

Transformación del campo gravitacional para la separación de la contribución de distintas fuentes de anomalías en la exploración petrolera en Cuba. Caso Vertientes-La Gloria.

Aliss María Bejerano Kindelan¹, José Gemen Luís Prol Betancourt² y María Caridad Rifá Hernández³

¹ Ingeniera Geofísica. Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba. Correo electrónico: aliss@digicupet.cu.

² Ingeniero Geofísico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar del Centro Politécnico del Petróleo (CPP) y de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE. Investigador Auxiliar del Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba. Correo electrónico: prol@digicupet.cu.

³ Ingeniera Geofísica. Máster en Geofísica Aplicada a la Exploración de Petróleo y Gas. Profesora entrenadora del Centro Politécnico del Petróleo. Instructora de la Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE, La Habana, Cuba. Investigador Auxiliar del Centro de Investigación del Petróleo. Correo electrónico: rifa@digicupet.cu.

RESUMEN

La exploración petrolera en Cuba tiene como propósito explotar los yacimientos existentes y explorar nuevas áreas de interés. En la Franja Petrolera Norte Cubana, donde se encuentran las mayores reservas del país, se explota hidrocarburo en rocas carbonatadas plegadas del paleomargen continental. La aplicación de técnicas convencionales de procesamiento e interpretación del campo gravitacional, han conducido a modelos inadecuados en condiciones geológicas complejas, lo que ha dificultado la separación de la contribución de distintas fuentes de anomalías en la región. El área de investigación Vertientes-La Gloria, localizada en parte de las provincias Ciego de Ávila y Camagüey, presenta gran atractivo petrolero debido a las manifestaciones de hidrocarburos en superficie y en pozo. En ella no afloran los sedimentos plegados del paleomargen continental y los pozos existentes tampoco cortan estas secuencias. El Mínimo Norte Cubano, anomalía gravitacional donde se hallan los

yacimientos reconocidos hasta hoy, se extiende hacia la región investigada; lo que es probable encontrar estos sedimentos bajo las rocas ígneas que afloran en el sector. La metodología de esta investigación se basa en el estudio del campo gravitacional en diferentes bandas del espectro de frecuencia con la aplicación de la técnica del Espectro de Potencia Promediado Radialmente, el cual permitió segregar la contribución de distintas fuentes de anomalías en la región.

Palabras claves: paleomargen continental, espectro de potencia, campo gravitatorio, campo magnético, modelación compleja.

ABSTRACT

The oil exploration in Cuba aims to exploit existing fields and explore new areas of interest. In the Northern Cuban Oil Belt, where the country's largest reserves are located, hydrocarbon is exploited in folded carbonate rocks of the continental paleomargin. The

application of conventional techniques of processing and interpretation of the gravitational field have led to inadequate models in complex geological conditions, which has made it difficult to separate the contribution of different sources of anomalies in the region. The Vertientes-La Gloria research area, located in part of the Ciego de Ávila and Camagüey provinces, has great oil appeal due to the manifestations of hydrocarbons on the surface and in the well. In it the folded sediments of the continental paleomargin do not emerge and the existing wells do not cut these sequences either. The Cuban Minimum North, a gravitational anomaly where the deposits recognized to date are found, extends towards the investigated region; what is likely to find these sediments under the igneous rocks that emerge in the sector. The methodology of this research is based on the study of the gravitational field in different bands of the frequency spectrum with the application of the Radially Averaged Power Spectrum technique, which allowed segregating the contribution of different sources of anomalies in the region.

Keywords: continental paleomargin, spectrum of power, gravitational field, complex modelation.

