

## Caracterización estructural del graben de San Fernando de Apure, estado Apure

Luisdaniel Rivera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Departamento de Geofísica. Piso 1, Escuela de Geología, Minas y Geofísica*

\*luisdarc@gmail.com

### RESUMEN

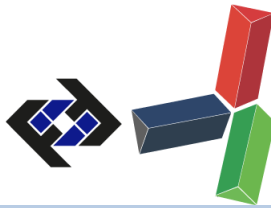
La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar las principales estructuras asociadas al graben de San Fernando utilizando datos gravimétricos (Anomalía de Bouguer) y magnéticos (anomalía magnética reducida al polo). Las profundidades de las fuentes fueron estimadas mediante el análisis del espectro de potencia y la deconvolución de Euler. Finalmente se realizó un modelizado gravimétrico-magnético de las estructuras inferidas con el cual se logró concluir que: a) El graben de San Fernando, es un graben asimétrico generado a partir de esfuerzos distensivos de tipo cizalla simple que, en la región de Mantecal – La Estacada, alcanza profundidades máximas alrededor de 1863 m de profundidad, las cuales se incrementan hacia el suroeste y está controlado por las fallas de Mantecal y la falla A, orientadas en dirección N50E, que se prolongan hasta profundidades estimadas de 12 km. b) Los bajos gravimétricos y magnéticos se pueden asociar a la cobertura sedimentaria dentro del graben, mientras que los altos gravimétricos y magnéticos, a altos en el basamento a excepción de los que se encuentran dentro del graben. c) Los altos magnéticos dentro del graben representan los diferentes dominios magnéticos generados a partir de las concentraciones de sedimentos tipo “capas rojas”.

*Palabras Clave: graben, gravimetría, magnetometría, espectro de potencia, deconvolución de Euler*

### ABSTRACT

The objective of this research was to characterize the main structures associated with the San Fernando graben using gravimetric (Bouguer Anomaly) and magnetic (magnetic anomaly reduced to pole) data. The depths of the sources were estimated by analyzing the power spectrum and Euler deconvolution. Finally, a gravimetric-magnetic modeling of the inferred structures was carried out with which it was concluded that: a) The San Fernando graben is an asymmetrical graben generated from simple shear-type (distensive efforts) that, in the Mantecal region – La Estacada, reaches maximum depths around 1863 m depth, which increases to the southwest and is controlled by the faults of Mantecal and fault A, oriented in direction N50E, which also extends to estimated depths of 12 km. b) Low gravimetric and magnetic responses can be associated to the sedimentary coverage within the graben, while the gravimetric and magnetic highs, to a high in the basement with the exception of those that are inside the graben. c) The magnetic highs within the graben represent the different magnetic domains generated from the concentrations of "red layer" sediments.

*Keywords: graben, gravimetry, magnetometry, power spectrum, Euler deconvolution*



## INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados dentro de las cuencas sedimentarias de Venezuela, por lo general tienen un objetivo petrolero. Son de especial interés aquellas que hayan permitido la sedimentación de material sedimentario durante el Mesozoico, puesto que el 80% las rocas madres venezolanas por excelencia datan de este período (Méndez, com. Per. 2018). Por lo anterior, las cuencas aulacógenas, son aquellas relacionadas con el proceso de *rifting*, que se forman como consecuencia del cese de la actividad magmática asociada a un punto caliente. Cuando estas estructuras son dominadas por fallas normales, la cuenca se denomina: graben. En Venezuela, se conocen diversas estructuras de este tipo, siendo las más relevantes a nivel espacial los grábenes de San Fernando, Mantecal y Espino que datan del Jurásico, de acuerdo con Aleman (2005). Dentro de la cuenca de Barinas-Apure, específicamente al sur de la subcuenca de Barinas se localizan los grábenes de San Fernando y Mantecal. Estudios realizados por Feo Codecido (1972) y González de Juana *et al.* (1980) describen la pérdida del potencial hidrocarburífero alrededor del graben de San Fernando como consecuencia del poco espesor sedimentario que en algunos casos es inferior a 5000 ft (1666.7 m). Hipótesis que fue avalada por perforaciones alrededor de la estructura en cuestión, recopiladas por Feo Codecido (1972) en el marco de la exploración petrolera de los campos Sinco, Silvestre y asociados. Por lo anterior, la exploración e investigación alrededor del graben de San Fernando-Mantecal ha mermado en comparación con su homólogo, el graben de Espino. En tal sentido, ante la poca cantidad de estudios asociados a la estructura mencionada, se planteó como principal objetivo de este trabajo, caracterizar estructuralmente los elementos geológicos asociados al graben de San Fernando (región norte del estado Apure), a través del análisis de los métodos potenciales. La localización del área de estudio está delimitada por la ventana de coordenadas latitudinales: [7.0864, 7.9800] y longitudinales: [-69.4963, -68.2680] referenciadas al datum WGS84.

