

MODELADO GRAVIMETRICO 3D DE LOS ANDES DE MERIDA

Francisco Araujo^{1*} y Nuris Orihuela²

¹ PDVSA Intevep

² Universidad Central de Venezuela

*franck074@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo muestra los avances del Modelado Gravimétrico 3D de los Andes de Mérida asociados al proyecto GIAME (Geociencia Integral de los Andes de Mérida), se construyeron tres superficies asociadas al basamento pre-cretácico, el límite entre la corteza superior e inferior (Conrad) y la discontinuidad de Mohorovic. Para ello se utilizaron el algoritmo de Parker 1972, Cordell and Henderson 1973, análisis espectral, información de pozos y sísmica de refracción, reflexión, los resultados muestran un basamento con profundidad máxima de 10 km en la cuenca del lago de Maracaibo, y 5 km en la cuenca barinas Apure, el límite entre la corteza superior e inferior se asocia a la zona de despegue del sistema de fallas de occidente, la discontinuidad asociada al moho muestra una buena correlación con los datos aportados por la sísmica de refracción.

Palabras Clave: Andes de Mérida, Gravimetría, Moho, basamento ígneo metamórfico.

ABSTRACT

The present work shows the advances of the 3D Gravimetric Modeling of the Andes de Mérida associated with the GIAME project (Integral Geoscience of the Andes of Mérida), three interfaces were built associated with the pre-cretaceous basement, the boundary between the upper and the lower crust and the Moho discontinuity. For this, the algorithm of Parker 1972 Cordell and Henderson 1973, spectral analysis, well information and refraction and reflection seismic were used, the results show a basement with a maximum depth of 10 km in the lake of Maracaibo basin, and 5 km in the Barinas Apure basin, the boundary between the upper and lower crust is associated with the takeoff zone of the western fault system, the discontinuity associated with mold shows a good correlation with the data provided by the refraction seismic.

Keywords: Andes de Mérida, Gravimetry, Moho, igneous metamorphic basement

INTRODUCCIÓN

El orógeno andino representa una de las estructuras más importantes en el contexto geológico de nuestro país, por lo cual se plantea la realización de esta investigación, en donde se espera generar un modelo 3D a escala litosférica de Los Andes de Mérida. Como base para la investigación de la estructura litosférica de Los Andes de Mérida se realizó un levantamiento gravimétrico, en gran parte del occidente venezolano y en los segmentos más representativos de la cadena andina, también se integra con otros levantamientos realizados en la zona que están homologados a la red gravimétrica internacional del 71 y con ello poder determinar la estructura cortical así como determinar la relación con la raíz gravimétrica de Los Andes de Mérida la cual esta desplazada de la cadena montañosa 50 km en dirección noroeste (Araujo y Bello, 2014, Hospers y Van Wijnen 1959, Folinsbee 1972) a partir de análisis cualitativos de los mapas de gravedad absoluta y anomalías de gravedad y magnetismo a diferentes escalas, para identificar los posibles rasgos geológicos que dominan las fuentes de contraste de densidad.

METODOLOGÍA

Se realizó la integración gravimétrica de la adquisición realizada para el proyecto GIAME con otros levantamientos en la zona occidental (Figura 1), estos levantamientos están homologados a la Red de Estandarización Gravimétrica Internacional (IGSN71) (Araujo y Bello, 2014), luego se generó el mapa de la Anomalía de Bouguer (Figura 2), a partir de este se obtuvo el mapa residual, figura 3 usando la técnica de continuación de campo y la información de los pozos que llegaron a basamento en la cuencas Barinas Apure y Lago de Maracaibo, usando la inversión matemática de Cordell and Henderson (1973) se obtuvo el mapa de la profundidad del tope del basamento como se puede observar en la figura 4. Aplicando la técnica de análisis espectral se calcularon tres pendientes, la más profunda asociada a la interfaz de Mohorovic, la pendiente media asociada al límite entre la corteza superior y la corteza inferior (Conrad), luego usando esta técnica aplicada por ventanas (Araujo, 2013) se tiene el mapa de la discontinuidad de Conrad (Figura 5), y por ultimo se calcula el mapa regional aplicando un filtro pasabajos y usando el algoritmo de Oldenburg (1974) se obtiene el mapa de la profundidad del tope de Mohorovic (Figura 6), usando estas tres interfaces y con un contraste de densidad constante para cada una de las discontinuidades de 0.2, 0.4, 0.5 gr/cc se genera un modelo 3d figura 7. Aun faltaría incluir otra capa asociada a sedimentos cretácicos y terciarios y la interfaz asociada a la loza caribe la cual afecta la respuesta gravimétrica

