

MODELOS GRAVIMÉTRICOS Y MAGNÉTICOS CORTICALES 2D PROPUESTOS PARA LOS ANDES DE MÉRIDA - VENEZUELA

FREDDY RONDÓN^{1,2*}, LORENA CISNEROS², JHOELIS CALDERÓN², DYLAN MARCHENA², YULIANNA OSCOPIO²,
JAVIER SÁNCHEZ-ROJAS^{2*}, VÍCTOR ROCABADO¹, MICHAEL SCHMITZ^{1,2,3}.

¹Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas - FUNVISIS, Dpto. de Geofísica aplicada, 1070 Caracas, Venezuela.
e-mail: *fjrondon369@gmail.com; jsanchez@funvisis.gob.ve

²Universidad Simón Bolívar - USB, Dpto. de Ciencias de la Tierra, 1080 Caracas, Venezuela.

³Universidad Central de Venezuela - UCV, Caracas, Venezuela.

RESUMEN

Se generaron modelos gravimétricos y magnéticos 2D de la región noroccidental de Venezuela para determinar la estructura cortical del orógeno andino y obtener la profundidad de las discontinuidades principales, así como estimar la profundidad del basamento, el espesor de sedimentos y la geometría de las estructuras geológicas presentes. Los modelos corticales fueron generados empleando datos gravimétricos terrestres, datos gravimétricos satelitales del modelo EGM2008 (*Earth Gravity Map 2008*) y datos magnéticos satelitales del modelo EMAG2 (*Earth Magnetic Anomaly Grid 2*). Los modelos muestran una estructura litosférica representada por capas y bloques horizontales y verticales, cuyos patrones de variación de la densidad y susceptibilidad fueron elaborados en función de variaciones verticales y laterales. Se realizó una evaluación de los modelos propuestos para los Andes de Mérida donde se determinó que los perfiles muestran mayor grado de correlación con el modelo del orógeno flotante, descrito en la literatura, sugiriendo un sistema de compensación regional, en el cual la flexión de la Placa Suramericana es producida por la carga orogénica de los Andes de Mérida y la Cuenca Barinas-Apure, mientras que la flexión del Bloque Maracaibo puede ser atribuida tanto a la gran carga sedimentaria que soporta como a la subducción tipo A con la Placa Suramericana. Además, existe una subducción tipo B de la Placa Caribe debajo de la Placa Suramericana en dirección NO-SE con un buzamiento de $\sim 25^\circ$. De igual manera, se confirmó que la profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic de la Placa Suramericana es mayor que la del Bloque Maracaibo.

Palabras clave: Modelos corticales, Andes de Mérida, Placa Suramericana, Placa Caribe, Bloque Maracaibo, Discontinuidad de Mohorovicic.

2D CORTICAL GRAVIMETRIC AND MAGNETIC MODELS PROPOSED FOR THE ANDES DE MÉRIDA - VENEZUELA

ABSTRACT

2D gravimetric and magnetic models were generated from the northwestern region of Venezuela, to determine the crustal structure of the Mérida Andes and to obtain the depth of the main discontinuities, as well as to estimate the depth of the basement, the thickness of the sediments and the geometry of the geological structures present. The crustal models were generated using terrestrial gravity data, satellite gravity data from the EGM2008 (Earth Gravity Map 2008) and satellite magnetic data from the EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid 2). The models show a lithosphere structure represented by horizontal and vertical layers and blocks, whose patterns of variation of density and susceptibility were elaborated in function of vertical and lateral variations. An evaluation of the proposed models for the Mérida Andes was carried out, where it was determined that the profiles show a higher degree of correlation with the floating orogen model, which is described in the literature, suggesting a regional compensation system. The flexion of the South American Plate is produced by the orogenic load of the Mérida Andes and the Barinas-Apure Basin, while the flexion of the Maracaibo Block can be attributed to both the large sediment load it carries and the type A-subduction with the South American Plate. In addition, there is a type B-subduction of the Caribbean Plate below the South American Plate in a NW-SE direction with a dip of $\sim 25^\circ$. Likewise, it was observed that the Mohorovicic discontinuity of the South American Plate is deeper than the Maracaibo Block.

Keywords: Cortical Models, The Mérida Andes, South American Plate, Caribbean Plate, Maracaibo Block, Mohorovicic discontinuity.

INTRODUCCIÓN

La región noroccidental del continente suramericano es una de las principales zonas tectónicas activas del mundo, debido a la convergencia de las Placas de Suramérica, Caribe y Nazca (Rondón *et al.*, 2016). De tales desplazamientos y regímenes de esfuerzos compresivos generados se formaron diversas estructuras como la Sierra de Santa Marta, la Sierra de Perijá y los Andes de Mérida (Pérez *et al.*, 2001). Dentro de la región noroccidental de Venezuela, la evolución geodinámica no está definida, aun cuando existen evidencias de una gran serie de eventos que afectaron el borde noroccidental de la Placa Suramericana, presentes en cuencas, serranías y cordilleras tanto de Colombia como de Venezuela (e.g. Audemard, 1993). Algunos trabajos científicos (e.g. Kellogg y Bonini, 1982; Van der Hilst y Mann, 1994; Colletta *et al.*, 1997; Yoris y Ostos, 1997; Duerto, 1998; Audemard y Audemard, 2002; Chacín *et al.*, 2005; Duerto *et al.*, 2006), han presentado una explicación parcial de la evolución geotectónica de la región, sin embargo, ninguno ha llegado a un resultado concreto. Monod *et al.*, (2010) realizaron un análisis descriptivo de todos estos trabajos, estableciendo dos

corrientes de estudio sobre el origen de los Andes de Mérida, describiendo la evolución tectónica-estructural de la región a través de cinco modelos genéticos.

Estos procesos generaron modificaciones en los campos gravimétrico y magnético regional, formando una serie de anomalías, las cuales pueden ser empleadas para describir las estructuras geológicas presentes. Tomando en cuenta estas condiciones, se realizaron modelos gravimétricos y magnéticos corticales 2D, empleando datos gravimétricos terrestres (Campos, 2014; Gil, 2014; Pérez, 2014; Hermoso, 2015) adquiridos a lo largo de perfiles ubicados en la región Noroccidental de Venezuela (Figura 1), que fueron integrados con datos del modelo gravimétrico satelital *Earth Gravity Map 2008* (EGM2008) (Pavlis *et al.*, 2008) con el fin de mejorar la cobertura de los datos terrestres, en algunas áreas y datos magnéticos satelitales provenientes del *Earth Magnetic Anomaly Grid* (EMAG2) (Maus *et al.*, 2009). El principal propósito de este trabajo es presentar la evaluación gravimétrica y magnética de los modelos propuestos en la región noroccidental de Venezuela para estudiar la evolución de los Andes venezolanos, además de las estructuras geológicas aledañas, investigar a profundidad la estructura cortical y su relación con la raíz del orógeno.

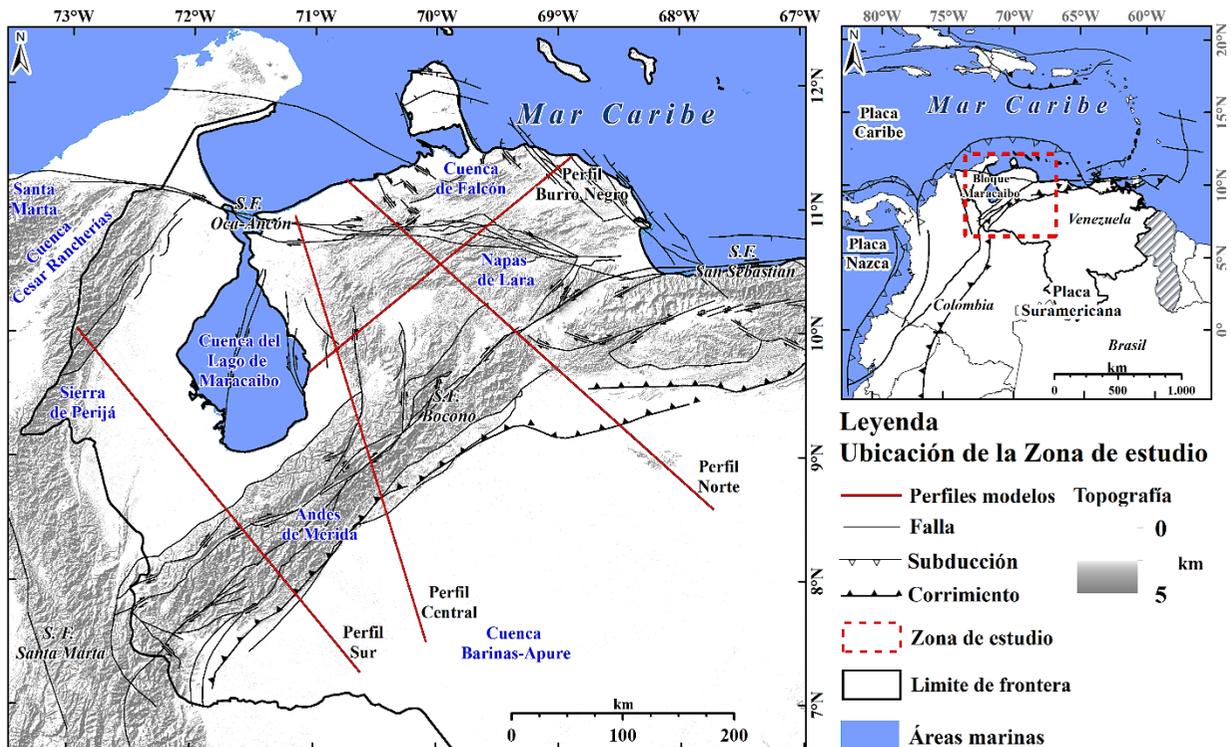


Figura 1. Área de estudio, tectónica y cinemática de la región noroccidental de Venezuela con ubicación de perfiles corticales. Sistema de fallas de Venezuela (Según Audemard *et al.*, 2000) sobre modelo digital de elevaciones (Jarvis *et al.*, 2008).

MARCO GEOLÓGICO

El norte de los Andes Suramericanos se caracteriza por ser una cadena de tendencia noreste y cinturón de empuje de poca profundidad cuya sismicidad llega hasta 600 km de

profundidad, se caracteriza por tener un patrón complejo de deformación. La sismicidad y tectónica activas del norte de los Andes se atribuyen a la compresión y empuje menor debido a la convergencia oblicua de las Placas de Nazca y el Caribe con América del Sur (e.g. Pennington, 1981).

Mediciones de los movimientos relativos entre estas placas describen el margen occidental de la cadena como transformante, limitado al Este por la subducción de la corteza oceánica suramericana y por debajo de la Placa Caribe (Perez y Aggarwal, 1981; Weber *et al.*, 2001; Pérez *et al.*, 2018).

Perez y Aggarwal, (1981) establecen que la Placa del Caribe se mueve hacia el este con respecto a América del Sur a una tasa de 20 ± 2 mm/año. La misma está conformada por elementos estructurales, tales como los sistemas de Falla de Boconó y Oca-Ancón, la Sierra de Perijá, Las Cuencas Barinas-Apure y de Maracaibo, el Arco de Mérida entre otros, los cuales han marcado su geografía actual (Figura 1). Según Audemard, (1991), la geodinámica de la región noroccidental de Venezuela y nororiental de Colombia se resume, en cuanto a los procesos geodinámicos durante el Mesozoico-Cenozoico, de la siguiente manera:

a) Apertura de Pangea en el Jurásico que inicia la separación de las Américas y da lugar a los procesos que formaron los grábenes jurásicos.

b) Desarrollo del margen pasivo a lo largo de todo el Cretácico.

c) Inicio en el Mioceno medio del levantamiento de los Andes de Mérida, de la Sierra de Perijá y de la Sierra de Santa Marta, por el choque del Arco de Panamá contra el noroccidente del continente suramericano.

d) Separación en el Mioceno superior de la Cuenca Barinas-Apure y la Cuenca del Lago de Maracaibo por el levantamiento andino y el relleno de estas con material molásico.

e) Inicio de la expulsión del Bloque Maracaibo por la colisión del continuo levantamiento de los Andes y Perijá por la interacción del Bloque Maracaibo contra la Placa Suramericana.

Lugo *et al.*, (1987) también señalan que el último período de deformación que da origen a los Andes de Mérida actuales ocurrió durante el Mioceno.

La región noroccidental de Venezuela se caracteriza por sus sistemas de fallas rumbo-laterales, como: el Sistema de Fallas Boconó, el Sistema de Fallas Oca-Ancón, el Sistema de Fallas Santa Marta, el Sistema de Fallas Central-Sur Andino y los Sistemas de Fallas de Piedemonte andino, todas ellas con componentes verticales variables y asimétricos, debido al desplazamiento dextral de la Placa del Caribe en relación con América del Sur (e.g. Audemard *et al.*, 2000; Audemard y Audemard, 2002).

Los Andes de Mérida son un cinturón Mio-Plioceno y constituyen la prolongación este de los Andes Suramericanos desde el Suroeste de Colombia hasta el territorio venezolano con una longitud aproximada de 420 km, una altitud máxima de ~5 km y cuya orientación SO-NE ha sido controlada por la ubicación de un sistema de grábenes jurásicos que se invirtieron como parte de la deformación del Mio-Plioceno. Su orógeno está compuesto por un núcleo cristalino de gneis Precámbrico y esquistos del Paleozoico al Mesozoico con rocas plutónicas intrusivas, cubierto por sedimentos clásticos del Jurásico y Cretácico, flanqueados por depósitos molásicos al norte y sur de edad

ecocena (e.g. Colletta *et al.*, 1997). Está limitado en ambos flancos por las Cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure. la Cuenca Barina-Apure es una cuenca antepaís generada por la respuesta flexural de los Andes de Mérida (Chacín *et al.*, 2005), la Cuenca de Maracaibo es una cuenca antepaís separada de la Cuenca Barinas-Apure por los Andes de Mérida. Su gran profundidad (10 km) en comparación con la Cuenca de Barinas-Apure (5 km) es evidencia de que el bloque posee un espesor elástico considerablemente menor al de la Placa Suramericana (Armaiz-Rodríguez *et al.*, 2011).

A diferencia de los Andes Suramericanos, los Andes de Mérida no son producto directo de orogénesis relacionada con subducción de tipo B. Estos se elevaron durante el Mioceno Medio, como consecuencia directa de la interacción entre La Placa Caribe y la Placa Suramericana debido a la convergencia del arco de Panamá y el Noroeste de Suramérica (Stephan, 1982; Audemard, 1991; Colletta *et al.*, 1997; Audemard y Audemard, 2002). Audemard y Audemard, (2002) consideran que la interacción de las Placas de Nazca y Caribe contribuyeron a la orogénesis de los Andes de Mérida, indicando que el valor mínimo gravimétrico se debe a una gran depositación de sedimentos y por la existencia de subducción de tipo A de polaridad NO del cratón guayanés (Suramérica) pasando bajo los Andes de Mérida (Henriques, 2004).

