous experiences carried out in these areas that have been published in different bibliographical sources and also of investigations carried out by the own authors, in order to disclose the same ones with exploratory and educational ends. The article is dedicated to the seismic methods and of potential fields to be habitually the geophysical techniques but employees in this field.

Key words: geophysical, methods, overthrust belts, exploration