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Mapa de la Anomalía de Bouguer refleja los contrastes laterales de densidad asociado a estructuras geológicas presentes en el subsuelo las cuales son interés en este estudio. En la figura 2 tenemos una escala que va desde -162.86 (color azul) a 38.40 (color fucsia) mGal. Del mapa destaca el gran mínimo en color azul (valores entre -162.86 a -26 mGal) con rumbo en dirección SO-NE asociados a la cuenca del Lago de Maracaibo el cual se encuentra paralelo y desplazado en dirección NO del rumbo de la cordillera de los Andes de Mérida, el desplazamiento es de aproximadamente 50 km el punto en color amarillo representa el valor más negativo de -162.86 ubicado a 7 km al oeste de la población de Muyapa. El mínimo debería coincidir con la ubicación de la cadena montañosa, como es el caso común para sistemas orogénicos en equilibrio isostático. Este mínimo en un principio fue asociado a la gran acumulación de sedimentos en el sur de la cuenca del Lago de Maracaibo, pero luego de varios modelados gravimétricos realizados por diferentes autores (Kellogg y Bonini 1982, Escobar y Rodríguez, 1995) se concluye que esta acumulación de sedimentos no era suficiente para producirlo, sino que estaba relacionado con la configuración de diferentes estructuras de gran longitud de onda y a gran profundidad como lo son las placas suramericanas, la placa del caribe (Audemard y Audemard 2002, Colleta et al 1997). El máximo que va de -13 a 10 mGal con rumbo noreste el cual está ubicado sobre la topografía andina, tiene una longitud de aproximadamente 410 km desde la depresión del Táchira hasta ciudad de Barquisimeto y un ancho promedio de 60 km. Es de hacer notar el valle o "silla de caballo" ubicado en la ciudad de Mérida que pareciera dividir la cadena montañosa en Andes suroeste y noreste, hacia la zona noreste se observa como la anomalía aumenta de -22 a -17 mGal asociada a los afloramientos cretácicos de las napas de Lara, en la zona suroeste la anomalía presenta una forma triangular con un rango entre -70 a -37 mGal. De la figura también podemos ver el mínimo (-110 a -100 mGal) al sur de la ciudad de San Cristóbal que esta asociado a la depresión del Táchira donde el basamento se encuentra a 6 km de profundidad

aproximadamente, este mínimo cubre parte de la cuenca de Apure y continua hacia el sur de Barinas, aquí está asociado a la depresión de Capitanejo (-75 a -85 mGal); sobre la ciudad de Barinas se observa que la anomalía se hace menos negativa (-60 a -55 mGal) posiblemente asociado con el arco de Mérida . Al sur oeste de la población de San Fernando de Apure, ubicado a -70° de longitud y 7° de latitud tenemos un mínimo no tan prominente con valores de -12 a -18 mGal el cual es una respuesta gravimétrica del graben de Mantecal al noreste de la misma población se observan dos máximos entre 7 y 17 mGal vinculados al alto del Baúl. Al sur de la ciudad de Coro se nota un alto (-10 a 30 mGal) con rumbo E-O el cual tiene una extensión de 200 km y un ancho promedio 60 km asociado al anticlinorio de Falcón, este alto estaría mayormente influenciado por el acortamiento cortical en esta zona, con lo que la contribución de Mohorovic a la anomalía gravimétrica es mas del 60 %, la expresión de la columna sedimentaria es minoritaria. De la figura también se observa la asimetría entre las cuencas Barinas Apure y Lago de Maracaibo donde el espesor sedimentario es diferente para ambas, la enorme acumulación de sedimentos en la cuenca del Lago de Maracaibo esta asociada a la alta producción de hidrocarburos de esta, siendo menor la producción de la cuenca Barinas Apure, el mínimo gravimétrico del Lago de Maracaibo esta fuertemente controlado por la falla de Bocono al sur y la falla de Valera al este ya que este mínimo termina abruptamente contra estas dos fallas, la profundidad de los sismos causados por la falla de Boconó están en promedio hasta 20 km, por tanto esta falla que estaría afectando cuerpos de la corteza superior hasta la superficie entre estos el basamento ígneo y la columna sedimentaria, debido al cambio abrupto de propiedades físicas en este caso la densidad, también podría representar el limite entre el bloque de Maracaibo y el borde norte de la placa sur Americana.