RESUMO

O objetivo da exploração de petróleo em Cuba é explorar os campos existentes e explorar novas áreas de interesse. No cinturão de petróleo cubano do norte, onde estão as maiores reservas do país, o hidrocarboneto é explorado em rochas carbonáticas dobradas da paleomargem continental. A aplicação de técnicas convencionais de processamento e interpretação do campo gravitacional levou a modelos inadequados em condições geológicas complexas, o que dificultou separar a contribuição de diferentes fontes de anomalias na região. A área de pesquisa de Vertientes-La Gloria, localizada em parte das províncias de Ciego de Ávila e Camagüey, possui grande apelo de petróleo devido às manifestações de hidrocarbonetos na superfície e no poço. Nele, os sedimentos dobrados da paleomargem continental não emergem e os poços existentes também não cortam essas seqüências. O Norte Mínimo

Cubano, uma anomalia gravitacional onde se encontram os depósitos reconhecidos até hoje, se estende em direção à região investigada; o que provavelmente encontrará esses sedimentos sob as rochas ígneas que emergem no setor. A metodologia desta pesquisa baseia-se no estudo do campo gravitacional em diferentes bandas do espectro de frequências com a aplicação da técnica Radial Averaged Power Spectrum, que permitiu segregar a contribuição de diferentes fontes de anomalias na região.

Palavras chaves: paleomargem continental, espectro de poder, campo gravitacional, campo magnético, modelación complejo.

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de la Franja Petrolera Norte Cubana (FPNC) producen el mayor volumen de petróleo del país (Otero-Marrero *et al.*, 2013). Allí, los pozos cortan las secuencias carbonatadas de las Unidades Tectono-Etratigráficas (UTE) Placetas y Camajuaní. En algunos casos, las perforaciones atraviesan enormes espesores de serpentinitas antes de entrar en los sedimentos de talud (Sánchez-Arango *et al.*, 1985).

En zonas aledañas al área de investigación Vertientes-La Gloria (**Figura 1**), se destacan los pozos perforados en 1950, en las localidades Cristales y Jaitibonico, los cuales reservan crudo en rocas efusivo-sedimentarias o sedimentos depositados durante la orogenia y sin conocerse aún por las perforaciones su roca generadora (Linares-Cala *et al.*, 2011; Rifá-Hernández, 2012).

En el área de investigación Vertientes-La Gloria, no se ha comprobado la existencia de yacimientos petroleros, ni tampoco pozos que corten las secuencias carbonatadas del paleomargen continental; sin embargo, pueden hallarse numerosas manifestaciones de hidrocarburos en pozo y en superficie.

Según afloramientos y datos de pozos, el corte geológico está constituido por secuencias del margen continental de Bahamas representado por rocas de la plataforma carbonatada UTE Remedios (Linares-Cala *et al.*, 2011; Jiménez de la Fuente, 2015),



Figura 1. Ubicación del sector de investigación Vertientes-La Gloria. Modificado de www.google.com (Febrero, 2019).

del paleotalud continental UTE Placetas y Camajuaní (Linares-Cala *et al.*, 2011; Iturralde-Vinent, 2012) y el Terreno Zaza (Linares-Cala *et al.*, 2011; Prol-Betancourt *et al.*, 2011; Iturralde-Vinent, 2012), cubiertas o no, por las secuencias sinorogénicas correspondientes del Cretácico Superior-Eoceno Medio. Sobre estas secuencias tectónicamente emplazadas, yacen con discordancia angular y estratigráfica los depósitos postorogénicos del Eoceno Superior-Neógeno-Cuaternario (Figura 2).

Las rocas pertenecientes a las UTE Placetas y Camajuaní, son rocas madres, reservorios y trampas por excelencia de petróleo en Cuba y representan un patrón a seguir en la búsqueda de hidrocarburos debido a que todos los yacimientos, explotados hasta la actualidad, están asociados a estas unidades. Es por ello, que el enfoque en la búsqueda petrolera se basa en lo fundamental, en la detección de zonas donde con mayor probabilidad estén elevadas estas secuencias del paleomargen continental, que existen en forma de escamas tectónicas yuxtapuestas, de forma presumibl,