Desde la década de 1950, dos tipos de modelos tectónicos fueron propuestos para explicar el origen de los Andes venezolanos, los modelos simétricos y los modelos asimétricos. Monod *et al.*, (2010), hicieron un análisis comparativo de ambos modelos, sugiriendo que la interpretación de la estructura cortical varía si la cadena montañosa andina es simétrica o asimétrica. Según ellos, si el orógeno es simétrico, la cadena montañosa podría haberse formado como una estructura de flor positiva o como resultado de una subducción de bajo ángulo, de ser así, los Andes venezolanos serían considerados como una cadena simétrica con una falla rumbo deslizante principal ubicada en el centro y delimitado por fallas inversas en ambos lados del cinturón montañoso, por lo que plantea que la falla representa el límite de placas entre la Placa Suramericana y el Bloque de Maracaibo y que los Andes de Mérida serían el resultado de la compresión entre dos placas y estaría integrada por dos cadenas separadas, divididas por la Falla de Boconó.

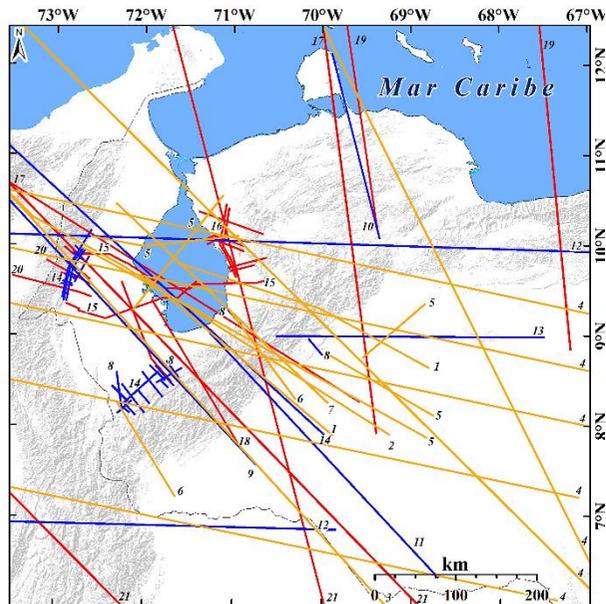
Si, por el contrario, el orógeno es asimétrico entonces los Andes venezolanos podrían haberse formado en respuesta a una subducción continental ya sea en dirección Noroeste (Audemard, 1991; Audemard y Audemard, 2002) como Sureste (e.g. Kellogg y Bonini, 1982; De Toni y Kellogg, 1993). Hospers y Van Wijnen, (1958) sugieren que la asimetría observada en el patrón de la gravedad es producida por un cabalgamiento de la parte sureste de la corteza sobre la parte noroeste, hacia la Cuenca del Lago de Maracaibo. Según Monod *et al.*, (2010), el hecho de que los datos geocronológicos (Kohn *et al.*, 1984; Bermúdez, 2009) muestran una exhumación diacrónica del Neógeno sobre los Andes, niega en cierto sentido cualquier modelo simétrico para la Formación de los Andes de Mérida.

METODOLOGÍA

COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN

El objetivo de la primera fase consistió en recopilar e integrar información geológica, cartográfica, sísmica, magnética y gravimétrica del área de estudio, dentro de un Sistema de Información Geográfico (SIG), (Figura 2), a partir de trabajos previos (e.g. Folinsbee, 1972; Audemard, 1991; Lugo *et al.*, 1994; Escobar y Rodríguez, 1995; Colletta *et al.*, 1997; Yoris y Ostos, 1997; Audemard y Audemard, 2002; Cediél *et al.*, 2003; Chacín *et al.*, 2005; Duerto *et al.*, 2006; Arnaiz-Rodríguez *et al.*, 2011), con el fin de comprender el origen de los Andes meridionales, los aspectos importantes de su evolución y su geodinámica y tectónica, así como extraer toda la información referente a los principales rasgos geológicos, susceptibilidades magnéticas y densidades promedios de las rocas presentes en el Bloque de Maracaibo, para abarcar los rasgos más importantes de las estructuras morfoestructurales presentes en la zona de estudio para realizar modelos gravimétricos-magnéticos integrados.

Estudios geofísicos integrados (e.g. Van der Hilst y Mann, 1994; Cediél *et al.*, 2003; Cortés y Angelier, 2005; Monod *et al.*, 2010; Sanchez-Rojas, 2011), fueron tomados en cuenta por poseer perfiles que poseen interpretación sísmica, tomografías y modelos gravimétricos, así como la interpretación de mecanismos focales, por lo que la mayoría



- Leyenda
- Ubicación de trabajos previos en la zona de estudio
- | | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1) Folinsbee 1972 | 8) Audemard & Audemard 2002 | 15) Mann et al 2006 |
| 2) Kellog 1985 | 9) Cediél 2003 | 16) Requena 2008 |
| 3) Audemard 1991 | 10) Rodríguez & Sosa 2003 | 17) Bezada et al 2010 |
| 4) Van der Hilst 1994 | 11) Chacín et al 2005 | 18) Monod et al 2010 |
| 5) Parnaud 1995 | 12) Cortés 2005 | 19) Sanchez 2010 |
| 6) Colletta 1997 | 13) Nuñez 2005 | 20) Sanchez et al 2014 |
| 7) Yoris & Ostos 1997 | 14) Duerto et al 2006 | 21) Sanchez & Palma 2011 |

Figura 2. Ubicación de trabajos previos realizados en la región noroccidental de Venezuela. Modelo digital de elevación (Jarvis *et al.*, 2008).

de estos trabajos describen la subducción de la Placa Caribe y la interacción de esta con la Placa Suramericana y la Placa de Nazca, así como, parte de la estructura de la tierra hasta el manto astenosférico (~200 km).

A partir de los trabajos de gravimetría y magnetometría se obtuvo información sobre variaciones y contrastes verticales y laterales de gravedad y susceptibilidad magnética, vinculados a las diferencias geológicas de las unidades litológicas del subsuelo. Esto permitió inferir la composición del mismo, para ser usado en la realización de los modelos corticales, obteniendo así, una buena aproximación de la información relacionada a las densidades y susceptibilidades pertenecientes a las diferentes estructuras geológicas que conforman el subsuelo.

Debido a la alta resolución y poder de penetración de los perfiles sísmicos (e.g. Ávila *et al.*, 2017; Medina, 2017; Yegres *et al.*, 2017; Mazuera-Rico *et al.*, 2018), estos se emplearon en la detección de estructuras geológicas (plegamientos montañosos, zonas de subducción) en la zona de estudio, para generar modelos de gran resolución al grado de permitir caracterizar las fallas geológicas y la conformación de los tipos de estructuras presentes en el subsuelo.

DATOS GRAVIMÉTRICOS

Los datos gravimétricos usados (Figura 3) en este trabajo fueron compilados por la Universidad Central de Venezuela (Campos, 2014; Gil, 2014; Pérez, 2014; Hermoso, 2015) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Con el fin de mejorar la cobertura y calidad de los datos existentes, fueron empleados datos del modelo gravimétrico satelital *Earth Gravity Map 2008* (EGM2008) (Pavlis *et al.*, 2008).

Los datos fueron procesados y homogenizados, tomando en consideración los valores actuales de gravedad absoluta medidos en la zona y nuevos estándares en las ecuaciones usadas para el cálculo de la anomalía de Bouguer (AB). La AB fue calculada empleando los siguientes criterios: la gravedad teórica fue calculada con la fórmula de Somigliana (1930) (Moritz, 1980), la corrección topográfica fue calculada para una capa esférica de radio de 167 km y se asumió una densidad de 2670 kg/m³, debido a que este valor es cercano a la densidad media de las rocas en superficie del área de estudio. El modelo digital de elevación del terreno (DEM) usado para la corrección topográfica está basado en el modelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Jarvis *et al.*, 2008) con una resolución de 30 m. Considerando todas las fuentes de error en los datos y en el procesamiento de los mismos, el error estimado de los valores de AB es de $\pm 3 \times 10^{-5}$ m/s² (3×10^{-5} m/s² = 1 mGal) aproximadamente. La interpolación del mapa de AB de la zona de estudio fue realizado mediante el método Kriging, el cual asume la hipótesis de que la altitud es una variable regionalizada, con lo que se garantiza una varianza mínima de predicción con respecto a otros métodos de interpolación.

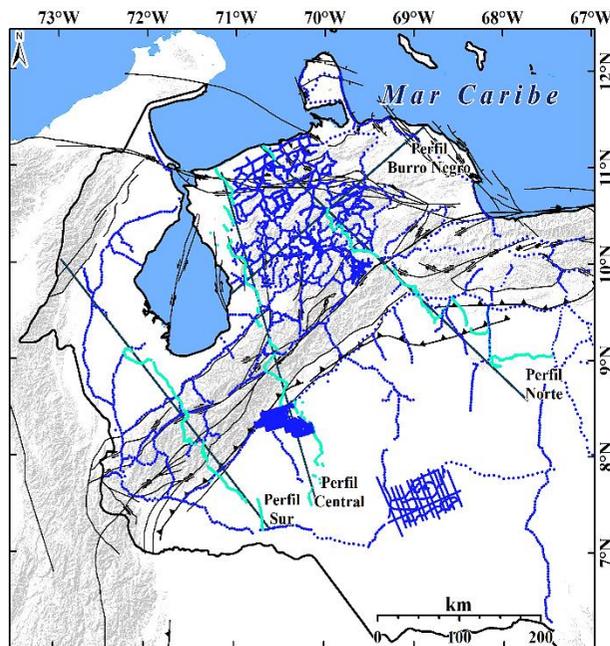


Figura 3. Ubicación de estaciones gravimétricas terrestres en la zona noroccidental de Venezuela. Sistema de fallas de Venezuela (Según Audemard *et al.*, 2000) sobre modelo digital de elevaciones (Jarvis *et al.*, 2008).

DATOS MAGNÉTICOS

Se emplearon datos magnéticos del Modelo de Anomalías Magnéticas Global EMAG2 (*Earth Magnetic Anomaly Grid 2*) (Maus *et al.*, 2009). Dicho modelo es una recopilación de información satelital, marina y aérea con una resolución mejorada de 2 arco minutos con una altitud de 4 km por encima del geode en la que las largas longitudes de ondas, mayores a 330 km, fueron reemplazadas por las del modelo de campo MF6 del satélite CHAMP. Se generó un mapa de anomalía magnética (AM) de la región de estudio empleando el método de interpolación *Kriging*.

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS 2D

Los modelos 2D se realizaron utilizando el programa IGMAS (*3D Interactive Gravity Magnetic Application System*) (Götze, 1978; Götze y Lahmeyer, 1988; Schmidt y Götze, 1998) que, permite realizar modelos gravimétricos y magnéticos a partir de secciones en dos dimensiones. El algoritmo de cálculo que emplea está desarrollado en función de las integrales del teorema de Gauss, el cual usa secciones paralelas para aproximar cuerpos geológicos con densidad/susceptibilidad constante.

Las secciones se construyeron a partir de polígonos, los cuales representan los cuerpos geológicos. Las caras de los poliedros son usadas para resolver la integral aplicando el teorema de Gauss en 2D. Este programa computacional incorpora funciones, las cuales permiten integrar información además de datos geofísicos y geológicos para realizar la correcta calibración del modelo.

El modelo final se obtiene al lograr el mejor ajuste entre el valor de gravedad calculada y observada, considerando las restricciones impuestas según la geología local y fuentes independientes de información. Debido a que el modelado de campos potenciales no es un método independiente, se requirió de información adicional para su realización, por lo que se incorporaron los resultados de otros métodos geofísicos y geológicos para ajustar la geometría, densidades y susceptibilidades del modelo.

ESTIMACIÓN DE LAS DENSIDADES Y LAS SUSCEPTIBILIDADES

La estimación inicial de las densidades empleadas consideran los resultados presentados por Hospers y Van Wijnen, (1958) sobre densidades asociadas a las rocas presentes en los Andes venezolanos. Las densidades de las principales formaciones presentes en las cuencas fueron tomadas de datos de pozos (e.g. Santiago *et al.*, 2014).

Las densidades de los cuerpos y estructuras profundas se determinaron mediante el uso de las ecuaciones empíricas que relacionan la densidad con la velocidad de ondas compresionales (Nafe y Drake, 1963), tomando como velocidades las reportadas en los trabajos de sísmicas de refracción profunda (e.g. Bezada *et al.*, 2008; Schmitz *et al.*, 2008; Bezada *et al.*, 2010; Pinto, 2015; Saavedra, 2015).

Otras densidades desconocidas fueron estimadas usando la información litoestratigráfica existente basada en distribución geográfica del mapa geológico de Venezuela (Hackley *et al.*, 2006) y el léxico estratigráfico venezolano (Intevep, 2011).

Para estimar los valores desconocidos de densidad se compilo los resultados publicados de modelos gravimétricos, en trabajos previos (e.g. Folinsbee, 1972; Kellogg y Bonini, 1982; Guédez, 2003; Henriques, 2004; Núñez, 2005; Schmitz *et al.*, 2005; Bermúdez, 2009; Arnaiz-Rodríguez *et al.*, 2011; Cedeño, 2011; Sanchez-Rojas, 2011; Verrocchi, 2011; Sánchez y Palma, 2014) (Tabla 1).

Las susceptibilidades magnéticas empleadas inicialmente fueron tomadas de trabajos previos (Tabla 2) realizados sobre la zona de estudio en la región noroccidental de Venezuela (e.g. Vargas, 2002; Rodríguez y Sousa, 2003; Jasje, 2004; Núñez, 2005; Arraiz, 2008; González y Martínez, 2008; Martínez, 2012).

Tabla 1. Densidades empleadas por otros autores en la realización de modelos gravimétricos en el área de estudio.

Autor ρ (gr/cm ³)	Arnaiz 2011	Cedeño 2011	Folinsbee 1972	Guedez 2003	Henríquez 2014	Kellogg & Bonini 1982	Núñez 2005	Sánchez 2014	Schmitz 2005	Verrocchi 2011
Agua oceánica								1,03		
Manto astenosférico								3,34		
Manto litosférico Caribe								3,14-3,41		
Corteza oceánica Caribe		2,9-2,95						2,95-3,18		
Manto litosférico	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,20	3,3	3,17-3,25	3,3	3,3
Precámbrico Corteza Continental					2,85					
Corteza inferior Placa Suramericana	2,95	2,8-2,85		2,9		2,90	2,9	2,77-2,85	2,85-2,93	2,93
Corteza superior Placa Suramericana	2,80	2,75		2,80-2,85		2,70	2,7	2,70-2,76	2,7-2,8	2,75
Paleozoico					2,8					
Sedimentos Jurásicos	2,67		2,67		2,65	2,65-2,67		2,51	2,68	2,55
Sedimentos Cretáceo-Mioceno	2,55	2,6	2,5-2,64		2,6	2,6	2,6	2,45-2,51	2,59	
Sedimentos Mioceno-Presente	2,3	2,25	2,3-2,48		2,25	2,25	2,4	2,20-2,4	2,4	2,4
Andes de Mérida	2,8									
Sierra de Perijá	2,75									
Cuenca de Falcón								2,4		
Cuenca del Lago de Maracaibo	2,5									
Bloque Maracaibo	2,75									
Corteza inferior Bloque Maracaibo	2,945									
Cuenca Barinas-Apure	2,5									
Graben de Apure	2,6-2,65									
Graben de Mantecal	2,6									

Tabla 2. Susceptibilidades empleadas por otros autores en la realización de modelos magnéticos en el área de estudio.