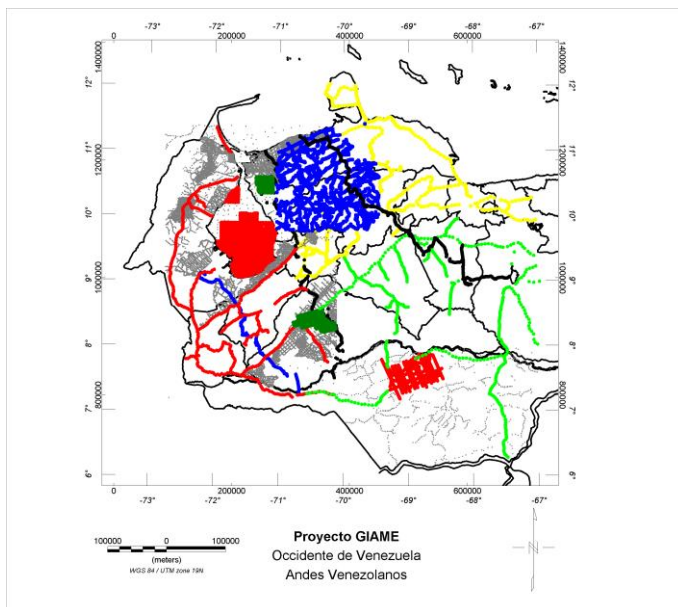


Figura 1. Gráfico de las estaciones gravimétricas para la construcción de mapas. Estaciones adquiridas en color amarillo para la zona 1, en color verde para la zona 2, en color rojo para la zona 3, el lago de Maracaibo y el graben de Mantecal, el perfil andes sur y el levantamiento Tupure Carora en color azul, los perfiles andes norte y perfil andes central están en color negro,

Barinas Oeste y Oro negro el color verde oscuro y por ultimo las estaciones de la base de datos de PDVSA Intevp en color gris

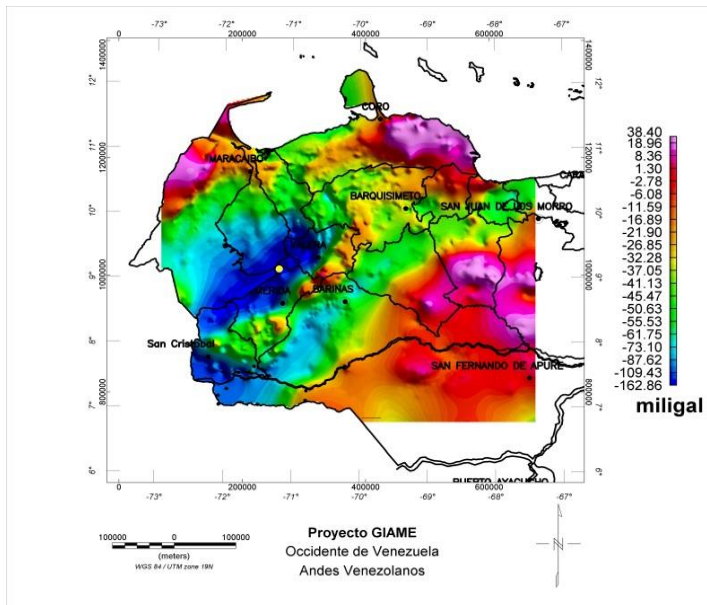


Figura 2. Mapa de la Anomalia de Bouguer. El punto en color amarillo muestra el valor mas negativo -162.86 ubicado a 7 km al oeste de la población de Muyapa.

Mapa Residual:

El mapa residual de la anomalía de Bouguer (Figura 3) representa la respuesta gravimétrica de los contrastes laterales de densidad de fuentes asociadas a la columna sedimentaria y tope de basamento ígneo metamórfico, el efecto producido por fuentes profundas y regionales tales como el moho y el limite de corteza inferior y superior son supuestamente "removidos" de la anomalía de Bouguer quedando solo la expresión de fuentes más someras y locales. De la figura 3 podemos observar una buena definición del mínimo gravimétrico de -80 a -50 mGal correspondiente a la cuenca del lago de Maracaibo y como el valor de la anomalía aumenta hacia el norte lo cual se traduce en una disminución del espesor de sedimentos. El máximo que van de cero a 16 mGal el cual está ubicado sobre el rumbo noreste de la topografía andina, este máximo tiene una longitud de 430 km y un ancho promedio de 55 km. El flanco sur de la cadena montañosa se observa los mínimos gravimétricos de -50 a -25 mGal asociados a la cuenca Barinas Apure con rumbo paralelo a los andes de Mérida, al suroeste de la población de san Cristóbal un mínimo gravimétrico -55 mGal causado por la depresión del Táchira