## METODOLOGÍA

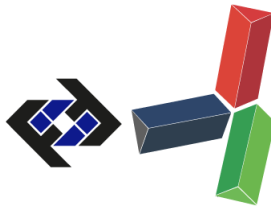
En primera instancia, se calculó la gravedad teórica para el set de datos asociado al proyecto Mantecal, seguido de las correcciones de Bouguer, topográfica y aire libre. Luego, se calculó la anomalía de Bouguer total considerando la suma algebraica de las correcciones descritas por Blakely (1996) (Ec. 1). Se calcularon las correcciones atmosférica y *Boullard B* definida por LaFehr (1991), para obtener finalmente la anomalía de Bouguer completa (Ec. 2), mencionada por Hinze *et al.* (2005). La anomalía magnética total se extrajo de la base de datos de González (2006). Para la realización de los cálculos anteriores, se empleó una densidad de Bouguer (reducción) de  $2.35 \text{ g/cm}^3$  y se utilizó como datum, la cota mínima del área de estudio la cual fue de 47.088 m. La corrección topográfica fue calculada utilizando el programa *Oasis Montaj v. 6.4.2 (Geosoft Inc., 2007)*. Tanto para el procesamiento de las anomalías como el cartografiado de las mismas, se empleó *Oasis Montaj*, utilizando el algoritmo de mínimas curvaturas. Se realizaron derivadas en dirección de los ejes coordenados X, Y y Z además de una continuación analítica hacia arriba (CAHA) a 420 m para gravimetría y 1000 m para magnetometría con la finalidad de suavizar la representación de los gradientes en cada uno de los mapas asociados a un eje. Haciendo uso de las derivadas, se calculó la derivada total para el dato gravimétrico, mientras que para el dato magnético se determinó la señal analítica. Se redujo al polo la anomalía magnética empleando un filtro de reducción al polo magnético además de una continuación analítica hacia arriba de 420 m.

### SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>



Finalmente, se realizó la deconvolución de Euler para cada método potencial. Se realizó un modelado integrado de los datos gravimétricos y magnéticos, a lo largo de un perfil N51W de 69 km empleando el módulo *GM-SYS* de *Oasis Montaj*. Para el modelado magnético se utilizó un valor de 34694.4 nT, 36° y -8° para la intensidad, inclinación y declinación del campo magnético respectivamente; el primero fue estimado para la fecha de la campaña de adquisición (1981) empleando la aplicación online que ofrece la *NOAA* (Por sus siglas en inglés *National Oceanic and Atmospheric Administration*). Se utilizaron los pozos APU-3 descrito por Feo Codecido (1972), el set de pozos FS-7 al 11 mencionados por González (2009) y se tomaron en consideración las densidades y susceptibilidades empleadas por *GM-SYS* (2004), Mendoza (2012), Rondón (2016), además de las profundidades estimadas a partir de los espectros de potencias de los métodos potenciales.