Autor χ (SI)	Arraiz 2008	Jaspe 2004	Núñez 2005	Martínez 2012	Rodríguez & Sousa 2003	González & Martínez 2008	Vargas 2002
Manto astenosférico	0,036	0,006			0,025		0,013
Manto litosférico				0,036			
Corteza inferior		0,001	0,003-0,006	0,003			0,01
Corteza superior	0,0085		0,001-0,005				
Corteza continental Caribe					0,005		
Corteza oceánica Caribe					0,01		
Plioceno					0,001		
Oligoceno						0,000036	
Eoceno					0,003	0,000036	
Paleoceno					0,003		0,00042
Cretácico					0,003-0,006	0,00004	0,00042
Jurásico					0,003		0,00078

ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS

El método del análisis espectral propuesto por [Spector y Grant, \(1970\)](#) fue empleado para la estimación de profundidades de las principales interfaces, mediante la transformación de los datos del dominio espacio al dominio de la frecuencia, realizando un gráfico de la amplitud versus la frecuencia. La curva del gráfico permitió observar cambios de pendiente los cuales son proporcionales a los topes de los cuerpos ubicados en el subsuelo.

DECONVOLUCIÓN DE EULER

Se empleó los datos de AB para preparar un mallado y así crear un mapa de AB, con el fin de proyectar sobre él las soluciones de la Deconvolución de Euler, tomando en consideración parámetros como el índice estructural (SI; *Structural Index*), tamaño de ventana (WS; *Window Size*), porcentaje máximo de tolerancia (T; *Tolerance*) y la distancia máxima de profundidad.

Luego de realizar una serie de pruebas se determinó el rango de valores de parámetros de la Deconvolución de Euler que proyectaban mejores resultados ([Tabla 3](#)), se generaron diversos mapas que fueron empleados para la estimación de fuentes gravimétricas y valores de profundidad de las estructuras geológicas y las principales interfaces (discontinuidad de Mohorovicic, discontinuidad de Conrad, espesor cortical de las cuencas entre otros).

Tabla 3. Parámetros empleados en la Deconvolución de Euler

Parámetros	Valor
Max % Tolerancia de Profundidad (T)	3
Tamaño de ventana (WS)	15
Máxima distancia aceptada	50 km
Índice Estructural (SI)	[0-2]

AJUSTE DE LA GEOMETRÍA DE LOS MODELOS

Tomando en cuenta los trabajos previos realizados en la zona de estudio, se procedió a construir cada característica de los modelos corticales tomando en cuenta las siguientes consideraciones ([Figura 4](#)):

- La estructura de la Placa Caribe es tomada de los trabajos de [Van der Hilst y Mann, \(1994\)](#), [Malavé y Suárez, \(1995\)](#), [Pérez et al., \(1997\)](#), [Colmenares y Zoback, \(2003\)](#), [Cortéz y Angelier, \(2005\)](#), [Masy et al., \(2007\)](#), [Bezada et al., \(2010\)](#), [Sánchez y Palma, \(2014\)](#) y [Mazuera-Rico et al., \(2018\)](#), que asumen la existencia de una lámina de la litosfera del Caribe, subduciendo debajo del norte de Colombia y el noroccidente venezolano a lo largo de los Andes de Mérida, extendiéndose desde el norte de Colombia hacia la zona del nido Bucaramanga, debajo del borde sur del Bloque

de Maracaibo donde la losa se inclina $\sim 15^\circ$ y el ángulo de inclinación aumenta hasta 25° a profundidades superiores a los 100 km.

- La estructura cortical superficial formada por las cadenas montañosas de Santa Marta (Colombia), la Sierra de Perijá (Limite Colombia-Venezuela) y los Andes de Mérida (Venezuela), producto de la subducción de la Placa Caribe y su interacción con el Bloque Maracaibo y la Placa Suramericana, está basada en los trabajos de [Kellogg y Bonini, \(1982\)](#), [Audemard, \(1991\)](#), [Audemard y Audemard, \(2002\)](#) y [Cediel et al., \(2003\)](#).
- La estructura de las cortezas superior e inferior junto con las interfaces de la discontinuidades de Mohorovicic y de Conrad entre la Cuenca del Lago de Maracaibo, la Cuenca de Falcón, los Andes de Mérida y la Cuenca Barinas Apure, fue realizada tomando como referencia los modelos gravimétricos de [Kellogg y Bonini, \(1982\)](#), [Audemard, \(1991\)](#), [Audemard y Audemard, \(2002\)](#), [Cediel et al., \(2003\)](#), [Rodríguez y Sousa, \(2003\)](#), [Henriques, \(2004\)](#), [Chacín et al., \(2005\)](#), [Guédez, \(2003\)](#), [Arnaiz-Rodríguez et al., \(2011\)](#), [Linares et al., \(2014\)](#), y [Sánchez y Palma, \(2014\)](#).
- Para la discontinuidad de Mohorovicic fue establecido, usando de referencia los trabajos de [Niu et al., \(2007\)](#), [Schmitz et al., \(2008\)](#), [Saavedra, \(2015\)](#) y [Pinto, \(2015\)](#).
- El estudio de [Arnaiz y Orihuela, \(2013\)](#) sobre la profundidad de Curie fue utilizado como información preliminar de los perfiles.
- La profundidad del basamento y el espesor de sedimentos de la Cuenca Barinas-Apure fue modelado a partir de secciones sísmicas de [González, \(2009\)](#) y [Santiago et al., \(2014\)](#), mientras que la profundidad del basamento y el espesor de sedimentos de la Cuenca del Lago de Maracaibo fue diseñado a partir de secciones sísmicas de [Mann et al., \(2006\)](#).
- Las Cuencas de Maracaibo y de Barinas-Apure fueron generadas como cuencas de flexión a partir de los trabajos de [Henriques, \(2004\)](#), [Chacín et al., \(2005\)](#), [Requena y Zambrano, \(2008\)](#) y [Arnaiz-Rodríguez et al., \(2011\)](#).
- La Cuenca de Falcón se realizó a partir del modelo geológico-estructural de [Rodríguez y Sousa \(2003\)](#) y [Bezada et al., \(2008\)](#).
- Los grábenes de Apure y Mantecal se diseñaron partiendo de los trabajos de [González, \(2009\)](#) y [Arnaiz-Rodríguez et al., \(2011\)](#).
- La estructura cortical de la Sierra de Perijá fue generada basada en el modelo de [Audemard y Audemard, \(2002\)](#) y las secciones sísmicas de [Sánchez et al., \(2008\)](#). El Bloque Santa Marta, la Cuenca Cesar Rancherías y la Sierra de Perijá se crearon a partir de la sección estructural de [Chicangana et al., \(2011\)](#). Los flancos de los Andes de Mérida y el Flanco sur de la Sierra de Perijá fueron realizados a partir de las secciones sísmicas de [Duerto et al., \(2006\)](#).
- Se identificaron y generaron las unidades aflorantes a lo largo de los perfiles descritas por [Hackley et al., \(2006\)](#).

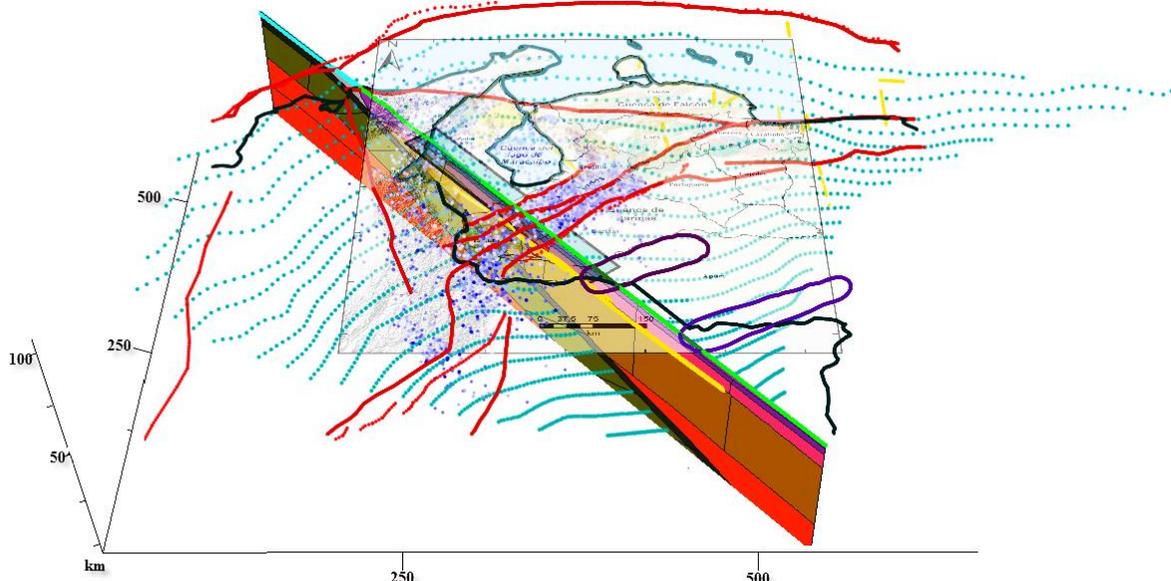


Figura 4. Vista 3D de los elementos empleados en la construcción de los modelos: Sistemas de fallas y corrimientos (Líneas rojas), ubicación de los grábenes (puntos color púrpura), límites fronterizos (Líneas negras).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

MAPA DE ANOMALÍA GRAVIMÉTRICA

La **Figura 5** muestra el mapa de AB de la región Noroccidental de Venezuela, en el cual se observa que los valores de anomalía varían en el rango entre -155 a 63 mGal.

El prisma de acreción del Sur del Caribe muestra valores de gravedad baja en sentido ONO-ESE, se puede observar un grupo de anomalías con máximos locales separados por valores relativos de baja gravedad como máximos locales a lo largo de las Antillas de Sotavento (Aruba, Bonaire, y Curazao).

El máximo gravimétrico ubicado hacia el NO sobre la Guajira, puede ser un indicativo asociado del contacto lateral entre la Placa Caribe y el Bloque de Maracaibo con el Bloque de Bonaire, además de las rocas ígneas presentes en la zona, mientras que el máximo ubicado al SE podría ser producto de la respuesta gravimétrica de la Placa Suramericana.

Sobre el continente, la AB más relevante es una prominente anomalía observada en la Cuenca baja del este de Venezuela causada sobre todo por una gran cantidad de sedimentos de relleno.

Adicionalmente, la AB indica una fuerte tendencia asimétrica que ya ha sido descrita por **Bucher, (1952)** a lo largo de la cordillera de los Andes, con un comportamiento definido principalmente por estructuras de gran complejidad tectónica y geológica.

Los altos valores de mínimo gravimétrico (~110 mGal) en el gradiente del flanco Norandino pueden ser referidos a la fuerte pendiente del basamento de la Cuenca del Lago de Maracaibo y a su profundidad máxima estimada

en más de 10 km, mientras que el mínimo (~80 mGal) hacia el flanco sur andino puede ser vinculado con la profundidad de la Cuenca Barinas-Apure, mientras que los valores por encima de -25 mGal, son vinculados a la respuesta gravimétrica de la Placa Suramericana.

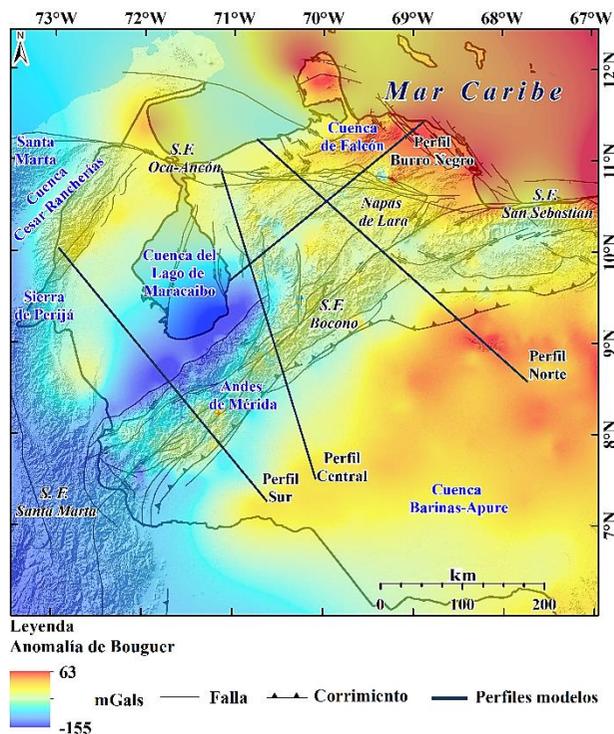


Figura 5. Mapa de anomalía de Bouguer de la región Noroccidental de Venezuela. Sistema de fallas de Venezuela (**Audemard et al., 2000**) con Mapa digital de elevaciones (**Jarvis et al., 2008**).

Sobre el flanco norte del Sistema de Fallas Boconó, se observa un mínimo gravimétrico con un valor de aproximadamente -150 mGal, correspondiente a la respuesta gravimétrica regional de la raíz cortical de los Andes de Mérida y los sedimentos presentes en la Cuenca del lago de Maracaibo, y a la posible existencia de una subducción de tipo A de hundimiento hacia el NO, producto de la colisión de la Placa Suramericana con el Bloque Maracaibo.

La existencia de un mínimo gravimétrico absoluto con dirección NE-SO sobre el flanco norte del sistema Andes de Mérida y no sobre la cordillera andina como se puede apreciar en el mapa de gravedad observada, desplazado en dirección NO hacia la Cuenca del Lago de Maracaibo, podría ser causado por la carga sedimentaria de la Cuenca, el desplazamiento de la raíz cortical de los Andes por eventos tectónicos debido a la interacción de la Placa Caribe con el Bloque de Maracaibo o como la suma de la respuesta gravimétrica del depocentro de la Cuenca del Lago de Maracaibo con la raíz cortical de los Andes.

En los Andes de Mérida, las anomalías positivas se asocian a rocas precámbrico-proterozoicas con alto grado de metamorfismo. Los máximos relativos, se vinculan a las rocas precámbricas y proterozoicas de los Andes, los cuales se formaron como consecuencia de la convergencia del arco de Panamá y el Oeste de Suramérica, la cual inicio la formación de esta cadena montañosa (Stephan, 1982; Audemard, 1991; Colletta et al., 1997; Audemard y Audemard, 2002). Las anomalías negativas en los flancos norte y sur de los Andes de Mérida poseen una geometría similar pero muy diferentes amplitudes. Estas anomalías son causadas por la flexura de la corteza y la cobertura sedimentaria de las respectivas cuencas, en asociación con los sistemas de corrimiento presentes en ambos flancos de la cadena. El flanco norte muestra una anomalía con valores mínimos cercanos a -40 mGal, mientras, el flanco sur posee valores ligeramente mayores a -40 mGal en la región suroeste.