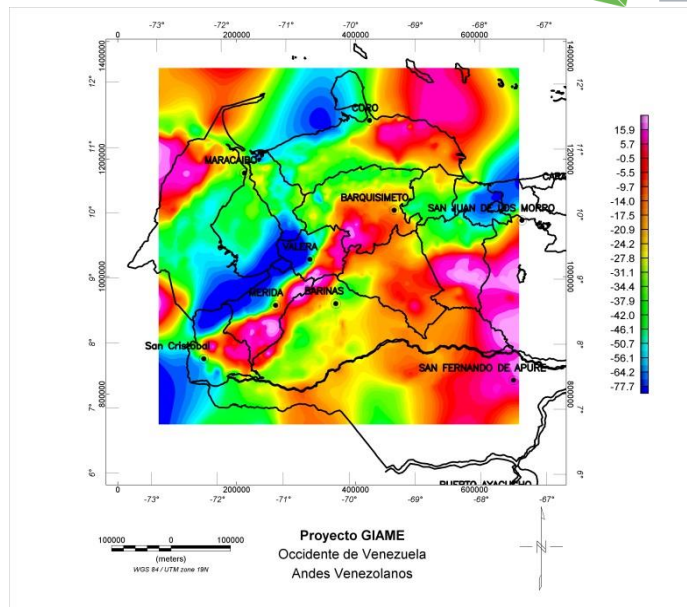


Figura 3. Mapa Residual de la Anomalía de Bouguer

Mapa del Tope de Basamento:

De la interpretación estructural del tope de basamento precretácico provenientes de inversión gravimétrica 3D de un residuo controlado por pozos presentes en la cuenca Barinas Apure y Lago de Maracaibo. De la figura 4, las principales estructuras son, depresión del lago de Maracaibo con una profundidad máxima del tope de basamento de 10 km, depresión de Capitanejo con un espesor de máximo sedimentos de 5.0 km, depresión del Táchira con 6.5 km de espesor de sedimentos, también se pueden observar el arco de Arauca, arco de Mérida arco del Baúl, las cuales son estructuras con rumbo perpendiculares al rumbo de los andes estos altos pudieron haber afectado la migración de hidrocarburos y sus flancos podrían ser altamente prospectivos.

Del mapa se observan las dos fallas inversas con rumbo noreste y vergencias noreste (falla las virtudes) y suroeste producen el levantamiento de la cordillera Andina y el mínimo gravimétrico del lago de Maracaibo fuertemente controlado por la falla de Bocono y la Falla de Valera.

Interfaz Corteza Superior Corteza Inferior:

Del análisis espectral se obtiene la interfaz entre la corteza superior e inferior la cual está asociada al despegue del sistema de fallas de occidente, esta principalmente controlada por la falla de Valera Burro negro y la falla de Bocono figura 5 la profundidad no es indicada en la igual ya que alta ajustarla pero la profundidad va aproximadamente de 17 color rojo a 26 km color azul.