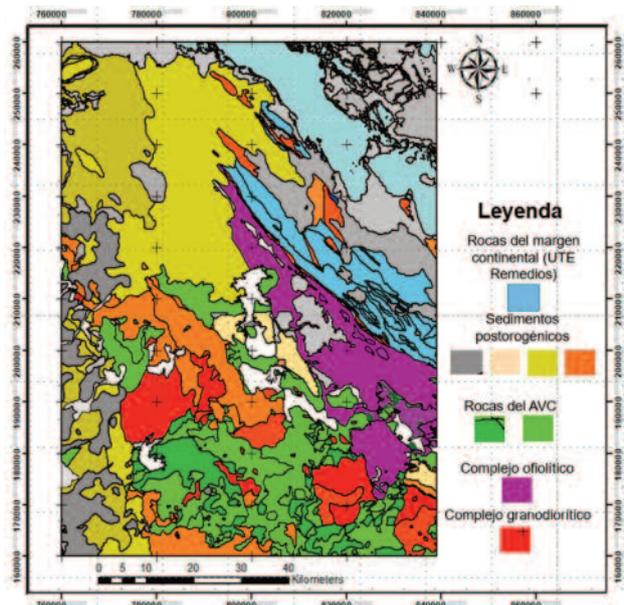


Figura 2. Mapa geológico del área de investigación a escala 1:100000 (Base de datos del Instituto de Geología y Paleontología).

por debajo del Arco Volcánico Cretácico (AVC) y las ofiolitas.

El Terreno Zaza resulta de gran importancia para esta investigación pues, aunque estas rocas no son generadoras, en algunos lugares de Cuba se han encontrado hidrocarburos asociados a estas; se presume que esto sucede producto de la migración del crudo, tal y como ocurre en el yacimiento Cantel (al sur del yacimiento Varadero).

Fundamentos teóricos

Según el análisis de los antecedentes, esta investigación se basa en el modelo geológico esquemático con-

ceptual que relaciona las UTE Placetas, Camajuani, Remedios y el Terreno Zaza con los campos gravitatorio y magnético que estas generan (Prol-Betancourt *et al.*, 2016). Las curvas de los campos gravimétricos y magnéticos son las curvas observadas representadas de forma esquemática (**Figura 3**).

En el modelo, de sur a norte se observa un máximo gravimétrico y un máximo magnético asociados a grandes espesores del Terreno Zaza, con elevados valores de la densidad y de la susceptibilidad magnética respectivamente, que alcanzará hasta 8 km de espesor.

