

ESTRUCTURA CORTICAL DE LOS ANDES DE MÉRIDA - VENEZUELA

FREDDY RONDÓN^{1,2,a}, JESÚS AVILA^{1,3}, MICHAEL SCHMITZ^{1,2,4}, JAVIER SÁNCHEZ-ROJAS¹, PEDRO MEDINA^{1,4},
MARÍA LOLLI², DYLAN MARCHENA², LUIS YEGRES^{1,5}, FRANCK AUDEMARD^{1,4}

¹Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Dpto. de Geofísica, 1070 Caracas, Venezuela

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

³Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), CDMX, México

⁴Universidad Central de Venezuela (UCV), Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, 1080 Caracas, Venezuela

⁵Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE),

Dpto. de Sismología, Ensenada, Baja California, México

^ae-mail: fjrondon369@gmail.com

Recibido: febrero de 2021

Aprobado para publicación: mayo de 2021

RESUMEN

Entre 2012 y 2015 se realizaron investigaciones de campo en la región noroccidental de Venezuela, en el marco del proyecto Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME) para estimar la profundidad del basamento y el espesor de sedimentos; determinar la estructura litosférica y estudiar la evolución tectónica de la misma, con el objetivo principal de refinar los modelos geodinámicos propuestos y mejorar el cálculo de la amenaza sísmica. Los modelos generados de esta investigación en el perfil Andes Sur apoyan el modelo del orógeno flotante en el cual proponen que los Andes de Mérida son una cadena montañosa asimétrica y cuyo orógeno posee forma de flor positiva. Este orógeno delimita el Bloque de Maracaibo al este en respuesta a la subducción de bajo ángulo de la Placa del Caribe debajo del continente suramericano. La raíz andina a lo largo del perfil Sur varía entre 45 y 55 km de profundidad y está desplazada ~35 km hacia el noroeste respecto a la expresión topográfica del orógeno. Existe una subducción tipo B de la Placa Caribe debajo de la Placa Suramericana desde Santa Marta (Colombia) en dirección NO-SE con un buzamiento de ~25°. El modelo cortical integral del perfil Sur sugiere un sistema de compensación de carácter regional, en la 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 de Maracaibo puede ser atribuida tanto a la gran carga sedimentaria que soporta, así como una respuesta a la subducción tipo A de la Placa Suramericana.

Palabras claves: Estructura cortical, sísmica de refracción profunda, modelo gravimétrico y magnético, Andes de Mérida, bloque Maracaibo, placa Suramericana.

CRUSTAL STRUCTURE OF THE MÉRIDA ANDES - VENEZUELA

ABSTRACT

Between 2012 and 2015, field investigations were carried out in the northwestern region of Venezuela, within the framework of the Integrated Geoscience of the Mérida Andes (GIAME) project to estimate the depth of the basement and the thickness of sediments; determine the lithospheric structure and study its tectonic evolution, with the main objective of refining the proposed geodynamic models and improving the calculation of the seismic hazard. The models generated from this research along the Andes South profile support the floating orogen model, in which the Mérida Andes are an asymmetric mountain chain and whose orogen has a positive flower shape. This orogen delimits the Maracaibo Block to the east in response to the low-angle subduction of the Caribbean Plate under the South American continent. The Andean root along the Andes South profile varies between 45 and 55 km in depth and is displaced ~ 35 km towards the Northwest with respect to the topographic expression of the orogen. There is a type B-subduction of the Caribbean Plate below the South American Plate from Santa Marta (Colombia) in a NW-SE direction with a dip of ~ 25°. The integrated crustal model of the Andes South profile suggests a regional compensation system, in which the bending of the South American Plate is produced by the orogenic load of the Mérida Andes and the Barinas-Apure Basin, while the bending of the Maracaibo Block can be attributed both, to the great sedimentary load, and a response to the type A-subduction of the South American Plate.

Keywords: Crustal structure, deep seismic refraction, gravimetric and magnetic Model, Mérida Andes, Maracaibo block, South American plate.

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. De los 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). Entre 2012 y 2015 se realizaron investigaciones de campo (Gravimetría, Magnetometría, Sísmica profunda, Magnetotelúrica, Mediciones GNSS y Geológicas entre otros) en la región noroccidental de Venezuela en el marco del proyecto Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME) para estimar la profundidad del basamento y el espesor de sedimentos; determinar la estructura litosférica y estudiar la evolución geotectónica de la misma, con el objetivo principal de refinar los modelos geodinámicos propuestos y mejorar el cálculo de la amenaza sísmica (Schmitz et al., 2015). De esta manera se adquirió un perfil sísmico de gran ángulo (Andes Sur) (Figura 1) con una longitud aproximada de 500 km con rumbo NO - SE, desde la Serranía de Perijá hasta la Cuenca Barinas-Apure y perpendicular al rumbo de los Andes de Mérida, empleando 1.350 sismómetros portátiles. Adicionalmente, se realizaron un total de 406 mediciones de señales de ruido sísmico ambiental distribuidas a lo largo de la Cuenca del Lago