Estas características fueron interpretadas por Audemard y Audemard, (2002) como una consecuencia de la reología de dos cortezas continentales diferentes, sugiriendo que la corteza bajo el bloque de Maracaibo ha estado sometida, más recientemente, a eventos térmicos y tectónicos, debido al rifting continental durante el Jurásico, que la fría corteza precámbrica del cratón suramericano.

MAPA DE ANOMALÍA MAGNÉTICA

La anomalía magnética (AM) en la zona de estudio (Figura 6) posee valores que varían entre -220 y 220 nT. En la Cuenca de Bonaire, se presentan dos anomalías pronunciadas, donde se observa el máximo magnético de ~220 nT. Este máximo magnético se puede atribuir a las rocas metavolcánicas y metasedimentarias que le sirven de basamento a esta cuenca. El valor mínimo observado (-220 nT) está relacionado a la carga sedimentaria presente en esta zona, y corresponde al mínimo valor de anomalía del área.

En el área norte se pueden observar tres anomalías pronunciadas. La primera se encuentra en el estado Guárico, próxima a la Cuenca Barinas-Apure (aproximadamente -160 nT), que puede ser vinculada a la carga sedimentaria o a la interacción de la raíz cortical de los Andes de Mérida con las estructuras adyacentes. Luego, se encuentra una segunda anomalía magnética pronunciada de ~ -100 nT, que podría ser vinculado a lo anteriormente descrito.

La Cuenca de Falcón muestra el tercer valor de anomalía magnética pronunciada de 80 nT, y se atribuye a las rocas ígneas cercanas a la superficie.

Los valores de la AM regional resaltan la presencia de las cuencas, y así vincularlas a la configuración geológica regional. Las zonas con altos valores de AM negativas están vinculadas a aquellas con grandes espesores sedimentarios como las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure.

Por otra parte, los valores de AM positivas se relacionan con regiones que han sufrido fuerte tectonismo como la Cuenca de Falcón y Bonaire. La Cuenca del Lago de Maracaibo, presenta un valor de ~180 nT. Esta anomalía puede atribuirse a la carga sedimentaria de esta cuenca. La segunda anomalía se ubica en la sub-cuenca de Barinas (~ 6 nT) y el tercero se encuentra en sub-cuenca de Apure (~ -100 nT). Este par de anomalías limitan la Cuenca Barinas Apura, las cuales pueden atribuirse por la carga sedimentaria o por la interacción de la raíz cortical de los Andes de Mérida con las estructuras que limita. En promedio la Cuenca Barinas-Apure, muestra un valor cercano a los -30 nT. Este valor, al igual que la anomalía anterior, se puede atribuir a la

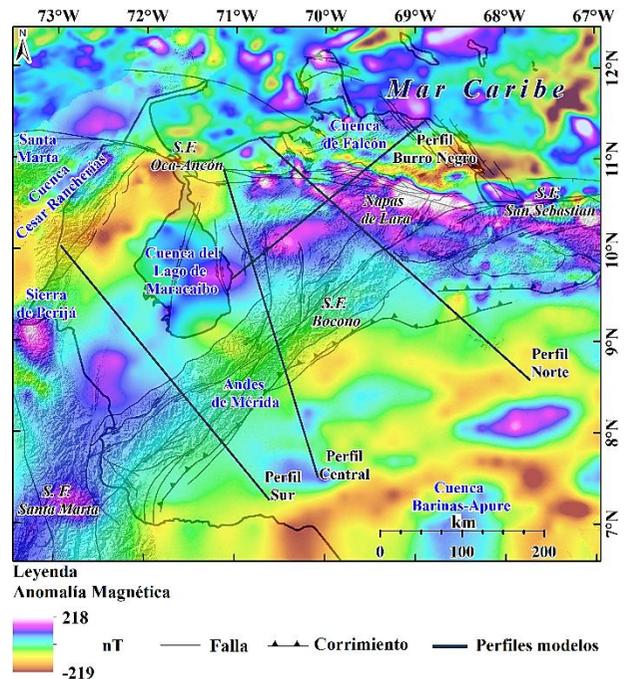


Figura 6. Mapa de anomalía Magnética (AM) de la región Noroccidental de Venezuela. Sistema de fallas de Venezuela (Según Audemard et al., 2000) sobre modelo digital de elevaciones (Jarvis et al., 2008).

interacción de la Cuenca con los flacos de la cadena de los Andes. Podemos observar que, el comportamiento en la zona de los Andes es homogéneo, el cual puede corresponder a la composición magnética uniforme de masa del orógeno andino.

DENSIDADES Y SUSCEPTIBILIDADES DE LOS MODELOS CORTICALES

Las densidades y susceptibilidades magnéticas finales asignadas a los cuerpos geológicos del modelo se resumen en la [Tabla 4](#).

Tabla 4. Densidades (ρ) y susceptibilidades magnéticas (χ) asignados a los cuerpos geológicos de los modelos corticales

Cuerpo Geológico	ρ (gr/cm ³)	χ (SI)
Densidad de Bouguer base	2,67	
Agua oceánica	1,00-1,03	
Manto astenosférico	3,26-3,39	0,025
Manto litosférico Caribe	3,14-3,41	0,025-0,036
Corteza oceánica Caribe	2,95-3,18	0,01
Manto litosférico suramericano	3,17-3,27	0,025-0,036
Corteza inferior Placa Suramericana	2,80-2,95	0,01-0,06
Corteza superior Placa Suramericana	2,70-2,80	0,001-0,0085
Basamento Bloque Sta. Marta	2,8	0,005
Basamento Sierra de Perijá	2,74	0,00055-0,0078
Basamento de la Cuenca del Lago de Maracaibo	2,72	0,0045-0,0048
Basamento de los Andes de Mérida	2,70-2,75	0,0005-0,0078
Basamento de la Cuenca Barinas-Apure	2,73	0,001-0,006
Basamento de la Cuenca de Falcón	2,70	0,001-0,006
Basamento de la Cuenca de Bonaire	2,72	0,001-0,006
Sedimentos Jurásicos	2,51-2,77	0,0078
Sedimentos Cretáceo-Mioceno	2,20-2,7	0,0003
Sedimentos Mioceno-Presente	2,20-2,00	0,0045-0,0078
Graben de Apure	2,6-2,65	
Graben de Mantecal	2,6	

Los valores preliminares de densidad de los cuerpos que conforman el modelo 2D fueron inicialmente ajustados. Durante el proceso de ajuste del modelo, fue variado el valor de las densidades y susceptibilidades asignado a cada cuerpo con la finalidad de lograr el mejor ajuste entre el valor de AB observado por el valor de AB calculado en el modelo.

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS

Los modelos propuestos por diversos autores para la estructura de los Andes venezolanos fueron modelados, para determinar por medio del ajuste de los datos gravimétricos y

magnéticos cuál posee el mayor grado de correlación. Para ello se mantuvieron constantes las densidades asignadas a los cuerpos geológicos que componen los modelos ([Tabla 4](#)), así como la geometría en superficie de las formaciones aflorantes, realizándose modificaciones de la geometría estructural de los cuerpos de las cortezas superior e inferior, manto astenosférico y Placa Caribe.

MODELO SIMÉTRICO “FLOR POSITIVA”

Fueron generados perfiles con un orógeno con estructura de flor positiva simétrica ([Rod, 1956; González de Juana et al., 1980; Stephan, 1985](#)) y la corteza inferior del Bloque Maracaibo y la Placa Suramericana como una placa continua. El perfil Central ([Figura 7a](#)) mostro un grado de correlación de 95% para esta estructura con un gran ajuste entre las curvas de gravedad observada y calculada. Sin embargo, el perfil Sur ([Figura 7b](#)) mostro un desfase entre las curvas de gravedad calculada y observada de ~10 mGal a lo largo de todo el perfil y un grado de correlación menor para este tipo de estructura, de aproximadamente 90%.

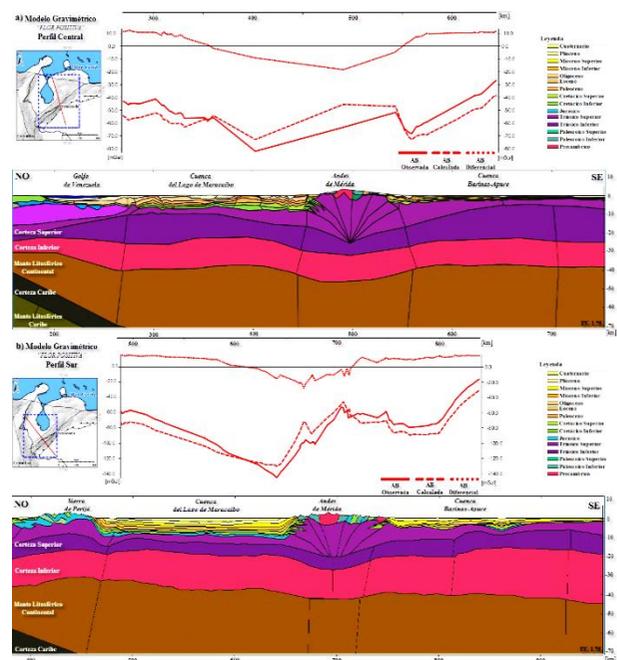


Figura 7. Modelo gravimétrico estructural simétrico “Flor positiva”. a) Perfil Central, b) Perfil Sur.

Este modelo cortical sugiere que los Andes se formaron como una estructura de flor positiva. Sin embargo, el crecimiento vertical de la cadena es ocasionado mediante el acortamiento por inversión de un Graben del Jurásico Superior de forma simétrica y por los movimientos transcurrentes a lo largo de la Falla de Boconó, viéndose delimitado por sistemas de fallas inversas en ambos flancos ([Taboada et al., 2000](#)). Los problemas de este modelo, según [Stephan, \(1982\), Colletta et al., \(1997\)](#) y

Audemard y Audemard (2002) es que los Andes de Mérida comenzaron a levantarse en el Mioceno, con un pulso orogénico en el Plioceno, mientras que la formación de la Falla de Boconó se estima que ocurrió a finales del Plioceno y principios del Pleistoceno (Tricart, 1962; Audemard, 1993). Además, el modelo de estructura de flor positiva no toma en cuenta la geometría de las estructuras a una profundidad mayor que la corteza superior.

MODELO SIMÉTRICO “SUBDUCCIÓN BAJO ANGULO”

Para la subducción de bajo ángulo (e.g. Audemard y Audemard, 2002; Duerto *et al.*, 2006) se modelaron perfiles con un orógeno con una estructura de flor positiva simétrica y la losa de subducción del Caribe con bajo ángulo desde el prisma de subducción en el Caribe bordeando la corteza inferior del bloque Maracaibo que flexiona en un ángulo de $\sim 45^\circ$ en el orógeno andino. En el perfil Central (Figura 8a), el ajuste gravimétrico fue de 50 % con un desfase de 80 mGal entre la curva de gravedad calculada y la observada a lo largo de todo el perfil. En el perfil Sur (Figura 8b), el grado de correlación bajó a 89%, mostrando solo un buen ajuste en la zona central del perfil, pero una gran diferencia de 50 mGal en la Cuenca Barinas-Apure y sobre toda la Cuenca del Lago de Maracaibo, ajustando hacia el NO solo en la Sierra de Perijá y la Cuenca Cesar-Rancherías.

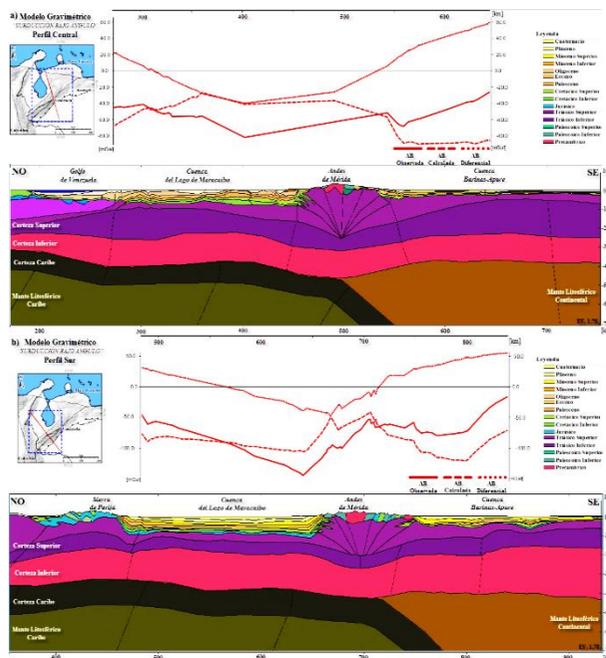


Figura 8. Modelo gravimétrico estructural simétrico con “Subducción Bajo Angulo”. a) Perfil Central, b) Perfil Sur.

Duerto *et al.*, (2006), Plantearon un modelo donde la placa oceánica del Caribe subduce por debajo del Bloque de Maracaibo basado en los trabajos de Van der Hilst y Mann,

(1994) y Pindell *et al.*, (2005), donde esta subducción de bajo ángulo se extiende desde la costa de Santa Marta hasta los Andes venezolanos, creando una amplia zona de cizallamiento entre la corteza superior y la corteza inferior, generando un levantamiento y acortamiento en la Placa de América del Sur. La orogénesis de los Andes venezolanos se relaciona con la inversión del sistema de fallas normales heredadas de la fase extensional del Jurásico tardío. Sin embargo, según Monod *et al.*, (2010) este modelo podría ser descartado debido a que la extensión del Bloque de la Placa Caribe que subduce hasta los Andes de Mérida no está respaldada por los estudios de sismicidad de la zona (Dewey, 1972; Pérez *et al.*, 1997), y no se explica el rol de las fallas de Boconó y Valera. Nosotros observamos que con respecto al Perfil Sur el modelo propuesto por Duerto *et al.*, (2006) mostró un grado de correlación bastante alto destacando que su perfil propuesto se encuentra ubicado cerca del perfil Sur; sin embargo, para el perfil Central que se encuentra a 200 km aproximadamente al norte este modelo muestra un nivel de correlación muy bajo.

MODELO ASIMÉTRICO “SUBDUCCIÓN CONTINENTAL SE”

El Modelo Asimétrico Subducción SE (e.g. Kellogg y Bonini, 1982; De Toni y Kellogg, 1993; Sánchez *et al.*, 1994; Colletta *et al.*, 1997), para los perfiles Central y Sur, se modeló con un orógeno con estructura de flor positiva asimétrica en la que el Bloque de Maracaibo subduce por debajo de la Placa Suramericana.

Algunos autores (Kellogg y Bonini, 1982; Colletta *et al.*, 1997) proponen la hipótesis de una subducción continental del Bloque de Maracaibo por debajo del Escudo de Guayana. El argumento principal para este modelo es el hundimiento del basamento en la Cuenca del Lago de Maracaibo, siendo más profundo comparado con la Cuenca Barinas-Apure. Para Audemard y Audemard, (2002) y Monod *et al.*, (2010), el problema principal de los modelos estudiados anteriormente es que dan la correcta importancia a la Falla de Boconó, la cual es una estructura de acomodo importante en el movimiento NE del Bloque de Maracaibo.