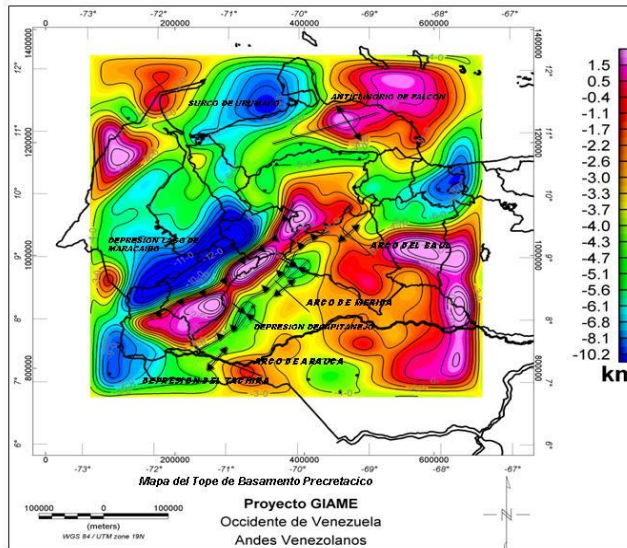


Figura 4. Mapa del tope de basamento ígneo metamórfico

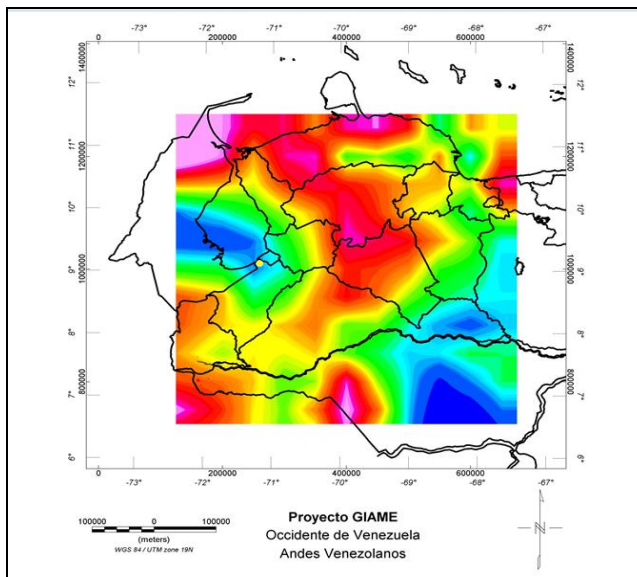


Figura 5. Mapa de la interfaz de Conrad

Inversión Gravimétrica para hallar la profundidad de Mohorovic:

La inversión gravimétrica permite calcular la geometría 3D de una interfaz a partir de un mapa de anomalía de gravedad, empleando el método iterativo de Parker Oldenburg. El mapa de la figura 6 representa la topografía de Mohorovic o el tope del moho, la máxima profundidad es alcanzada en la zona correspondiente al lago y es de aproximadamente 54 km (el error en dicha estimación es +/- 3 km), la zona correspondiente a la ubicación de la cadena andina la profundidad va de 40 a 45 km, la mayor profundidad no se corresponde a la ubicación de la cadena montañosa como lo es el de las cordilleras isostáticamente compensadas, para estos casos el mínimo gravimétrico esta justo sobre la topografía. Al sur este de la ciudad de Coro se nota que la profundidad estaría de 28 a 30

km, por lo tanto estaría en consonancia con los estudios gravimétricos (Rodríguez y Sousa, 2003) y de refracción (Bezada, 2008) efectuados por el proyecto Geodinos.

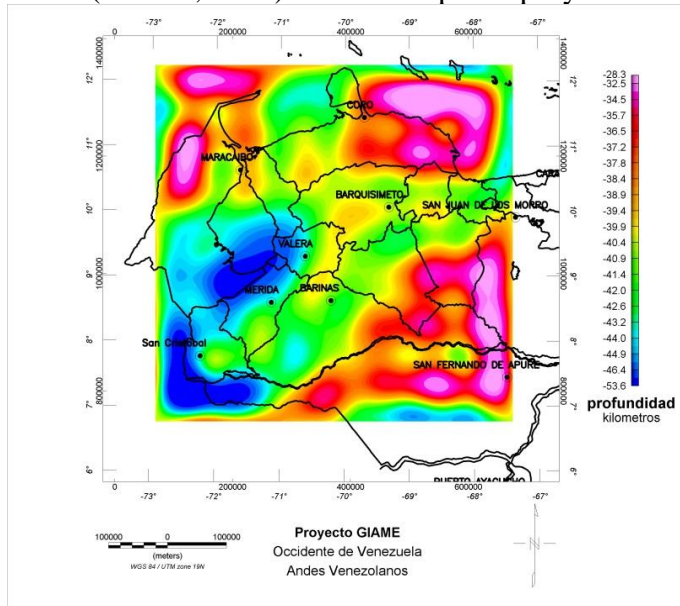


Figura 6. Mapa de la profundidad del tope de Mohorovic

Modelado Gravimétrico 3D:

La figura 7 representa un primer avance en la construcción del modelado 3D de los Andes de Mérida, faltando introducir el efecto de la losa de subducción Caribe, la cual vendrá dado por los resultados de sismica de refracción del proyecto GIAME y el estudio de la sismicidad en el occidente de Venezuela.