de Maracaibo y la Cuenca Barinas - Apure, empleando un digitalizador y un sismómetro, también fueron adquiridas 2692 mediciones gravimétricas distribuidas espacialmente en la región empleando gravímetros y equipos geodésicos. Posteriormente se generaron modelos sísmicos de velocidades Vp empleando fuentes sísmicas activas, (Medina, 2017; Avila et al., 2021), un modelo gravimétrico 2D (Rondón et al., 2020), un modelo magnético 2D (Marchena, 2018) y modelos de velocidades Vp y Vs basado en la inversión de datos de ruido sísmico ambiental (Lolli, 2018). Dichos modelos fueron generados integrando datos sísmicos, gravimétricos y de ruido ambiental adquiridos por la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA), Petróleos de Venezuela, S.A - Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (PDVSA-INTEVEP) y la Universidad Central de Venezuela (UCV) (Pérez, 2014; Hermoso, 2015). Con el fin de mejorar la cobertura y calidad de los datos existentes, fueron utilizados datos del modelo gravimétrico satelital EGM2008 (Earth Gravity Map 2008) (Pavlis et al., 2008) y datos magnéticos satelitales del modelo EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid) (Maus et al., 2009). El principal propósito de este trabajo es presentar un modelo integrado cortical propuesto 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.

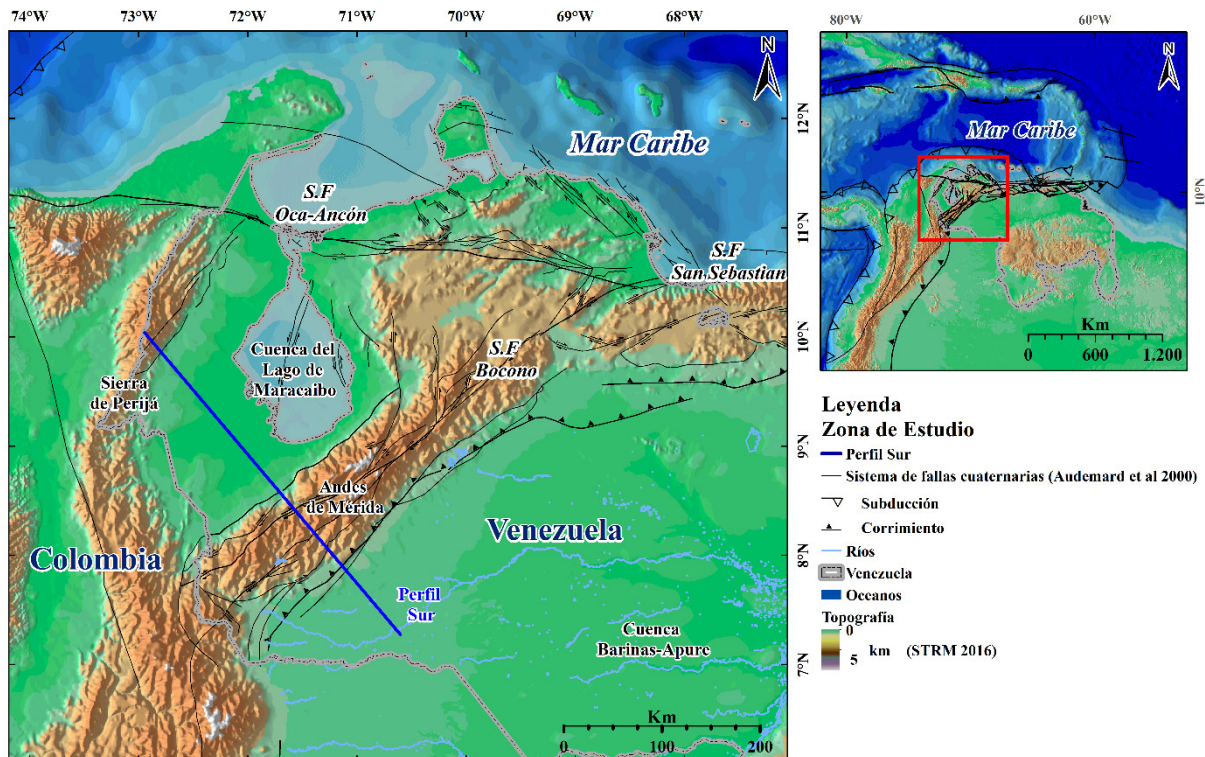


Figura 1. Área de estudio, tectónica y cinemática de la región noroccidental de Venezuela con ubicación del Perfil Sur del Proyecto GIAME. Sistema de fallas de Venezuela (Audemard et al., 2000) sobre modelo digital de elevaciones (Jarvis et al., 2008).