Se observó para el perfil Central (Figura 9a), que las curvas de gravedad observada y calculada muestran un desfase de aproximadamente 50 mGal a lo largo de la Cuenca Barinas-Apure. Para el orógeno andino y la Cuenca del Lago de Maracaibo el desfase se mantiene constante en 40 mGal hasta la zona del prisma de subducción donde la variación disminuye en aproximadamente 10 mGal.

En el perfil Sur (Figura 9b), las curvas de gravedad observada y calculada muestran un desfase de aproximadamente 10 mGal a lo largo de la Cuenca Barinas-Apure, la zona noroccidental de la Cuenca del Lago de Maracaibo y en el flanco sureste del orógeno andino, mostrando un mejor grado de correlación sobre los Andes de Mérida, el flanco Sureste de la sierra de Perijá y en la mitad de la Cuenca del Lago de

Maracaibo. Sobre el flanco noroccidental de la cadena andina se muestra un desfase de 20 mGal. Este perfil muestra un grado de correlación de 91%.

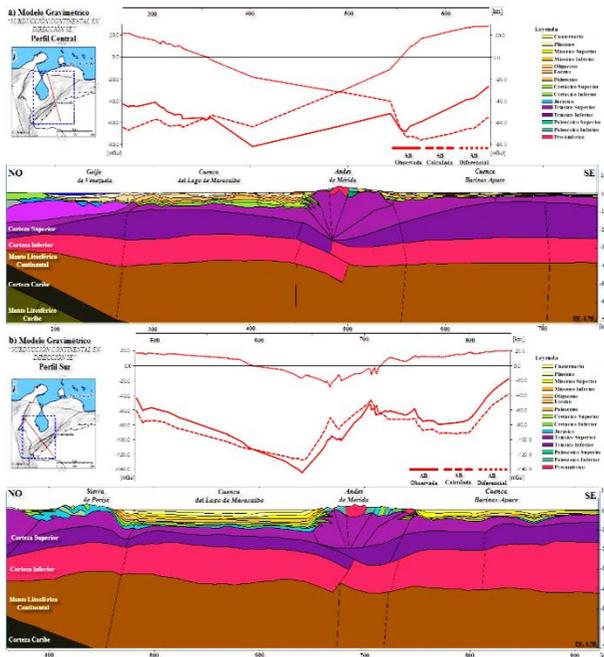


Figura 9. Modelo gravimétrico estructural asimétrico “Subducción continental en dirección SE”.
a) Perfil Central. b) Perfil Sur.

MODELO ASIMÉTRICO “SUBDUCCIÓN CONTINENTAL NO”

Los modelos gravimétricos fueron generados con una subducción continental en dirección NO (Audemard, 1991; Audemard y Audemard, 2002; Chacín *et al.*, 2005), con una estructura de flor positiva asimétrica y con estructura de ruptura cortical bajo el orógeno andino donde la Placa Suramericana subduce por debajo del Bloque Maracaibo. Chacín *et al.*, (2005), siguiendo el modelo base de Audemard, (1991) y mejorado posteriormente en Audemard y Audemard, (2002) considerando la tectónica activa y la sismicidad, proponen un modelo en el que la estructura de los Andes de Mérida resulta de una subducción incipiente en dirección NO, donde las cuencas del Lago de Maracaibo y de Barinas-Apure se formaron como cuencas de flexión debido a la carga producida por la cadena andina, siendo la Cuenca del Lago de Maracaibo más profunda debido a que sus dimensiones laterales son más pequeñas.

El perfil Central (Figura 10a) para este modelo mostro un desfase de 40 mGal para las Cuencas Barinas-Apure y del Lago de Maracaibo, el cual disminuyó progresivamente hasta alcanzar 25 mGal en la zona de los Andes de Mérida. A pesar de observarse bastante desfase entre las curvas de gravedad observada y calculada, las mismas poseen bastante similitud en su forma. El grado de correlación de este modelo es de 69%.

El perfil Sur (Figura 10b) mostro un desfase de 50 mGal para Las Cuencas Barinas-Apure y Maracaibo y disminuyo progresivamente hasta 25 mGal en la zona de los Andes de Mérida. Se observó desfase entre las curvas de gravedad observada y calculada, aunque hay bastante similitud en su forma. El grado de correlación de este modelo es de 74%.

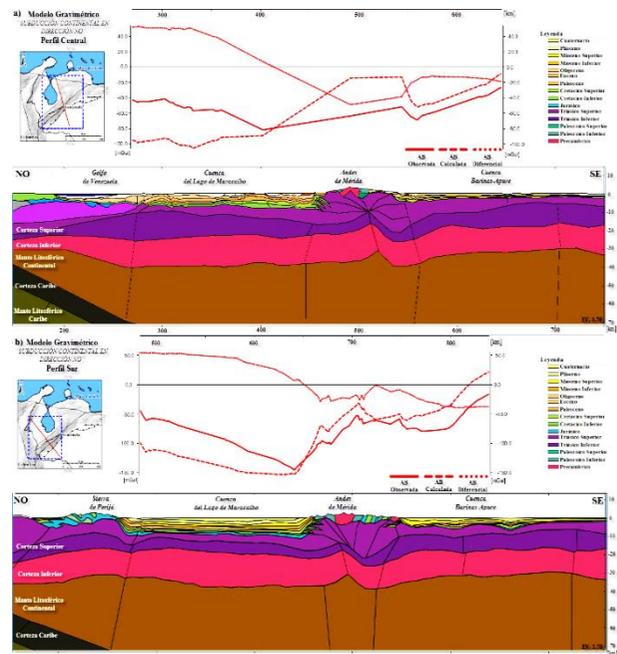


Figura 10. Modelo gravimétrico estructural asimétrico “Subducción continental en dirección NO”.
a) Perfil Central. b) Perfil Sur.

MODELOS GRAVIMÉTRICOS Y MAGNÉTICOS PROPUESTOS PARA LOS ANDES DE MÉRIDA

MODELO ASIMÉTRICO “ORÓGENO FLOTANTE”

Los modelos gravimétricos fueron generados como un orógeno flotante con una subducción continental en dirección NO (Audemard y Audemard, 2002). En general, el ajuste entre las curvas observadas y calculadas gravimétricas y magnéticas para los perfiles poseen un ajuste gravimétrico-magnético entre 96 y 98%.

PERFIL ANDES NORTE

El modelo del perfil Andes Norte (Figura 11d) muestra alta similitud para los valores de profundidad de discontinuidad de Mohorovicic del modelo con los resultados mostrados por Niu *et al.*, (2007). Se observa una disminución de la profundidad de la discontinuidad de Moho, debido al adelgazamiento cortical, causado por la presencia de un régimen distensivo sugerido por diversos autores (e.g. Audemard, 1995; Rodríguez y Sousa, 2003; Ramírez *et al.*, 2014; Flores *et al.*, 2015). En el extremo sur, en el área del alto de El Baúl, se determina una profundidad

para la discontinuidad de Moho de 40 km, como la observada por Guédez, (2003) y Bezada, (2005). La profundidad de discontinuidad de Conrad muestra una profundidad que oscila entre los 18 y 23 km. El tope de la corteza inferior tiene una profundidad de 22 km, y se logra estimar la profundidad para el tope de la corteza superior de 13,4 km empleando resultados del análisis espectral, mientras el basamento de la Cuenca de Falcón se encuentra a 5,4 km, las napas en el centro del perfil muestran una profundidad de basamento de ~9,6 km donde este último valor coincide con los trabajos de Baquero *et al.*, (2009) y Ramírez *et al.*, (2014), los cuales indican que la profundidad de basamento se ubica entre los 8 y 12 km. Por último, se observan espesores de sedimento de ~3,1 km de edad eocena-oligocena para esta zona. Las curvas de anomalía gravimétrica observada y calculada muestran un grado de correlación de ~97% con diferencias no mayores a los 5 mGal (Figura 11b). La Cuenca de Falcón muestra valores de AB en un rango comprendido entre -20 y -25 mGal el cual disminuye hasta -35 y -40 mGal para la zona comprendida entre las Napas de Lara y prolongación de la zona norte de los Andes de Mérida en la que se encuentra el Sistema de Fallas de Boconó. En el depocentro

de la Cuenca Barinas-Apure hay una lectura de -45 mGal. Luego hacia el SE los valores aumentan hasta ~25 mGal hacia el Alto del Baúl. Las curvas de anomalía magnética observada y calculada muestran un buen grado de correlación, excepto en los extremos, donde existen diferencias de ~10 nT, la cual se puede vincular a la alta variabilidad de los datos en la zona (Figura 11c).

En la Cuenca de Falcón ocurre un incremento significativo de las susceptibilidades magnéticas, marcado por la presencia de un máximo de anomalía magnética. Hacia el NO se observa que la susceptibilidad incrementa significativamente, debido al emplazamiento de rocas metavolcánicas en el cinturón de deformación del Caribe. Los Andes de Mérida muestran variaciones que se encuentran entre los 2 y 5 nT, mostrando valores mínimos de AM, donde la estructura en flor positiva muestra un buen ajuste, considerando un desplazamiento de la raíz andina, dando lugar a un exceso de masa bajo los Andes y el depocentro de la Cuenca del Lago de Maracaibo, razón por la cual las susceptibilidades magnéticas en esta zona disminuyen su valor. Sin embargo, en la misma no se observa presencia de raíz cortical, por lo que se infiere que su estructura cortical se encuentra fuera del dominio andino.

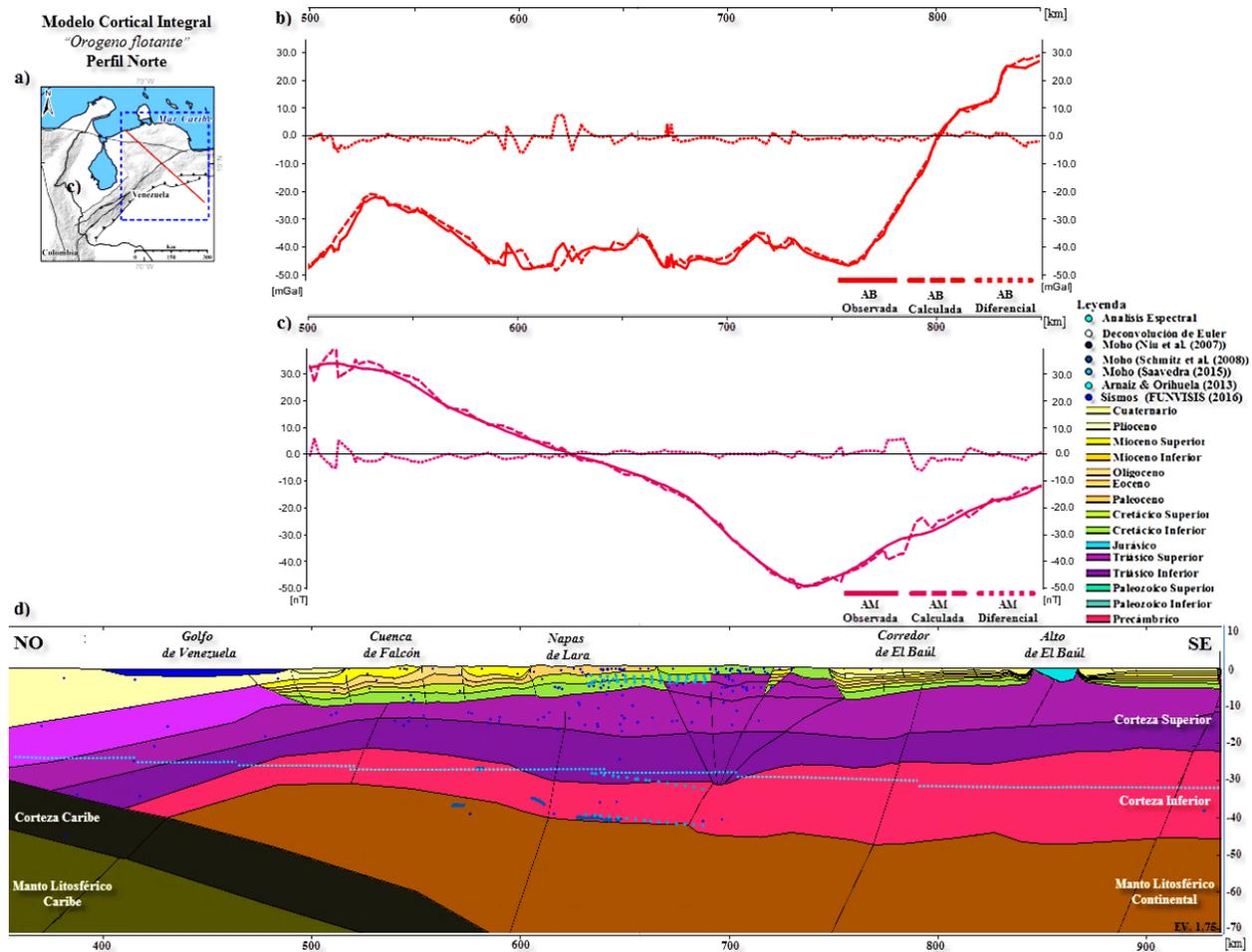


Figura 11. Modelo cortical Perfil Norte. a) Ubicación Relativa del perfil. b) Curva de anomalía de Bouguer (AB). c) Curva de anomalía Magnética (AM). d) Modelo cortical integral.

La Cuenca Barinas-Apure, muestra susceptibilidades que disminuyen en dirección NO, desde 0,004 hasta 0,001 SI. Este decrecimiento se puede atribuir a la carga sedimentaria de los Andes de Mérida. Los cuerpos en el área del Alto de El Baúl muestran susceptibilidades de $\sim 0,000033$ SI, valor que confirma los resultados obtenidos por Arraiz, (2008).

PERFIL ANDES CENTRAL

En el modelo del perfil Andes Central (Figura 12d), se observa un alto grado de correlación en la Cuenca del Lago de Maracaibo entre la profundidad del Moho modelado a partir de funciones receptoras de Niu *et al.*, (2007) con una diferencia que no excede los 5 km. También se usaron los resultados obtenidos a partir de la sísmica de gran ángulo de Schmitz *et al.*, (2008) para determinar las interfaces de la discontinuidad de Moho y Conrad. El análisis espectral para la discontinuidad de Conrad mostró un alto grado de correlación con la capa modelada para el depocentro de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Los principales topes de las secuencias sedimentarias fueron controladas con secciones

interpretadas de líneas sísmicas de Mann *et al.*, (2006), y los topes de los mapas de Requena y Zambrano, (2008). Los Andes de Mérida fueron modelados con una subducción suave e incipiente buzante hacia el NO y un orógeno flotante (Audemard y Audemard, 2002). Los máximos gravimétricos de esta zona se relacionaron con la presencia de rocas intrusivas y rocas del Proterozoico (Complejo Iglesias) que presentan un contraste de densidad fuerte respecto a la base de los Andes. Hacia el Flanco NO de la cadena se observa la presencia de un mínimo gravimétrico de -150 mGal (Figura 12b).