Ecuaciones utilizadas:

Anomalía de Bouguer total:  $AB_t = G_{obs} \pm Cal - CB + Ct - G_t$  (Ec. 1)

Anomalía de Bouguer completa:  $AB_c = AB_t - CBB + Catm$  (Ec. 2)

Derivada horizontal total:  $\sqrt{\left(\frac{\delta G}{\delta X}\right)^2 + \left(\frac{\delta G}{\delta Y}\right)^2}$  Señal Analítica:  $\sqrt{\left(\frac{\delta M}{\delta X}\right)^2 + \left(\frac{\delta M}{\delta Y}\right)^2 + \left(\frac{\delta M}{\delta Z}\right)^2}$

Donde  $G_{obs}$  es la gravedad observada,  $Cal$  la corrección de aire libre,  $CB$  la corrección de Bouguer,  $Ct$  la corrección topográfica,  $G_t$  la gravedad teórica,  $CBB$  corrección de *Boullard B* y  $Catm$  la corrección atmosférica,  $\delta G$  y  $\delta M$  la derivada del dato gravimétrico y magnético respectivamente respecto a los ejes coordenados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mapa de anomalías de Bouguer de segundo orden (figura 1A) presenta valores dentro de un rango entre -36 y -3 mGal. Dos orientaciones preferenciales han sido identificadas en el mapa asociadas a diferentes estructuras geológicas en contacto. Se puede observar una tendencia N74E alrededor de alto gravimétrico de -3 mGal, ubicado entre las coordenadas (490000, 830000) definido por diversos autores: Ostos (2005), González (2009) entre otros, como un alto en el basamento. Otra tendencia de N50E se pudo identificar a lo largo de la ventana de estudio, la cual presenta valores entre -36 y -15 mGal, estructura descrita por Feo Codecido (1972), Bartok (1993), Ostos (2005), González (2006) entre otros, como el graben de San Fernando. El contacto de las estructuras ubicado hacia el flanco norte del graben de San Fernando, presenta mayores gradientes que el flanco sur, ambos exhiben valores entre 1.35 y 0.61 mGal/km respectivamente, lo cual indica que la transición entre estructuras es más suave en el flanco sur que en el flanco opuesto. La afirmación anterior puede ser corroborada al observar que, en el mapa de la derivada total (figura 1B), se pueden observar las variaciones del dato en dirección X y Y, los mayores gradientes se encuentran en el flanco norte del graben, a lo largo de la zona de transición. Por otra parte, los mínimos alineados en dirección N74E por encima de los gradientes mencionados anteriormente hacen referencia la poca variación de la anomalía ubicado justamente en el alto de basamento. El análisis de gradientes además de las soluciones de la deconvolución de Euler alineadas en la dirección de los mismos, permiten identificar a las zonas de transición geológica mencionadas al inicio, como el conjunto de fallas de Mantecal, mencionadas por González de Juana *et al.* (1980)

y Marcano (2015), mientras que hacia el sur, una de falla bautizada como A. Las soluciones de Euler muestran una profundidad entre 2 y 6 km de profundidad en la zona a lo largo de la cual se realizó el perfil.

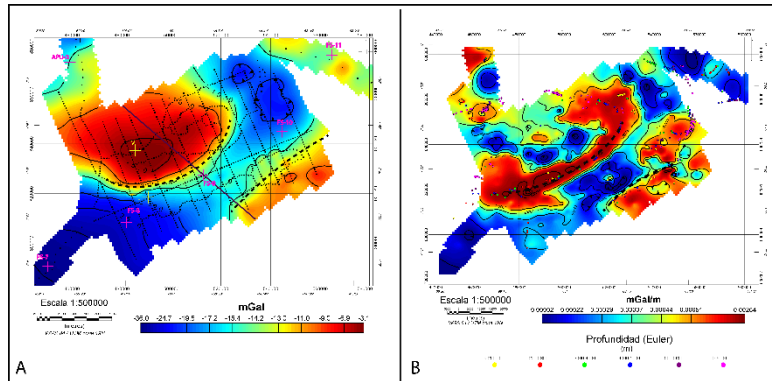


Figura 1. Procesamiento del dato gravimétrico. 1A) Cartografiado de la anomalía de Bouguer: se señalan las estaciones con puntos negros, pozos en color rosado, perfil del modelizado en color morado. 1B) Cartografiado de la Derivada total horizontal. Se señalan las fallas interpretadas con líneas negras no continuas.