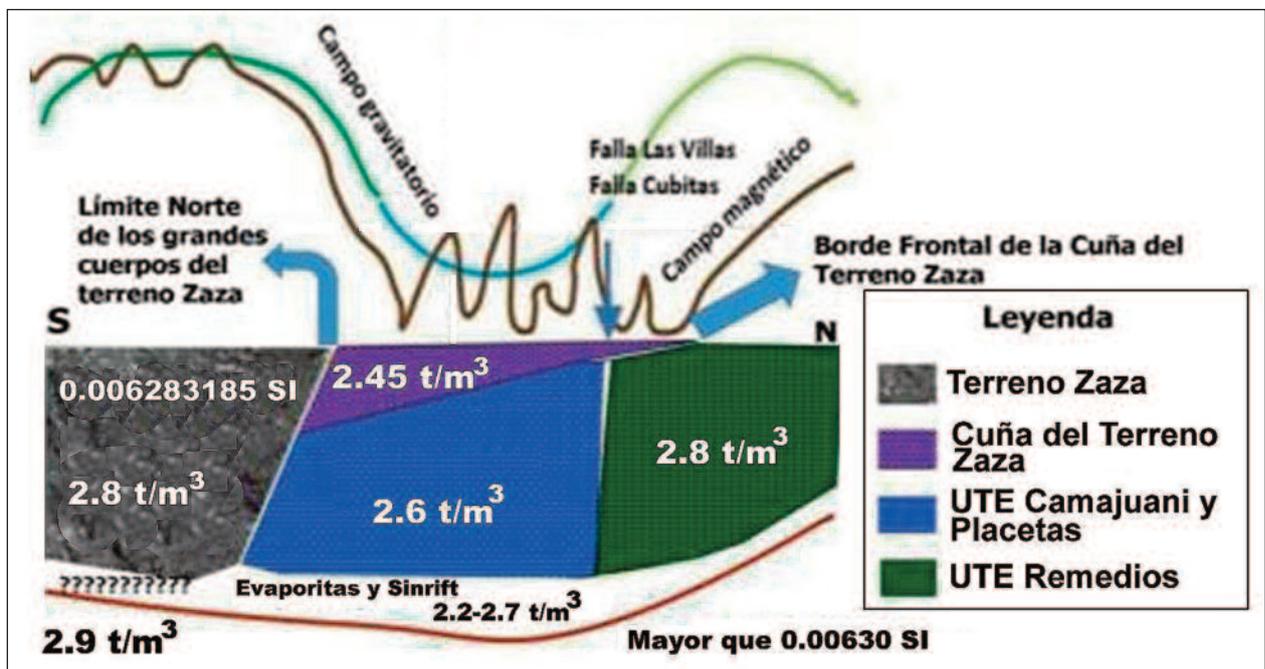


Figura 3. Modelo geológico conceptual de las UTE y el Terreno Zaza y los campos que estas generan (Modificado de Prol-Betancourt *et al.*, 2016).

El carácter ruidoso de la anomalía magnética se explica debido a la presencia de heterogeneidades en la parte más somera de los cuerpos magnetizados, con la consecuente variabilidad de sus propiedades magnéticas (Prol-Betancourt, 1975; García-Martínez *et al.*, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para esta investigación se utilizó el mapa gravimétrico de la República de Cuba a 1:50000 (Modificado de Linares-Cala *et al.*, 2017). Esta información pertenece a

la Base de datos del Instituto de Geología y Paleontología (IGP) (**Figura 4**).

Métodos

El dato gravimétrico fue procesado con los softwares *Surfer versión 11* y el *Geosoft Oasis Montaj versión 8.3.3*.

Las mallas primarias o grids fueron generadas con un nivel de expansión específico, de forma tal que se atenúan al máximo los efectos de bordes de la función, es decir, las reverberaciones causadas por el

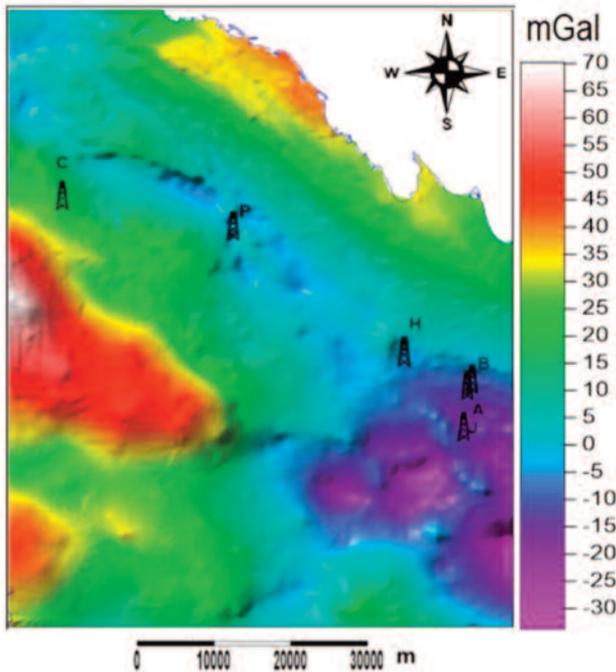


Figura 4. Mapa de anomalías de Bouguer.

fenómeno de Gibbs. Eliminar este fenómeno, origina que el espectro de la función en sus límites sea continuo tendiendo a cero. Esto se logra mediante las modalidades de la función *tapering* en el *Geosoft Oasis Montaj* (Geosoft-Inc, 2015).