Hacia la Cuenca Barinas-Apure los valores de AB aumentan gradualmente hasta ~ 10 mGal, la profundidad del Moho fue modelada tomando en cuenta el estudio de Niu *et al.*, (2007). Existe una diferencia en la profundidad del Moho entre ambas cuencas flexurales, la cual se incrementa en la cuenca de Maracaibo y muestra una mayor profundidad que en la Cuenca Barinas-Apure. La morfología de la Cuenca se construyó de acuerdo al trabajo de Parnaud *et al.*, (1995). Las profundidades obtenidas a partir del espectro de frecuencia no reportaron una respuesta coherente de las interfaces importantes en esta región.

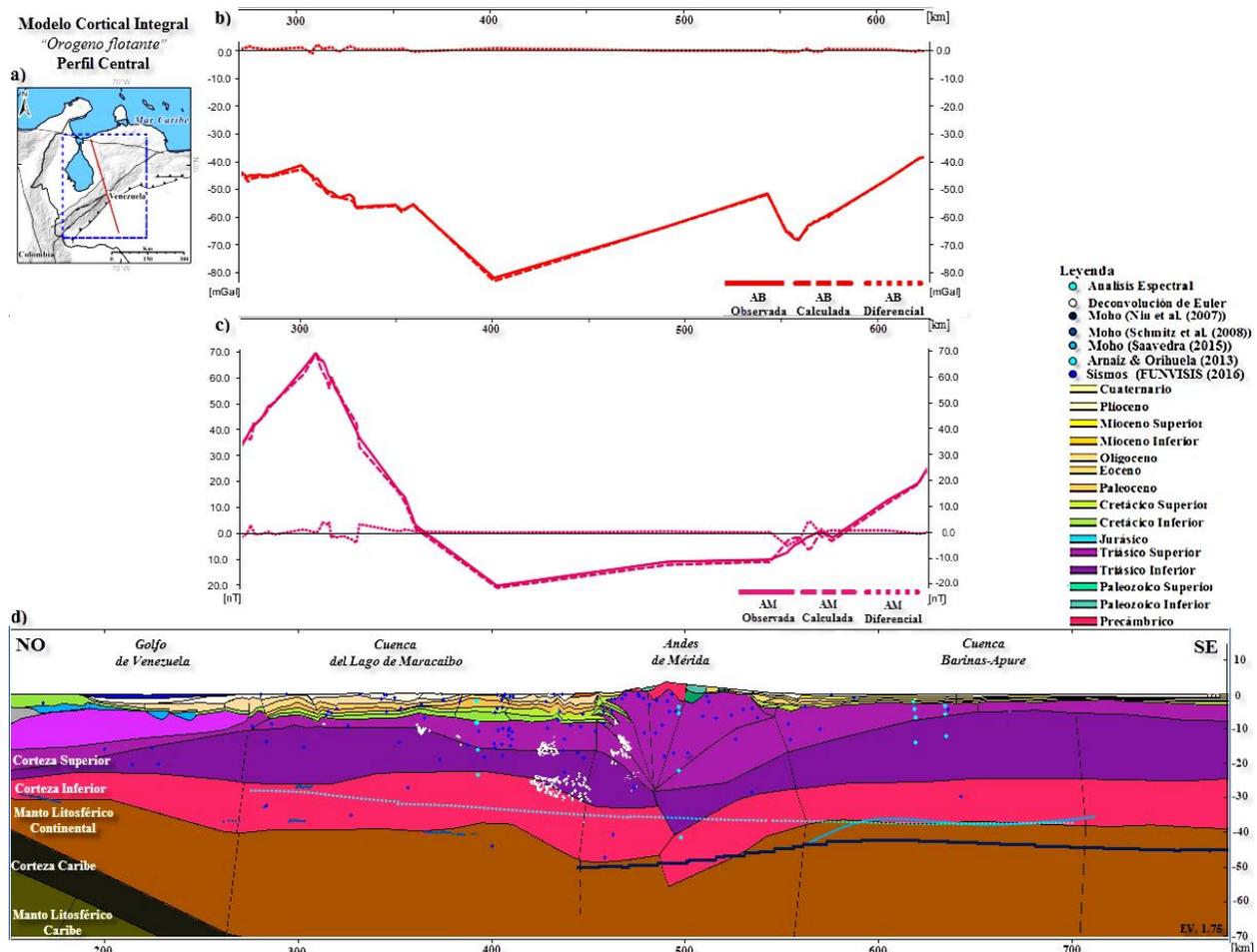


Figura 12. Modelo cortical Perfil Central. a) Ubicación Relativa del perfil. b) Curva de anomalía de Bouguer (AB). c) Curva de anomalía Magnética (AM). d) Modelo cortical integral.

Sin embargo, la profundidad estimada para las fuentes profundas puede ser asociada al contraste de densidades dentro de la corteza superior y para las fuentes más superficiales con la base depositacional de esta Cuenca. Dichas unidades depositacionales fueron modeladas de acuerdo a la edad en que los sedimentos fueron depositados y su profundidad controlada con el mapa de topes de [Santiago et al., \(2014\)](#). En el modelo cortical (Figura 12d), se observa que la profundidad del punto de Curie y la discontinuidad corteza-manto en la Cuenca del Lago de Maracaibo poseen un alto grado de correlación. La zona de la Cuenca del Lago de Maracaibo tiene altos valores de susceptibilidad magnética (~80 nT) asociados a los sedimentos depositados desde el periodo Jurásico. Los Andes de Mérida muestran una mayor separación entre la profundidad del punto de Curie y el modelo final. En la Cuenca Barinas-Apure se observa una pequeña diferencia entre la profundidad del punto de Curie y la discontinuidad corteza-manto. Por último, se observan anomalías magnéticas decrecientes hacia los Andes de Mérida en la curva de AM (Figura 12c).

PERFIL ANDES SUR

A nivel estructural el modelo gravimétrico Andes Sur (Figura 13d) muestra una subducción tipo B de la Placa Caribe por debajo del Bloque Maracaibo y la Placa Suramericana en dirección NO en subducción continental, con un buzamiento de ~25°.

El Bloque Maracaibo está limitado al NO por una subducción tipo B con la Placa Caribe y al SE por una subducción tipo A con la Placa Suramericana la cual a su vez subduce bajo el Bloque Maracaibo por ser más densa. La discontinuidad de Mohorovičić para la Placa Suramericana se encuentra a una profundidad que varía entre 40 a 45 km a lo largo del perfil en dirección NO, mientras en la subducción tipo A en el orógeno de los Andes, se encuentra a ~50 km y en el Bloque Maracaibo el límite varía de 35 a 40 km a lo largo del perfil en dirección NO. La discontinuidad de Conrad para la Placa Suramericana se encuentra a una profundidad de ~22 km, en los Andes se encuentra a 30 km y en el Bloque Maracaibo a ~18 km.

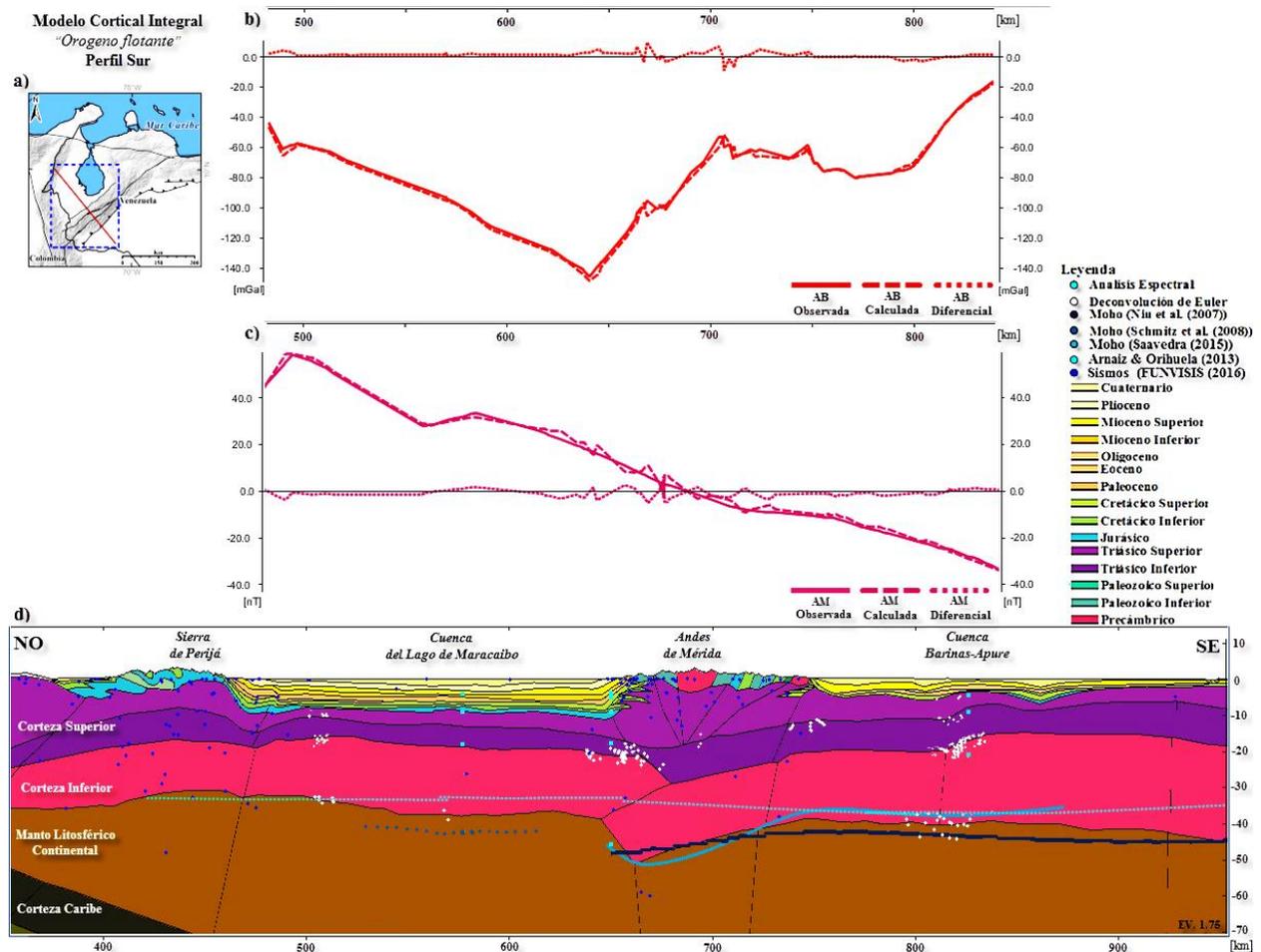


Figura 13. Modelo cortical Perfil Sur. a) Ubicación Relativa del perfil. b) Curva de anomalía de Bouguer (AB). c) Curva de anomalía Magnética (AM). d) Modelo cortical integral.

Existe un alto grado de correlación entre el Moho modelado con los estudios de [Niu et al., \(2007\)](#) y [Saavedra, \(2015\)](#). Además, actúa como la principal superficie de despegue en la que la corteza superior del Bloque de Maracaibo posee un retrocorrimiento cortical más pronunciado hacia el NO, producto de la carga del Bloque Maracaibo en la que los Andes de Mérida funcionan como una cuña de apilamiento de corteza frágil.

Los Andes de Mérida se presentan como una cadena asimétrica con estructura de flor positiva, cuya raíz del orógeno desplazado hacia el NO puede ser vinculada al mínimo gravimétrico (~150 mGal) ([Figura 13b](#)) presente. La Sierra de Perijá se presenta como un pliegue tipo anticlinal asociado a la propagación de la falla principal. El basamento de la Cuenca del Lago de Maracaibo es más profundo (~10 km) que el de la Cuenca Barinas-Apure (~5 km); quizás debido a que el Bloque posee un espesor elástico ([Arnaiz-Rodríguez et al., 2011](#)) considerablemente menor al de la Placa Suramericana.

Las zonas de la Cuenca Barinas-Apure, la Cuenca del Lago de Maracaibo, flanco sur de los Andes de Mérida y flanco sur de la Sierra de Perijá, poseen un buen ajuste entre la curva de gravedad observada y calculada con diferencias de ~5 mGal; este ajuste decae en un rango de 5-10 mGal sobre el flanco sur de los Andes de Mérida, vinculado a la actividad tectónica y estructural de la zona debido a la cercanía a La Falla de Boconó ([Figura 13b](#)), el desplazamiento de la raíz cortical del orógeno andino o por ser la zona retrocorrimiento cortical más pronunciado hacia el noroeste, producto de la carga de los Andes de Mérida sobre la Cuenca de Maracaibo.

Realizando un análisis del comportamiento de la curva de AM ([Figura 13c](#)), se observa un buen ajuste entre la profundidad del punto de Curie y la discontinuidad corteza-manto, pero se observan discrepancias en el extremo NO y en los Andes de Mérida, pudiendo ser atribuidas a errores de interpolación por ausencia de datos en la zona o heterogeneidades no incluidas en el modelo. Desde el flanco SE de la cadena hasta la Cuenca del Lago de Maracaibo, el modelo indica un buen ajuste entre las curvas de susceptibilidad observada y calculada. Los sedimentos muestran anomalías crecientes hacia los Andes de Mérida.

PERFIL BURRO NEGRO

En el modelo gravimétrico Burro Negro ([Figura 14d](#)) se puede observar la profundidad de discontinuidad de Moho en un rango que varía entre 20 y 35 km profundizando hacia el SO. Se observa una alta deformación tectónica en la Cuenca de Falcón. Esta cuenca fue modelada como una cuenca extensional asociada a transcurrencia, con presencia de grandes espesores de sedimentos del Eoceno

tardío al Oligoceno. Las Napas de Lara se ubican entre 5 y 8 km de profundidad que suprayacen sedimentos de edad cretácica y su corteza inferior posee un espesor de 5 km. La Cuenca del Lago de Maracaibo alcanza ~10 km de profundidad fue modelada como una cuenca extensional asociada a transcurrencia con presencia de grandes espesores de sedimentos de edad Eoceno tardío al Oligoceno. La falla de Burro Negro fue modelada como una falla normal de basamento de alto ángulo con buzamiento subvertical, reactivada como una falla transcurrente del tipo lateral-dextral, que alcanza una profundidad de ~10 km. El ajuste del modelo posee un grado de correlación de aproximadamente 98%, mostrando valores altos de AB hacia la Cuenca de Bonaire y decreciendo hacia la Serranía de Perijá ([Figura 14b](#)).

Analizando el comportamiento de la curva de AM en el perfil Burro Negro ([Figura 14c](#)) en el modelo cortical se puede observar que la Cuenca de Bonaire muestra amplia deformación, debido a los estilos transpresionales y transtensionales que ocurrieron en la zona de megasutura Caribe-Suramérica. En esta zona se encuentra el máximo punto de AM con un valor de ~175 nT, respuesta generada por la cadena insular y el prisma de acreción que están caracterizados por la presencia de rocas ígneas y máficas que se encuentran directamente sobre la Placa Caribe, generando un gradiente de susceptibilidad magnética que va de 0,016 a 0,031 SI.