El mapa de anomalía magnética reducida al polo magnético (figura 2A), presenta gran cantidad de estructuras con una orientación preferencial (general) de N50E, la cual coincide con la orientación del graben de San Fernando y presentan valores en un rango entre -475 y -325 nT, siendo el mínimo magnético la estructura ubicada alrededor de las coordenadas (500000, 780000). Por otra parte, diversas estructuras asociadas a los mayores valores en anomalía presentan diferentes orientaciones, siendo las más relevantes: el máximo magnético de 44 nT en la región noroeste y el alto magnético delimitado por las coordenadas (540000, 790000) y (580000, 830000) de -125 nT, ambos orientados en dirección N40E, la estructura de -225 nT ubicada entre las coordenadas (470000,790000) y (510000,820000) con una orientación de N60E y finalmente el alto magnético de -225 nT ubicado en la esquina inferior derecha, con una orientación E-W. Los mayores gradientes del mapa se muestran en la región sureste entre 69.4 y 44 nT/km; hacia el norte, los gradientes se vuelven suaves. El mapa de señal analítica (figura 2B), resalta la variación en el dato a lo largo de los ejes coordenados (X, Y y Z), mostrando una vez más, que los gradientes se alinean en la misma dirección de las estructuras transicionales mencionadas con anterioridad (figuras 1A y 1B). Las soluciones de Euler, muestran profundidades entre 6 y 14 km, en algunos casos mayores a este último.

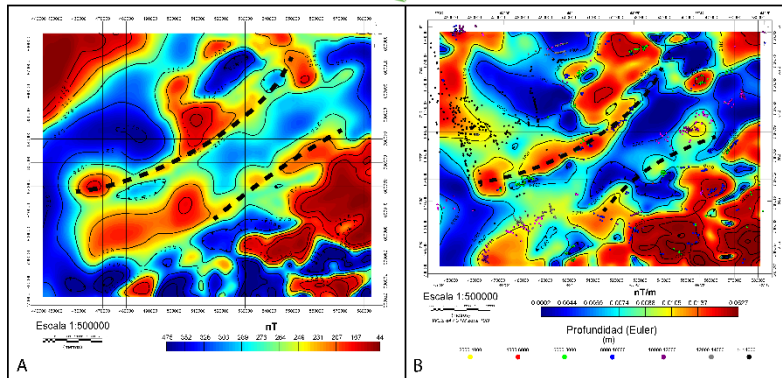


Figura 2. Procesamiento del dato magnético. 2A) Cartografiado de la anomalía magnética reducida al polo. 2B) Cartografiado de la señal analítica. Se señalan las fallas interpretadas con líneas negras no continuas.

El análisis del espectro de potencias de los métodos potenciales (figuras 3A y 3B), permitió estimar la profundidad de 3 fuentes principales de anomalía. La figura 3A, muestra fuentes gravimétricas ubicadas a: 14, 4.5 y 3.3 km. La figura 3B, exhibe fuentes magnéticas situadas a: 11, 5.2 y 3.3 km. Se interpretaron dichas fuentes como: corteza inferior (11-14 km), corteza superior del Paleozoico Inferior (4.5-5.2 km) y corteza superior del Paleozoico Superior (3.3 km). La figura 4 ilustra el modelizado gravimétrico magnético realizado a lo largo del perfil mostrado en la figura 1A. Presenta un error gravimétrico y magnético de 0.031 mGal y 0.983 nT, los cuales representan un error de 0.27% y 0.71% respectivamente.