Para la regularización de los datos se interpolaron mediante el método Kriging los valores de anomalía en Reducción de Bouguer a una distancia de 200 m, con lo cual se garantizó la recuperación de la función de entrada sin *aliasing*. Para comprobar que el proceso de interpolación había sido conducido de forma correcta, se representó sobre el mapa de isolíneas obtenido, la red original de los puntos de los levantamientos utilizados; de esta forma se demostró que las isolíneas satisfacían los valores correspondientes a los mencionados puntos (*Golden-Software*, 2012). Una vez comprobada la exactitud de los valores interpolados en la *grid*, se extrajo la red a 0.5 km, para después aplicar los filtros que se habían elegido para el procesamiento. Las transformaciones del campo se efectuaron con el objetivo de resaltar aquellas componentes anómalas que son de interés de acuerdo con el objetivo o tarea geológica planteada y

en una primera aproximación, deben eliminar o reducir la influencia de los ruidos y resaltar las componentes de baja o alta frecuencia, según sea el interés.

Determinación de profundidades a partir del análisis espectral.

Este método genera una estimación de la profundidad de los contrastes de densidad significativos en la corteza (Studinger *et al.*, 1997). El análisis espectral como método de estimación de la profundidad de un cuerpo que origina una anomalía, se realiza en el dominio de la frecuencia y permite evaluar cómo se distribuye la energía en función de la frecuencia.

En sus inicios, el método asume que las interfases son horizontales con pequeñas variaciones en su relieve. La variación gravitacional de esta topografía del subsuelo puede ser descrita en el dominio de la frecuencia a partir del primer término de la expansión de Parker (1972, citado por Studinger *et al.*, 1997). Asumiendo un grupo de fuentes prismáticas distribuidas sobre la topografía del subsuelo, el espectro de potencia de la gravedad de un conjunto de cuerpos prismáticos, revela una relación casi lineal entre el número de onda y la densidad del espectro de potencia (PSD).

Si se grafica el logaritmo natural del espectro de potencia promediado radialmente (Radially Averaged Power Spectrum) de la anomalía de Bouguer versus el número de onda, resultan muchos segmentos lineales los que corresponden a la profundidad media de los contrastes de densidad. La profundidad media a la fuente es proporcional a la pendiente de la línea que mejor ajusta a la curva (Studinger *et al.*, 1997).

Dentro de las condiciones que debe cumplir un área de estudio, para la obtención de resultados óptimos a partir de la aplicación de esta herramienta, se encuentran:

- Una distribución espacial de los datos uniforme
- Provincias de geología uniforme
- Gran extensión de la zona de estudio como para resolver la longitud de onda larga.

Considerando un mallado, en el que se incluyen varias fuentes (mallado de gran tamaño), la profundidad estadística de los topes de las fuentes podría ser determinada calculando el logaritmo del espectro (**Ecuación 1**).

$$\text{Log}E(r) = 4\pi hr \quad (1)$$

Donde h es la profundidad estimada por medio de la Ecuación (**Ecuación 2**).

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\text{Log}E(r)}{r} \quad (2)$$

Donde $\frac{\text{Log}E(r)}{r}$ es la derivada del espectro de potencias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El filtrado digital de los datos gravimétricos de *Bouguer*, implica siempre una atenuación selectiva de las frecuencias presentes en la función de entrada de acuerdo con la característica de amplitud del filtro utilizado. Los datos medidos se transforman al dominio de frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT de sus siglas en inglés *Fast Fourier Transform*). La transformada de Fourier es una función compleja, y su módulo expresa el aporte que significa la amplitud de las componentes de la función de entrada según sus frecuencias correspondientes. Esta última función se conoce como el espectro de amplitud y el cuadrado del espectro de amplitud es el espectro de potencia.