En la Cuenca de Falcón, las susceptibilidades magnéticas presentan un incremento lateral que se evidencia con facilidad en el adelgazamiento cortical en la zona central de dicha cuenca. Estos valores de susceptibilidad son atribuidos a la forma estructural de la misma, el tectonismo que ha sufrido y las formaciones que presenta, como terrenos alóctonos que forman parte del basamento y a la presencia de rocas volcánicas. Las susceptibilidades magnéticas se encuentran en el rango de 0,006 a 0,014 SI en el basamento y de 0,008 a 0,025 SI en la corteza superior, además de presentar espesores de sedimentos, basamento y corteza similares.

En la sección de la Cuenca del Lago de Maracaibo puede observarse la Falla Burro Negro en la zona donde se encuentra el mínimo de anomalía magnética del perfil con un valor aproximado de 25 nT. Esta falla constituye un límite paleogeográfico relevante de la plataforma de Maracaibo las Montañas de Trujillo y Napas de Lara, separando áreas con estructuras y estratigrafía muy diferentes, como consecuencia se presenta un gradiente de susceptibilidad magnética que va disminuyendo hacia el NE. En la Sierra de Perijá, existe una anomalía vinculada a formaciones aflorantes del Mioceno sobre sedimentos de edad cretácica que presenta una susceptibilidad de 0,0002 SI en la estructura en flor positiva que se presenta en esta área.

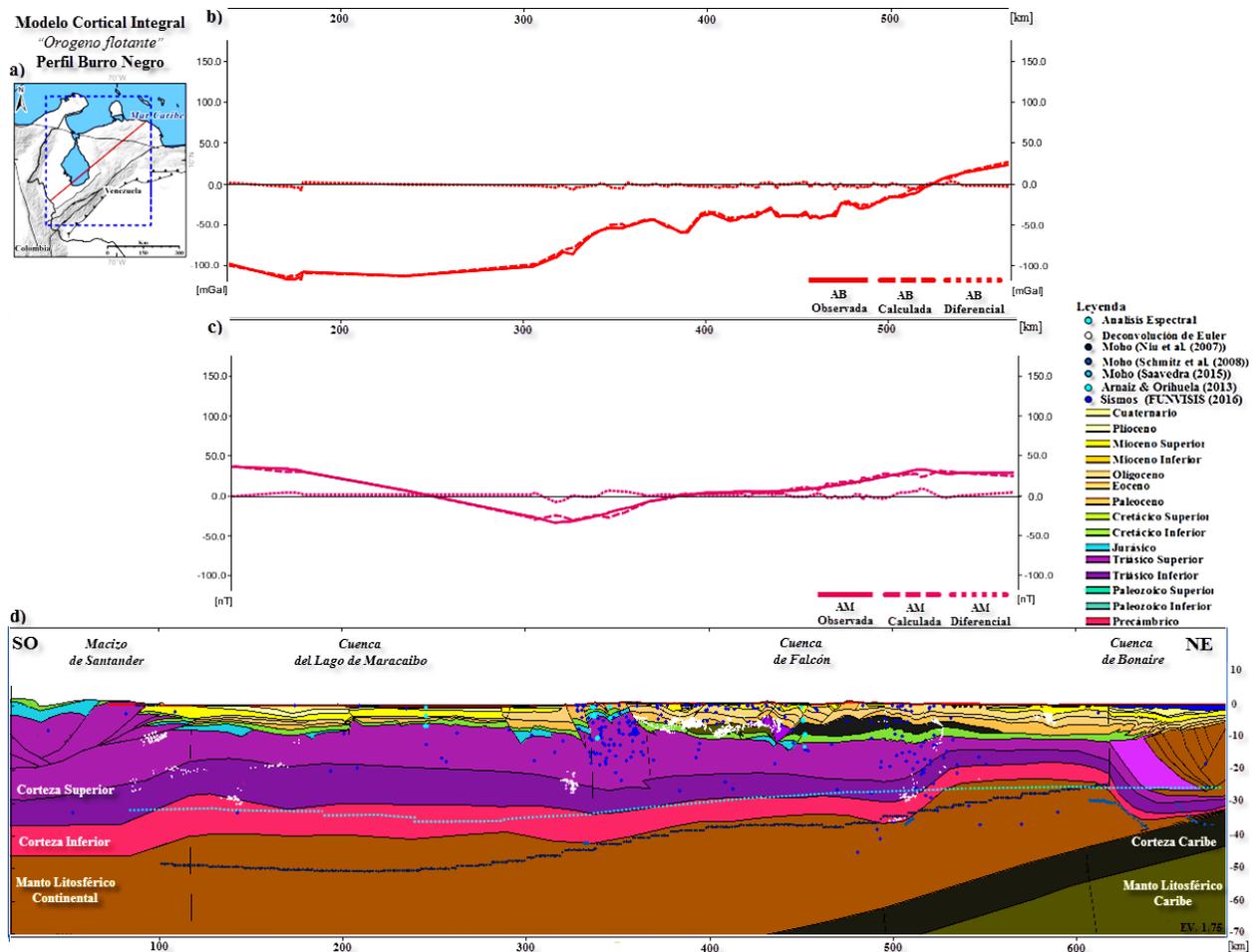


Figura 14. Modelo cortical Perfil Burro Negro. a) Ubicación Relativa del perfil. b) Curva de anomalía de Bouguer (AB). c) Curva de anomalía Magnética (AM). d) Modelo cortical integral.

CONCLUSIONES

Los modelos corticales sugieren que el modelo que mejor describe la estructura de los Andes de Mérida es el orógeno flotante (Audemard y Audemard, 2002). Los modelos muestran el Bloque Maracaibo limitado al NO por una subducción tipo B con la Placa Caribe y al SE por una subducción continental (tipo A) con la Placa Suramericana, la cual a su vez subduce incipientemente bajo el Bloque Maracaibo por ser más densa. La discontinuidad de Conrad actúa como la principal superficie de despegue, en la que la corteza superior del Bloque de Maracaibo posee un retrocorrimento cortical más pronunciado hacia el NO, producto de la carga del Bloque Maracaibo en la que los Andes de Mérida son un orógeno asimétrico que posee una estructura de flor positiva que funciona como una cuña de apilamiento de corteza frágil y cuya raíz cortical se encuentra desplazada hacia el NO.

El comportamiento de las curvas de AB y de AM de los modelos corticales sugiere que existe compensación regional, en la cual la flexión de la Placa Suramericana es producida por la carga orogénica de los Andes de Mérida y de la Cuenca

Barinas-Apure, mientras que la flexión del Bloque Maracaibo es producida por la gran carga sedimentaria que soporta.

El modelo del perfil Burro Negro confirma las observaciones de la teoría del adelgazamiento de la Cuenca de Falcón, ya que describe mejor la respuesta gravimétrico-magnético de la zona. La corteza inferior posee un espesor de 5 km y la profundidad de la discontinuidad de Moho aumenta de 20-25 km en la Cuenca de Bonaire hacia la Serranía de Perijá donde alcanza 35 km.

La profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic es mayor en la Placa Suramericana. La misma se encuentra a una profundidad que varía de 40 a 47 km a lo largo de los perfiles Central y Sur en sentido SE-NO, con respecto al Bloque Maracaibo donde el límite varía de 35 a 40 km en dirección NO, sugiriendo que es mayor en la Placa Suramericana. La profundidad de la discontinuidad de Conrad es mayor en la Placa Suramericana (22 km) con respecto al Bloque Maracaibo (18 km). La profundidad máxima del basamento de la Cuenca del Lago de Maracaibo es de ~10 km y la profundidad de basamento de la Cuenca Barinas-Apure es de ~5 km.

El modelo cortical del perfil Andes Norte no muestra presencia de raíz cortical, y posee una estructura más simple que los perfiles Central y Sur, por lo cual se infiere que se encuentra fuera del dominio andino y que la configuración tectónica en las regiones central y sur de los Andes de Mérida es más compleja que en la región norte. Esto se observa en los afloramientos de unidades geológicas de edad Precámbrico, Paleozoico y Jurásico sobre las regiones central y sur y no en la región norte, donde las unidades que afloran son del Cretácico y más jóvenes.

Según lo observado en los modelos corticales de los perfiles Andes Central y Andes Sur, la raíz andina, varía entre 45 y 53 km de profundidad y se encuentra desplazada ~30 km hacia el NO respecto a la expresión topográfica del orógeno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al FONACIT por el aporte al proyecto Geociencia Integral de los Andes de Mérida (Proyecto GIAME) (FONACIT 2012002202) y al Convenio específico PDVSA – FUNVISIS (12/09/2012).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNAIZ-RODRÍGUEZ, M. S., I. RODRÍGUEZ y F. AUDEMARD (2011). "Análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 28(3): 420-438.
- ARNAIZ, M. S. y N. ORIHUELA (2013). "Curie point depth in Venezuela and the Eastern Caribbean." *Tectonophysics* 590: 38-51.
- ARRAIZ, D. (2008). *Interpretación integrada del macizo ígneometamórfico de la región de El Baúl, estado Cojedes*, Universidad Central de Venezuela
- AUDEMARD, F. A. (1993). "Néotectonique, Sismotectonique et Alea Sismique du Nord-ouest du Venezuela (Système de failles de Oca-Ancon)." 369.
- AUDEMARD, F. A. (1995). *La Cuenca Terciaria de Falcón, Venezuela Noroccidental: Síntesis Estratigráfica, Génesis e Inversión Tectónica*. IX Congreso Latinoamericano de Geología, Caracas, Venezuela.
- AUDEMARD, F. A., M. MACHETTE, J. COX, R. DART y K. HALLE (2000). "Map and database of quaternary faults and folds in Venezuela and its offshore regions. Include map at scale 1:2,000,000 and 78-page report", *US Geological Survey*.
- AUDEMARD, F. A., M. MACHETTE, J. COX, R. DART y K. HALLER (2000). "Map and database of quaternary faults and folds in Venezuela and its offshore regions." *USGS Open-File report 00-0018*.
- AUDEMARD, F. E. (1991). "Tectonics of Western Venezuela" PhD, Rice University, 245
- AUDEMARD, F. E. y F. A. AUDEMARD (2002). "Structure of the Mérida Andes, Venezuela; relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction." *Tectonophysics* 345(1-4): 299-327.
- ÁVILA, J., M. SCHMITZ y J. SÁNCHEZ-ROJAS (2017). "Modelado sintético de perfiles sísmicos de gran ángulo para estudios de cobertura de interfases usando fuentes sísmicas". *XI CONVESIS*. Caracas, Venezuela: 12.
- BAQUERO, M., J. ACOSTA, E. KAASSABJI, J. ZAMORA, J. SOUSA y J. RODRÍGUEZ (2009). "Polyphase development of the Falcón Basin in northwestern Venezuela: implications for oil generation." *Geological Society of America* 328(1): 587-612.
- BERMÚDEZ, M. A. (2009). "Cenozoic exhumation patterns across the Venezuelan Andes: insights from fission-track thermochronology" Doctoral, Université Joseph Fourier. 314
- BEZADA, M. (2005). "Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe-Suramérica, Región Central de Venezuela (Edo. Falcón y Lara)", Universidad Simón Bolívar
- BEZADA, M. J., M. B. MAGNANI, C. A. ZELT, M. SCHMITZ y A. LEVANDER (2010). "The Caribbean-South American plate boundary at 65°W: Results from wide-angle seismic data." *J. Geophys. Res.* 115(B8): B08402.
- BEZADA, M. J., M. SCHMITZ, M. I. JÁCOME, J. RODRÍGUEZ, F. AUDEMARD y C. IZARRA (2008). "Crustal structure in the Falcón Basin area, northwestern Venezuela, from seismic and gravimetric evidence." *Journal of Geodynamics* 45(4-5): 191-200.
- BUCHER, W. H. (1952). "Geologic structure and orogenic history of Venezuela." *Geol. Soc. Amer. Mem.* 49: 113.
- CAMPOS, J. R. (2014). "Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos y magnéticos sobre un perfil localizado entre mene De Mauroa y Palmarito", Universidad Central de Venezuela. 99
- CEDEÑO, L. (2011). "Modelado Gravimétrico 2D de un perfil en la región noroccidental de Suramérica específicamente en el bloque Norandino", Universidad Simón Bolívar
- CEDIEL, F., R. P. SHAW y C. & CCERES (2003). "Tectonic assembly of the Northern Andean block. Tectonics." *Tectonics Memoir* 79: 815– 848.
- COLMENARES, L. y M. D. ZOBACK (2003). "Stress field and seismotectonics of northern South America." *Geology* 31(8): 721-724.
- COLLETTA, B., F. ROURE, B. DE TONI, D. LOUREIRO, H. PASSALACQUA y Y. GOU (1997). "Tectonic inheritance, crustal architecture, and contrasting structural styles in the Venezuela Andes." *Tectonics* 16(5): 777-794.
- CORTÉS, M. y J. ANGELIER (2005). "Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes." *Tectonophysics* 403: 29–58.
- CORTÉS, M. y J. ANGELIER (2005). "Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes." *Tectonophysics* 403: 29–58.
- CHACÍN, L., M. I. JÁCOME y C. IZARRA (2005). "Flexural and gravity modelling of the Mérida Andes and Barinas-Apure Basin, Western Venezuela." *Tectonophysics* 405(1-4): 155-167.
- CHICANGANA, G., A. KAMMER y V. JIMÉNEZ. (2011). "El posible origen de la sismicidad somera que se presenta en la región que corresponde a la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía de Perijá y la Península de La Guajira, noreste de Colombia. ." from www.capvca.com.co
- DE TONI, B. y J. KELLOGG (1993). "Seismic evidence for blind thrusting of the northwestern flank of the Venezuelan Andes." *Tectonics* 12(6): 1393–1409.
- DEWEY, J. (1972). "Seismicity and tectonics of western Venezuela." *Bulletin of the Seismological Society of America* 62(6): 1711 - 1751.