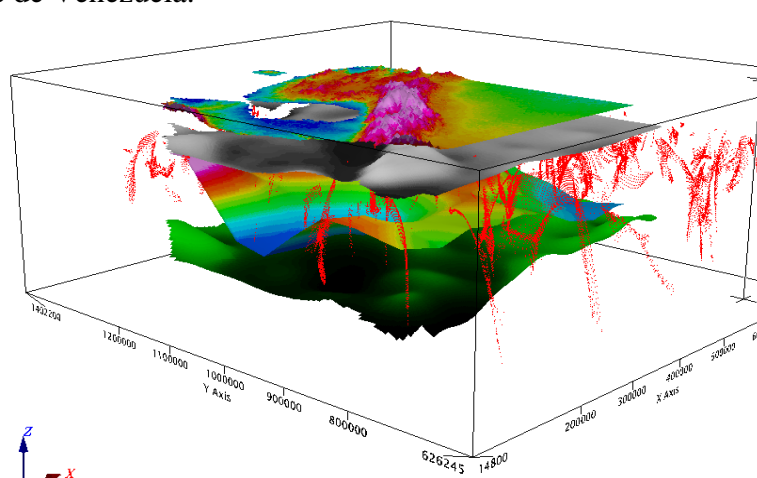
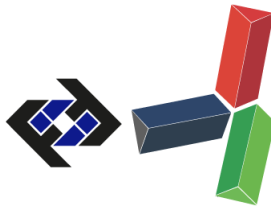


Figura 7. Modelado 3D de los Andes de Mérida con las tres interfaces calculadas y los puntos en color rojo son los resultados de la deconvolución de Euler

CONCLUSIONES

En el mapa de la anomalía de Bouguer se pueden ver los principales rasgos estructurales del occidente de Venezuela y concluir como estos se correlacionan con el orogeno andino; las



cuenca del lago de Maracaibo y de Barinas Apure están fuertemente influenciadas por el levantamiento de la cadena de montañas; este afecto la acumulación de sedimentos a ambos flancos del orógeno. La profundidad del basamento precretácico es de 10 km en el flanco norte y de 5 km en el flanco sur, observándose así la enorme asimetría entre ambas. La interfaz de Conrad pareciera tener una profundidad de -18 a -20 km lo cual tiene relación con la raíz sismogénica. Al modelado 3D habría que introducir el efecto que causa la subducción de la loza Caribe para generar un modelo más real.

REFERENCIAS

- [1] Araujo, F, Bello, H, 2014. Interpretación gravimétrica de las adquisiciones realizadas en los Andes de Mérida, Informe interno para PDVSA Intevep.
- [2] Araujo, F 2013. Desarrollo e implementación de un código en matlab para realizar inversión de datos potenciales a través del análisis espectral. tesis de maestría Universidad Central de Venezuela.
- [3] Audemard, F. E., & Audemard, F. A. Structure of the Mérida Andes, Venezuela; relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, 345(1-4), (2002). p 299-327.
- [4] Bezada, M.J., Schmitz, M., Jácome, M.I., Rodríguez, J., Audemard, F., Izarra, C., and the BOLIVAR Active Seismic Working Group. Crustal structure in the Falcón Basin area, northwestern Venezuela, from seismic and gravimetric evidence. *J. Geodyn.*, Vol. 45, (2008) p 191-200
- [5] Colleta, B., F. Roure, B. De Toni, D. Loureiro y H. Passalacqua,. Tectonic inheritance, crustal architecture, and contrasting structural styles in the Venezuela Andes. *Tectonics* 16 (5), (1997) pp. 777-794.
- [6] Cordell, and Henderson L., 1973. Gravity analysis using an exponential density depth function-San Jacinto Graben, California. *Geophysics* 38 (4), 684- 690.
- [7] Escobar y Rodríguez. Interpretación geofísica integrada de un transecto NW-SE a través de los andes venezolanos. I Latinoamerican Geophysical Congress. Rio de Janeiro, Brazil, Vol 1 (1995)., p. 273-276.
- [8] FOLINSBEE, R. 1972. The gravity field and plate boundaries in Venezuela. Thesis P.H.D Massachusetts Institute of Technology, 159 p.
- [9] HOSPERS, J Y J.C. VAN WIJNEN, (1959): The gravity field of the Venezuelan Andes and adjacent basins. *Verh. K. Ned. Acad. Wet.*, Amsterdam, p.99
- [10] Kellogg, J. N. & Bonini, W. E. Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South American plate. *Tectonics*, Vol. 1(3), (1982). p.251-276.
- [11] Oldenburg, D.W., 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics* 39 (4), 526- 536.
- [12] Parker, R.L., 1973. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophys. J. R Astron. Soc.* 31, 447- 455.
- [13] Rodriguez, J., Sousa, J.C., 2003. Estudio geológico-estructural y geofísico de la sección cabo San Roman-Barquisimeto, estados Falcon y Lara. B.S. Thesis. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela, 296 pp.