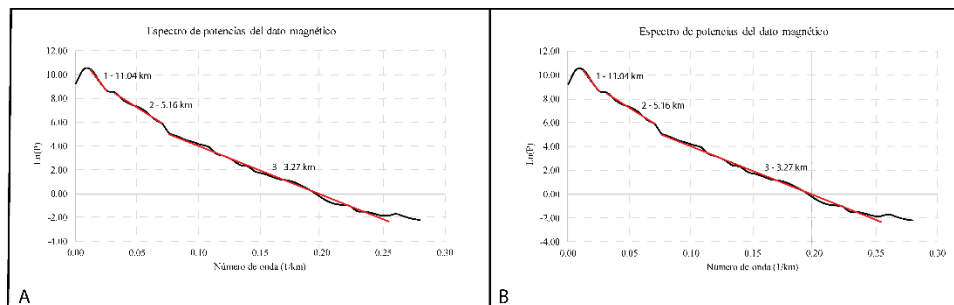


Figura 3. Espectro de potencias de los métodos potenciales. A) Dato gravimétrico. B) Dato magnético. Se muestra con líneas rojas, las pendientes asociadas a cada fuente profunda.

## Discusión

Las diferentes estructuras observadas en las figuras 2A y 2B, caracterizadas por presentar variaciones en orientaciones y valores en anomalía magnética dentro del graben, permiten plantear heterogeneidades en susceptibilidades muy marcadas, específicamente en el flanco sur del graben; se descartan altos en el basamento puesto que las figuras 1A y 1B, muestran bajos gravimétricos en estos lugares. Los pozos y el comportamiento negativo de anomalía de Bouguer, en el suroeste,



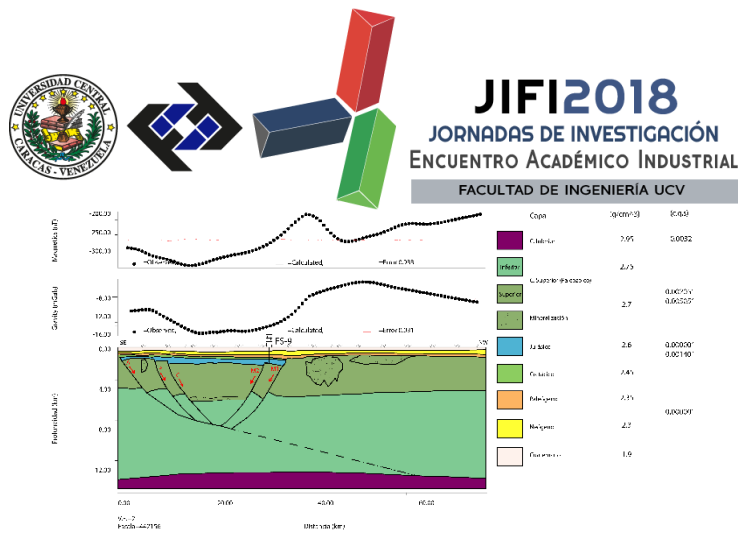


Figura 4. Modelizado gravimétrico magnético. Se muestran las densidades ( $\text{g/cm}^3$ ) y susceptibilidades (c.g.s) empleadas

permite interpretar que: el graben de San Fernando buza hacia el suroeste, donde la cobertura sedimentaria se encuentra hasta una profundidad de 1822 m (Pozo FS-7) dentro del área de estudio, siendo este el mínimo gravimétrico que se observa en dicho mapa. Por lo tanto, lo inicial puede ser explicado al considerar que el graben fue alimentado por sedimentos del propio escudo (capas rojas), sedimentos que, por su composición, presentan un comportamiento magnético relevante (alta susceptibilidad), por lo que las diversas anomalías magnéticas hacen referencia a las diferentes concentraciones de este tipo de sedimento, los cuales exhiben diferentes dominios magnéticos en el área. La interpretación anterior, es compatible con González (2009) y González (2017).