Con el fin de separar la contribución de distintas fuentes de anomalías de gravedad, se calculó el espectro de potencia promediado radialmente (**Figura 5**). Este método propuesto por Spector y Grant (1970), permite separar la contribución de las distintas fuentes de la anomalía de gravedad en función del número de onda radial de la señal completa. Este proceso puede ser realizado previamente, sin conocer de forma necesaria la geometría de los cuerpos fuentes y su contraste con la roca circundante.

El espectro de potencia promediado radial-

mente para el área de investigación presenta tres pendientes. La primera se localiza entre las frecuencias 0.03 y 0.06 y corresponde a los efectos más regionales; la tercera entre 0.18 y la frecuencia de Nyquist se asocia a fuentes muy someras, a los ruidos geológicos y a los errores propios del levantamiento; y la segunda, de interés para la exploración, entre 0.08 y 0.18 (**Figura 6**). La profundidad media de las fuentes se determina por la expresión matemática de Spector y Grant (1970).

Según la **Ecuación 2**, se estimarán las profundidades de las fuentes, bajo la suposición de que las fronteras se aproximan por los topes de prismas cuyas bases tienen la misma dimensión que la celda de la malla. El método establece que la pendiente del espectro de potencia promediado radialmente es proporcional a la profundidad promedio de la frontera que genera las anomalías locales (Meskó-Atila, 1984) (**Tabla 1**).

La segregación de las diferentes fuentes de anomalías gravimétricas fue posible a partir de las transformaciones realizadas a los datos de anomalía de *Bouguer*. Profundidades promedios de 10.34 km, que corresponden a las fuentes de efecto regional, 2.38 km a la profundidad objetivo para la exploración y 0.0031 km a la frecuencia de *Nyquist*, asociada a fuentes muy someras, ruidos geológicos y errores propios del levantamiento.

CONCLUSIONES

- El análisis de la red de datos gravimétricos con el espectro radial promediado de potencia permitió seleccionar el mapa de anomalías locales óptima para la región de investigada y estimar la profundidad promedio de las fuentes.
- Las transformaciones realizadas a los datos gravimétricos de *Bouguer* permitieron separar la contribución de distintas fuentes de anomalías. Fuentes de un efecto regional a una profundidad de 10.34 km correspondiente a las frecuencias 0 y 0.08 Hz. Otro entre las frecuencias de 0.18 y la frecuencia