- DUERTO, ESCALONA A y M. P (2006). "Deep structure of the Mérida Andes and Sierra de Perijá mountain fronts, Maracaibo Basin, Venezuela." *AAPG Bull.* 90(4): 505–528.
- DUERTO, L. (1998). "*Principales zonas triangulares del occidente de Venezuela*". M.Sc., Universidad Central de Venezuela. 176 p
- ESCOBAR y RODRÍGUEZ (1995). "Interpretación geofísica integrada de un transecto NW-SE a través de Los Andes venezolanos." *I Latinoamerican Geophysical Congress*. Rio de Janeiro, Brazil: 273-276.
- FLORES, L., M. SCHMITZ y J. ÁVILA (2015). "Análisis de la estructura cortical del perfil de sísmica de gran ángulo "Andes Norte", segmento Capatariá-Cabudare". *Memorias del X Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*. FUNVISIS. Cumana, Venezuela: 9.
- FOLINSBEE, R. A. (1972). "*The gravity field and plate boundaries in Venezuela*". PhD, Mass. Inst. of Technology-Woods Hole Oceanog. Inst. 160
- GIL, D. (2014). "*Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos en la región de los llanos centro occidentales*", Universidad Central de Venezuela. 121
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., J. ITURRALDE y X. PICARD (1980). "*Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*". Caracas, *Ediciones Foninves*.
- GONZÁLEZ, J. M. y F. J. MARTINEZ (2008). "*Estudio geofísico integrado en la región de Siquisique, norte del estado Lara*". Universidad Central de Venezuela. 188
- GONZÁLEZ, W. G. (2009). "*Interpretación del Basamento PreCretácico en las Cuencas Barinas-Apure y Oriental de Venezuela*", Universidad Simón Bolívar. 199
- GÖTZE, H. J. (1978). "Ein numerisches Verfahren zur Berechnung der gravimetrischen Feldgrößen dreidimensionaler Modellkörper." *Meteorology and Atmospheric Physics* 27(2): 195-215.
- GÖTZE, H. J. y B. LAHMEYER (1988). "Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics." *Geophysics* 53(8): 1096-1108.
- GUÉDEZ, R. (2003). "*Estudio cortical en el área centro-norte y noroccidental de Venezuela a partir de datos de sísmica de refracción*". B.Sc. Bsc, Universidad Central de Venezuela. 124
- HACKLEY, P. C., F. URBANI, A. W. KARLSEN y C. P. GARRITY (2006). "Mapa geológico de Venezuela a escala 1:750,000: U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1109", *U.S. Geological Survey*.
- HENRIQUES, L. (2004). "*Modelado geodinámico integrado de la Cuenca Barinas-Apure y los Andes de Mérida, Edo. Barinas*". B.Sc., Universidad Simón Bolívar
- HERMOSO, O. Y. (2015). "*Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos en la región Occidental de Venezuela*", Universidad Central de Venezuela. 103
- HILST, R. v. D. y P. MANN (1994). "Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America." *Geology* 22(5): 451-454.
- HOSPERS, J. y J. C. VAN WINEN (1958). "ROCK DENSITIES OF THE CENTRAL VENEZUELAN ANDES." *Geological Society of America Bulletin* 69(3): 359-362.
- INTEVEP, P. (2011). "*Lexico Estadístico de Venezuela*." from <http://www.pdv.com/lexico/>.
- JARVIS, A., H. I. REUTER, A. NELSON y E. GUEVARA (2008). "Hole-filled seamless SRTM data V4". <http://srtm.csi.cgiar.org>. *International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)*.
- JASPE, J. A. (2004). "*Generación de modelos de basamento de los arcos de Arauca y Mérida en la cuenca Barinas-Apure a través de integración de datos geofísicos*", Universidad Central de Venezuela. 112
- KELLOGG, J. N. y W. E. BONINI (1982). "Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South American plate." *Tectonics* 1(3): 251-276.
- KOHN, B. P., R. SHAGAM, P. O. BANKS y L. A. BURKLEY (1984). "Mesozoic-Pleistocene fission-track ages on rocks of the Venezuelan Andes and their tectonic implications". *The Caribbean South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. W. E. Bonini, R. B. Hargraves y R. Shagam, *Geological Society of America Memoir*. 162: 365-384.
- LINARES, F., N. ORIHUELA, A. GARCÍA y F. AUDEMARD (2014). "Generación del mapa de basamento de la cuenca de Falcón, a partir de datos gravimétricos y magnéticos satelitales." *Geociencias Aplicadas Latinoamericanas* 1: 9-19.
- LUGO, M., A. SINGER, C. BELTRÁN, J. RODRÍGUEZ, C. CHACÍN, E. PÁEZ y C. RIVERO (1994). "Estudio neotectónico y de geología de fallas activas de la región nororiental de Venezuela. Proyecto INTEVEP 92-175", *FUNVISIS*: 258.
- LUGO, M., J. P. SOULAS, C. GIRALDO y D. BONNOT (1987). "Actividad cuaternaria y características sismogénicas de las fallas de Boconó, San Simón y Piedemonte Occidental Andino y efectos geológicos asociados a la sismicidad", *FUNVISIS*: 80.
- MALAVÉ, G. y G. SUÁREZ (1995). "Intermediate-depth seismicity in northern Colombia and western Venezuela and its relationship to Caribbean plate subduction." *Tectonics* 14: 617-628.
- MANN, P., A. ESCALONA y M. V. CASTILLO (2006). "Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela." *AAPG Bulletin* 99(4): 445-477.
- MARTINEZ, Y. S. (2012). "*Caracterización geológica mediante la integración de información geofísica del sector Mantecal-La Estacada, Estado Apure*", Universidad Central de Venezuela. 142
- MASY, J., SCHMITZ, J. ÁVILA y M. I. JÁCOME (2007). "Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe Suramérica en las Antillas de Sotavento". *IX Congreso Geológico Venezolano*. Caracas.
- MAUS, S., U. BARCKHAUSEN, H. BERKENBOSCH, N. BOURNAS, J. BROZENA, V. CHILDERS, F. DOSTALER, J. D. FAIRHEAD, C. FINN, R. R. B. VON FRESE, C. GAINA, S. GOLYNSKY, R. KUCKS, H. LÜHR, P. MILLIGAN, S. MOGREN, R. D. MÜLLER, O. OLESEN, M. PILKINGTON, R. SALTUS, B. SCHRECKENBERGER, E. THÉBAULT y F. CARATORI TONTINI (2009). "EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements." *Geochem. Geophys. Geosyst.* 10(8): Q08005.
- MAZUERA-RICO, F., M. SCHMITZ, A. ESCALONA, A. LEVANDER y C. ZELT (2018). "Lithospheric structure beneath northwestern Venezuela from deep seismic profiling". *Seismology of the Americas, joint conference of the Latin American and Caribbean Seismological Commission (LACSC) and the Seismological Society of America (SSA)*. Miami, USA.

- MEDINA, P. (2017). "Modelado bidimensional de la corteza de los Andes de Mérida en el perfil de reflexión Andes Sur, a partir de sísmica de refracción profunda." Tesis de maestría, Universidad Central de Venezuela.141
- MONOD, B., D. DHONT y Y. HERVOUËT (2010). "Orogenic float of the Venezuelan Andes." *Tectonophysics* 490: 123–135.
- MORITZ, H. (1980). "Geodetic Reference System 1980." *Bulletin Géodésique* 54: 395±405.
- NAFE, J. E. y C. L. DRAKE (1963). "Physical properties of marine sediments". *The Sea*. M. N. Hill. New York, *Interscience*. 3: 794-815.
- NIU, F., T. BRAVO, G. PAVLIS, F. VERNON, H. RENDON, M. BEZADA y A. LEVANDER (2007). "Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela." *J Geophys Res* 112(112): 1-15.
- NÚÑEZ, D. (2005). "Modelado gravimétrico y magnético de un perfil Oeste – Este a lo largo del paralelo 9°N en la cuenca Barinas-Apure". B.Sc., Universidad Simón Bolívar
- PARNAUD, F., Y. GOU, M. PASCUAL, I. TRUKOWSKI y H. PASSALACQUA (1995). "Stratigraphic synthesis of western Venezuela. Petroleum basins of South America", *AAPG*. 62: 681-698.
- PAVLIS, N. K., S. A. HOLMES, S. C. KENYON y J. K. FACTOR (2008). "An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008". 2008 General Assembly of the European Geosciences Union. Vienna, Austria, April 2008: 13-18.
- PENNINGTON, W. D. (1981). "Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonics of Northwestern South America." *J Geophys Res* 86.
- PÉREZ, K. M. (2014). "Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos del perfil guasdualito, edo. Apure–encontrados, edo. Zulia, región Sur Andina.", Universidad Central de Venezuela.118
- PEREZ, O. J. y Y. P. AGGARWAL (1981). "Present-day tectonics of the southeastern Caribbean and northeastern Venezuela." *Journal of Geophysical Research* 86(B11): 10791-10804.
- PÉREZ, O. J., R. BILHAM, R. BENDICK, J. R. VELANDIA, N. HERNÁNDEZ, C. MONCAYO, M. HOYER y M. KOZUCH (2001). "Velocity field across the Southern Caribbean Plate Boundary and estimates of Caribbean/South American Plate Motion using GPS Geodesy 1994-2000." *Geophys. Res. Lett.* 28(15): 2987-2990.
- PÉREZ, O. J., C. SANZ y G. LAGOS (1997). "Microseismicity, tectonics and seismic potential in southern Caribbean and northern Venezuela." *Journal of Seismology* 1(1): 15-28.
- PÉREZ, O. J., S. G. WESNOUSKY, R. DE LA ROSA, J. MÁRQUEZ, R. UZCATEGUI, C. QUINTERO, L. LIBERAL, H. MORA-PAEZ y W. SZELIGA (2018). "On the interaction of the North Andes plate with the Caribbean and South American plates in northwestern South America from GPS geodesy and seismic data." *Geophysical Journal International* 214(3): 1986–2001.
- PINDELL, J. L., L. KENNAN, W. V. MARESCH, K.-P. STANEK, G. DRAPER y R. HIGGS (2005). "Plate kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in proto-Caribbean margins". Caribbean-South American plate interactions, Venezuela, GSA Special Paper 394. H. G. A. L. a. V. B. Sisson. Boulder, CO, *Geological Society of America*: 7-52.
- PINTO, H. G. (2015). "Modelado bidimensional de velocidades de ondas p y s en la parte austral de Los Andes de Mérida", Universidad Simón Bolívar.137
- RAMÍREZ, E., J. SANCHEZ ROJAS, N. ORIHUELA y M. SCHMITZ (2014). "Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos y magnéticos en el perfil Calabozo-Dabarujo". Jornadas de Investigación, encuentro académico Industrial (JIFI). U. c. d. Venezuela. Caracas, Venezuela: 8.
- REQUENA, J. A. y M. D. ZAMBRANO (2008). "Generación De Un Modelo Geológico Estructural A Partir De Datos Sísmicos 2d De La Región Central De Zulia Oriental", Universidad Central de Venezuela.178
- ROD, E. (1956). "Strike-slip faults of northern Venezuela." *AAPG Bulletin* 40(3): 457-476.
- RODRÍGUEZ, J. y J. SOUSA (2003). "Estudio geológico-estructural y geofísico de la sección cabo San Roman-Barquisimeto, estados Falcón y Lara". Bsc, Universidad Central de Venezuela.296
- RONDÓN, F., J. SÁNCHEZ-ROJAS y V. ROCABADO (2016). "Modelado gravimétrico cortical 2D de un perfil que cruza la sección sur de los Andes de Mérida". Jornadas de Investigación, Facultad de Ingeniería UCV, JIFI 2016. Caracas, Venezuela: 8.
- SAAVEDRA, M. J. (2015). "Modelos Corticales De Velocidades En La Región Occidental De Venezuela, Zona Centro-Sur De Los Andes", Universidad Simón Bolívar.152
- SANCHEZ-ROJAS, J. (2011). "New Bouguer gravity maps of Venezuela: Representation and analysis of free-air and Bouguer anomalies with emphasis on spectral analyses and elastic thickness." *International Journal of Geophysics* 2012: 1-19.
- SÁNCHEZ, G., H. ROJAS, M. REYES, G. TANG, E. PATIÑO, A. GONCALVES y J. NAMSON (2008). "Nuevo modelo estructural de la parte central de La Sierra de Perijá, Venezuela", *PDVSA*: 6.
- SÁNCHEZ, J. y M. PALMA (2014). "Crustal density structure in northwestern South America derived from analysis and 3-D modeling of gravity and seismicity data." *Tectonophysics*.
- SÁNCHEZ, M., F. E. AUDEMARD, C. GIRALDO y F. RUIZ (1994). "Interpretación sísmica y gravimétrica de un perfil a través de los Andes venezolanos. ." *Mem. III Cong. Geol. Venez. Ing. Sism.*: 251–258.
- SANTIAGO, N., L. BELLIZZI, L. ESCORCIA, M. HERNÁNDEZ, Z. HERNÁNDEZ, J. LARA, J. MARCANO, M. MOYA, R. OLIVEROS, Y. OROPEZA, K. PARRA, Y. PEÑA y Y. RIVAS (2014). "Proyecto Evaluación del sistema petrolífero Apure-Portuguesa", *Petróleos de Venezuela. S.A (PDVSA)*: 601.
- SCHMIDT, S. y H. J. GÖTZE (1998). "Interactive visualization and modification of 3D-models using GIS-functions." *Physics and Chemistry of The Earth* 23(3): 289-295.
- SCHMITZ, M., J. AVILA, M. BEZADA, E. VIEIRA, M. YÁÑEZ, A. LEVANDER, C. A. ZELT, M. I. JÁCOME y M. B. MAGNANI (2008). "Crustal thickness variations in Venezuela from deep seismic observations." *Tectonophysics* 459(1-4): 14-26.
- SCHMITZ, M., A. MARTINS, C. IZARRA, M. I. JÁCOME, J. SÁNCHEZ y V. ROCABADO (2005). "The major features of the crustal structure in north-eastern Venezuela from deep wide-angle seismic observations and gravity modelling." *Tectonophysics* 399(1-4): 109-124.
- SPECTOR, A. y F. S. GRANT (1970). "Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data." *Geophysics* 35(2): 293-302.

- STEPHAN, J.-F. (1982). "Evolution géodynamique du domaine Caraïbe, Andes et chaîne Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Venezuela)". PhD. 512.
- STEPHAN, J. F. (1985). "Andes et chaîne caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Venezuela)." *Proceedings of Symposium Géodynamique des Caraïbes*: 505-529.
- TABOADA, A., L. A. RIVERA, A. S. FUENZALIDA, A. CISTERNAS, H. PHILIP, H. BIJWAARD, J. OLAYA y C. RIVERA (2000). "Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia)." *Tectonics* 19: 787-813.
- TRICART, J. (1962). "Les terrasses quaternaires des Andes vénézuéliennes." *Société Géologique de France* IV: 201-218.
- VAN DER HILST, R. y P. MANN (1994). "Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America." *Geology* 22(5): 451-454.
- VARGAS, C. (2002). "Estudio aeromagnético de la región central de La Sierra de Perijá, estado Zulia", Universidad Simón Bolívar
- VERROCCHI, Y. (2011). "Modelado Gravimétrico 2D de un perfil en la región noroccidental de Suramérica", Universidad Simón Bolívar
- WEBER, J. C., T. H. DIXON, C. DEMETS, W. B. AMBEH, P. JANSMA, G. MATTIOLI, J. SALEH, G. SELLA, R. BILHAM y O. PEREZ (2001). "GPS estimate of relative motion between the Caribbean and South American plates, and geologic implications for Trinidad and Venezuela." *Geology* 29(1): 75-a-78.
- YEGRES, L., M. SCHMITZ, J. ÁVILA y E. GIL (2017). "Modelado bidimensional de la corteza de Los Andes de Mérida en el perfil Andes Central, a partir de sísmica de refracción profunda". XI CONVESIS. Caracas, Venezuela: 10.
- YORIS, F. y M. OSTOS (1997). "WEC. Evaluación de pozos, Capítulo 1: Geología de Venezuela." *Schlumberger*: 44.