Se comparó el comportamiento de las fallas observadas en la figura 1A con los resultados posteriores al mismo. Todos los mapas muestran respuestas similares en la región norte del graben, mientras que en la región sur, la respuesta en la figura 2B es un poco ambigua en cuanto a la ubicación de la falla A, sin embargo, los resultados permiten afirmar que el graben de San Fernando, en la zona de estudio, está controlado por las fallas de Mantecal y el sistema de fallas del flanco sur, fallas conjugadas cuya orientación es N50E. Las diferentes soluciones de los métodos potenciales permiten inferir que: (a) las fallas generan un cambio lateral en densidad hasta una profundidad entre 4 y 5 km; (b) la heterogeneidad en cuanto al comportamiento magnético es muy marcada, el mismo puede ser causado por diferentes variaciones en los Esquistos de Apure o capas anteriores, pudiendo mencionar: recristalizaciones, reorientación de minerales o el cambio de posición del basamento a lo largo de la corteza superior.

Las soluciones que se proponen en este trabajo, no comparten los resultados y/o planteamientos propuestos por Mendoza (2012): el máximo gravimétrico se interpretó como un alto en el basamento, ubicado a una profundidad de 720 metros, planteamiento que es cónsono con trabajos previos: González de Juana *et al.* (1980), González (2009). Considerando la edad Jurásica del graben de San Fernando, se falló el Paleozoico superior (corteza superior) y se rellenó el graben con sedimentos continentales del propio Jurásico, tipo capas rojas (posiblemente la Formación La Quinta). Se estimó una cobertura sedimentaria, dentro del graben, entre 1578 m (Pozo FS-9) y 1667 m como la parte más profunda dentro del perfil inferido a partir del ajuste gravimétrico y se empleó la familia de fallas de Mantecal, específicamente M1, para controlar la estructura del graben en el

flanco norte, ambos razonamientos son compatibles con la reconstrucción depositacional realizada por Marcano (2015) y la sísmica migrada, cerca del perfil empleado en este trabajo, de Terán (2015). En la región sur del graben, se interpretaron y utilizaron 3 fallas (A, B y C) para controlar el ajuste gravimétrico, sin embargo; el error en el ajuste magnético está asociado a este conjunto de estructuras. Para ajustar dicho error, se consideró: a) La heterogeneidad de la corteza superior: se emplearon diferentes susceptibilidades entre 0.002051 y 0.005051 (cgs) para cada uno de los bloques de la corteza superior; b) 4 cuerpos adicionales para ajustar las cuplas observadas en la curva de anomalía magnética; los mismos, fueron interpretados como mineralizaciones presentes tanto en la corteza como en la parte más profunda del graben. La consideración anterior (b) no es válida para realizar el ajuste magnético a lo largo de las fallas A, B y C, puesto no se maneja información de mineralizaciones en las fallas pertenecientes en este tipo de cuenca en ausencia de actividad epitermal. El modelizado del graben se realizó partiendo del modelo de cizalla simple, propuesto por Wernicke (1981) a raíz de la observación de los saltos de fallas, interpretados a partir del análisis de los gradientes de la anomalía de Bouguer y otros. No se utilizaron las sísmicas realizadas en el proyecto Mantecal 07G2D3C e interpretadas en Mendoza (2012) puesto que las mismas no se encontraban migradas. Se modeló la corteza inferior considerando las profundidades estimadas a partir del análisis espectral entre 12.39 y 13.89 km de profundidad, respetando la geometría planteada.

## CONCLUSIONES

El graben de San Fernando, es un graben asimétrico generado a partir de esfuerzos distensivos de tipo cizalla simple que, en la región de Mantecal – La Estacada, alcanza profundidades máximas alrededor de 1863 m de profundidad, las cuales se incrementan hacia el suroeste y está controlado por las fallas de Mantecal y la falla A, orientadas en dirección N50E, que se prolongan hasta profundidades estimadas de 12 km.

Las distintas respuestas magnéticas dentro del graben hacen referencia a heterogeneidades en los dominios magnéticos como consecuencia de las diferentes concentraciones de sedimentos tipo “capas rojas” y no a altos en el basamento.