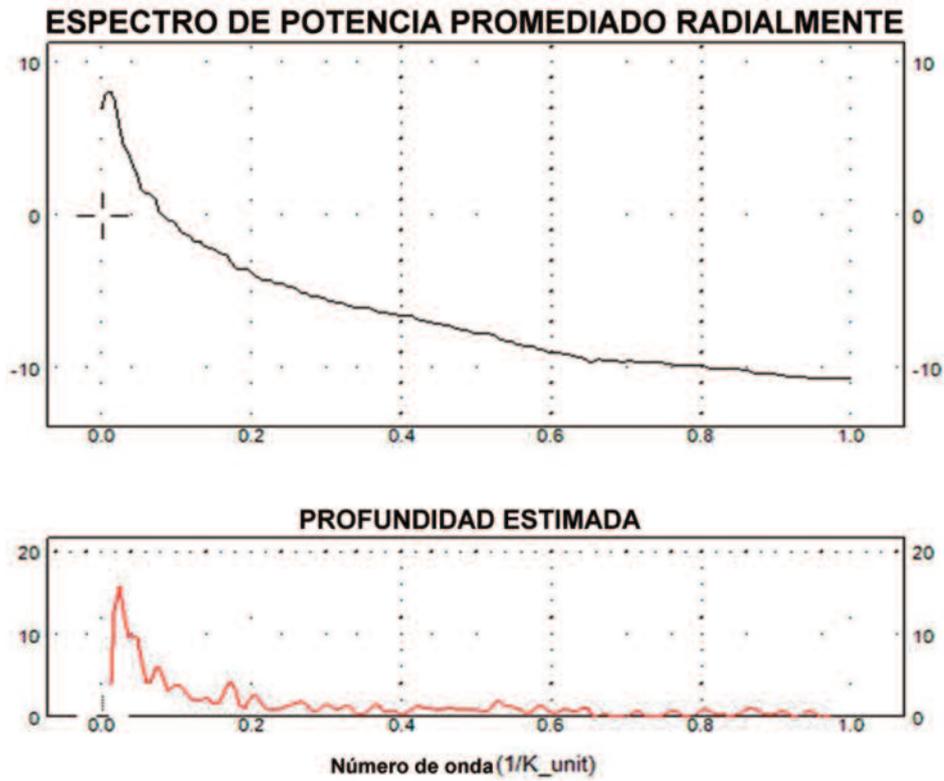


Figura 5. Espectro de potencia promediado radialmente de los datos gravimétricos.

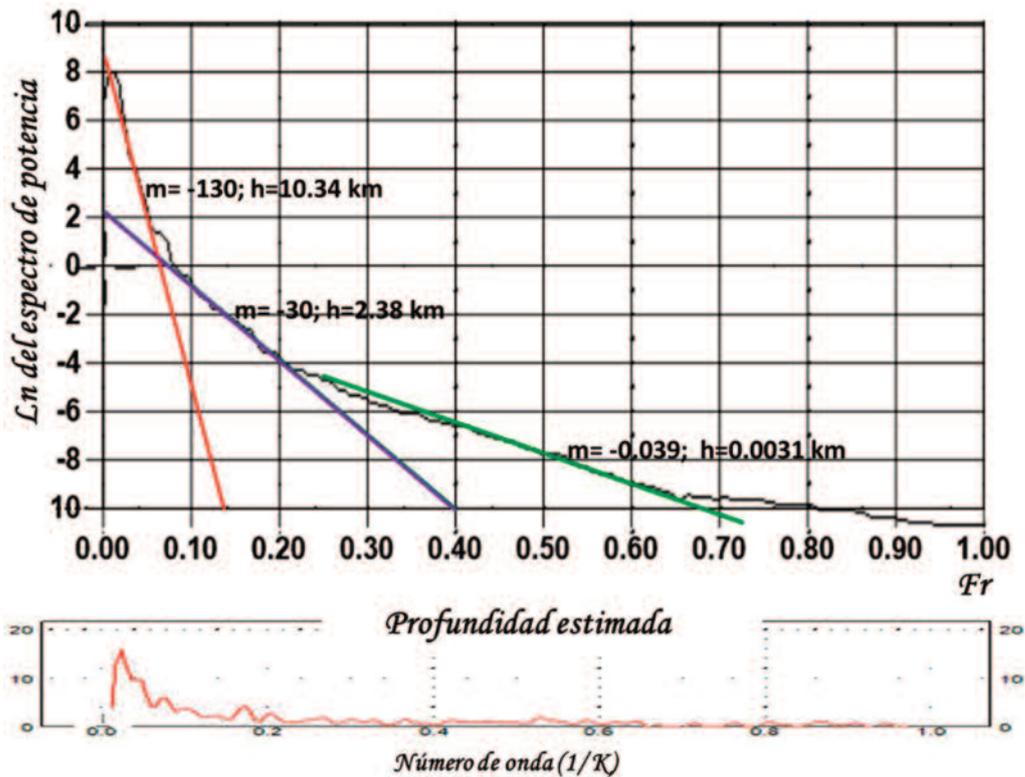


Figura 6. Espectro radial de potencia promediado de los datos gravimétricos.

Tabla 1. Valores de pendiente y profundidad media de las fuentes.