Las fallas de Mantecal tienen una expresión gravimétrica y magnética muy clara, sin embargo, el conjunto de fallas A, B y C muestra un comportamiento magnético ambiguo, posiblemente a consecuencia de las heterogeneidades de la corteza superior.

El análisis espectral permitió la identificación y modelizado de un contraste de densidad a 5.27 km de profundidad a lo largo del perfil, el cual no corresponde con la región más profunda del graben en el área de Mantecal –La Estacada. El buzamiento de la estructura, hacia el sur, podría explicar la diferencia en profundidad planteada por Terán (2015).

Los bajos gravimétricos y magnéticos fueron asociados a la cobertura sedimentaria presente dentro del graben, compuesta por materiales poco densos y con susceptibilidades muy pequeñas. Los altos gravimétricos y magnéticos fueron interpretados como altos en el basamento Paleozoico, a excepción de los altos localizados dentro del graben.

El modelizado gravimétrico-magnético presenta un error asociado de 0.27% y 0.71% respectivamente. La principal fuente de error magnético se asocia al conjunto de fallas A, B y C además de su complejo comportamiento magnético.

## REFERENCIAS

- [1] Aleman, A. (2005). Evaluación técnica del proyecto Toco Profundo – AX. Informe Interno PDVSA. 97.
- [2] Bartok, P. (1993). *Pre-breakup geology of the Gulf of Mexico – Caribbean. Its relation to Triassic and Jurassic rift system of the region. Tectonics*, v 12. 441-459.
- [3] Blakely, R. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press. Cambridge.* 455 pp.
- [4] Feo Codecido, G. (1972). Contribución a la estratigrafía de la cuenca Barinas-Apure. IV Congreso Geológico Venezolano. Vol. 5, Tomo II. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. SVG, Caracas.
- [5] Northwest Geophysical Associates, Inc. (2004). *GM-SYS User's Guide, version 4.9.*
- [6] González de Juana, C., Iturralde, J. y Picard, X. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Tomos I y II. Ediciones Foninves, Caracas. 807, 975-979.
- [7] González, W. (2009). Compilación de datos Magnéticos en el norte de Venezuela y el Caribe y un estudio de prueba en el graben de Espino. Trabajo Especial de grado. Universidad Simón Bolívar.
- [8] González, W. (2009). Interpretación del basamento precretácico en las cuencas Barinas Apure y Oriental de Venezuela: Caracas, Venezuela, Universidad Simón Bolívar, tesis de maestría.
- [9] Hinze, W., C. Aiken, J. Brozena, B. Coakley, D. Dater, G. Flanagan, R. Forsberg, T. Hildenbrand, G. Randy, J. Kellogg, R. Kucks, X. Li, A. Mainville, R. Morin, M. Pilkington, D. Plouff, D. Ravat, D. Roman, J. Urrutia-Fucugauchi, M. Veronneau, M. Webring, and D. Winester (2005). *New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. Geophysics* 70(4): J25-J32.
- [10] Mendoza, Y. (2012). Caracterización geológica mediante la integración de información geofísica del sector Mantecal – La Estacada, Estado Apure. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela.
- [11] Marcano, J. (2015). Interpretación de sistemas depositacionales en la sección Cretácico – Paleógeno en el área de Mantecal, subcuenca de Apure.
- [12] LaFehr, T. (1991). *An exact solution for the gravity curvature (Boullard B) correction.*
- [13] Ostos, M, Yoris, F. y Ave Lallemand, H. (2005). *Overview of the southeast Caribbean–South American plate boundary zone. Geological Society of America, special paper.* 53-89.
- [14] Rondón, F. (2016). Modelo gravimétrico cortical 2D del perfil sur, Proyecto GIAME, ubicado en la región Andina de Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar.
- [15] Terán, M. (2015). Análisis de la geometría del graben de Mantecal para realizar un diseño de adquisición sísmica 2D. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar.
- [16] Wernicke, B. (1985). *Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere. Canadian Journal of earth Sciences*, V. 22, pp. 108-125.