Intervalo de frecuencias [Hz]		Pendiente	Fuentes	h [km]
Desde	Hasta			
0.03	0.06	-130	Efectos más regionales.	10.34
0.08	0.18	-30	Objetivo para la exploración	2.38
0.38	Frec. de Nyquist (0.52)	-0.039	Muy someras, ruidos geológicos y errores propios el levantamiento.	0.0031

de Nyquist, con una profundidad estimada de 0.0031 km, asociada a fuentes muy someras, ruidos geológicos y errores propios el levantamiento. Para terminar, las fuentes vinculadas a las frecuencias entre 0.08 y 0.18 Hz, con una profundidad media estimada de 2.38 km, representan el objetivo para la exploración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- García-Martínez, A., Bejerano-Kindelán, A.M., Baez-Gutiérrez, R., Carbonell-López,** 2018, Métodos Geofísicos Aplicados a la búsqueda, prospección y exploración de yacimientos de hidrocarburos. *In Proyecto Final en Cuba Oriental*. La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», CUJAE.
- Geosoft-INC.** 2015. Manual de usuario *Oasis Montaj* (Version for 8.3.3). 2015.
- Golden-Software,** 2012, Manual de usuario *Surfer* 11. (U.S., 2012. Designers: LAW, U.S.A.C.
- Iturralde-Vinent, M.,** 2012, Geología y Paleogeografía. Unidades Tectono-Estratigráficas. Compendio de Geología de Cuba y del Caribe, vol. II.
- Jiménez de la Fuente L.,** 2015, Evaluación geológico-geomorfológica para la búsqueda de hidrocarburos en las provincias de Las Tunas y Holguín. *In Facultad de Ciencias Técnicas*. Pinar del Río: Universidad de Pinar del Río «Hnos. Saíz Montes de Oca».
- Linares-Cala, E., Díaz-Ramírez, G., Castro-Alfonso, L.,** 2017, Perspectivas gasopetrolíferas de los bloques 17 y 18. Norte de las provincias Las Tunas y Holguín. CD-ROM VII Convención de Ciencias de la Tierra, 2017.
- Linares-Cala, E., García-Delgado, D., Delgado-López, O., López-Rivera, J.G., Strazhevich,** 2011, *Yacimientos y manifestaciones de hidrocarburos de la República de Cuba*. Edtion ed. La Habana: Centro de Investigación del Petróleo. 483 p. ISBN 978-959-7117-33-9.
- Meskó-Atila,** 1984, *Digital filtering for applications in geophysical exploration for oil*. Edition ed. Budapest: Akadémiai, Kiado, 1984.
- Otero-Marrero, R., López-Rivera, J.G., García-Delgado, D.,** 2013, Zonación Tectono Estratigráfica del sector oriental de la Franja Norte de Crudos Pesados de la República de Cuba. IV Congreso cubano de petróleo y gas. PETRO-GAS'2013, vol. Petro1-P4, p. 9.
- Prol-Betancourt, J.L.G.,** 1975, Investigaciones gravimétricas y magnetométricas en los perfiles regionales de Oriente. *In CEINPET*.
- Prol-Betancourt, J.L.G.; Rifá-Hernández, M.C.,** 2011, Interpretación de los campos potenciales en el sector ciénaga de Majaguillar- Motembo.
- Prol-Betancourt, J.L.G., Rifá-Hernández, M.C.,** 2016, Modelo geológico conceptual de Cuba a partir de los campos potenciales y de los últimos criterios sobre la evolución tectónica del territorio cubano. *In Ceinpet. CD Memorias de la 8va Jornada Científica y Calidad del CEINPET*. La Habana.
- Rifá-Hernández, M.C.,** 2012, Ubicación de los sectores elevados de los sedimentos del margen

continental en Cuenca Central, Cuba. In *Departamento de Geociencias*. La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, p. 73.

Sánchez-Arango, J., García-Sánchez, R., 1985, Generalización estratigráfica de Cuba occidental. In CIDP. La Habana, p. 123.

Spector y Grant, 1970, *Statistical models for interpreting aeromagnetic data Geophysics*. Edtion ed 1970.

Studinger, M., Kurinin, R., Aleshkova, N., Miller, H., 1997, Power spectral analysis of gravity

data from the Weddell Sea Embayment and Adjacent Areas. *TERRAANTARTICA*. 4(1). 23-26 pp.

Fue: recibido
corregido
aprobado