MARCO TECTÓNICO

La región norte de los Andes Suramericanos está caracterizada por ser un pliegue de tendencia noreste y cinturón de empuje de poca profundidad cuya sismicidad se ubica entre 200 y 600 km de profundidad. En ella existe un patrón complejo de deformación. La sismicidad y tectónica activas del norte de Los Andes es atribuida a la compresión y empuje menor debido a la convergencia oblicua de la placas de Nazca y el Caribe con América del Sur (Pennington, 1981). En los últimos años, mediciones de los movimientos relativos entre estas placas describen este margen 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). A diferencia de los Andes Suramericanos, los Andes de Mérida no son producto de orogénesis relacionada con subducción de tipo B. Éstos 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 la Placa de Nazca y la Placa 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 bajo el Bloque de Maracaibo (Henriques, 2004).

Como resultado de la interacción de las placas del Caribe, Nazca y Suramérica y los procesos orogénicos antes descritos se tiene una compleja zona de deformación en el noroccidente de Venezuela, en la cual destacan los Andes de Mérida con las cuencas de Maracaibo y de Barinas-Apure ubicados en ambos flancos, así como las napas de Lara y la Cuenca de Falcón en el noroeste.

Además, esta región se caracteriza por sus sistemas de fallas rumbo - deslizantes, como: el Sistema de fallas transcurrentes de Boconó que atraviesa longitudinalmente los Andes de Mérida (Figura 1), 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 (Bermudez, 2009).

Desde mediados del siglo pasado se interpretaron las principales estructuras litosféricas por medio de investigaciones gravimétricas (Hospers y Van Wijnen, 1958; Folinsbee, 1972; Kellogg y Bonini, 1982). Sin embargo, la información estructural está limitada a los primeros 8-10 km, por lo cual los estudios sobre la configuración actual de los Andes de Mérida quedaron ambiguos a niveles profundos de la corteza y litosfera (e.g. De Toni y Kellogg, 1993; Audemard y Audemard, 2002; Duerto et al., 2006;

Arnaiz et al., 2011). Monod et al., (2010) comparan secciones balanceadas a escala cortical de los Andes de Mérida, que permiten ver la evolución desde el Cretácico.

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 Eoceno (Colletta et al., 1997). Está limitado en ambos flancos por las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure. La Cuenca Barinas-Apure es una Cuenca antepaís generada por la respuesta flexural de los Andes de Mérida (Chacín et al., 2005), mientras que 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 Barinas-Apure (5 km) es evidencia de que el Bloque posee un espesor elástico considerablemente menor al de la Placa Suramericana (Arnaiz et al., 2011).

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), hizo un estudio comparativo de ambos modelos, sugiriendo que la interpretación de la estructura cortical varía si la cadena montañosa andina es simétrica o asimétrica. 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 Audemard y Audemard, (2002). Por lo que plantean 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 como sureste. 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 como la Cuenca del Lago de Maracaibo. Según Monod et al., (2010), el hecho de que los datos geocronológicos (Kohn et al., 1984; Bermudez, 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.

ADQUISICIÓN Y METODOLOGÍA

Sísmica activa

El control de la cobertura, longitud de los perfiles, distancias entre sitios de fuente, y demás parámetros a establecer para el desarrollo de la sísmica de gran ángulo de los perfiles sísmicos planteados para el proyecto GIAME el diseño técnico, fue desarrollado por Ávila et al. (2015). Ellos realizaron un estudio de cobertura partiendo del diseño inicial planteado para la sísmica del proyecto GIAME; luego de estudiar los diferentes modelos corticales de la génesis y evolución de los Andes de Mérida propuestos hasta la actualidad y generaron un modelo de entrada inicial basado en la interpretación de la mayor cantidad de datos geológicos y geofísicos disponibles. Además, generaron fases corticales sintéticas Pg (Refracciones en la capa de sedimentos y corteza superior), PmP (Reflexiones en la interfaz corteza-manto) y Pn (Refracciones en el manto superior) basándose en estudios previos en los Alpes Europeos (Su estructura, génesis y evolución son similares a los Andes de Mérida), así como también en los resultados obtenidos en los proyectos BOLIVAR y GEODINOS.

Para los registros sísmicos se contó con un total de 1050 equipos de registro REFTEK-125 (Texan), que grabaron los disparos a lo largo de los diferentes perfiles en 4 instalaciones en el año 2014 y 2 en el año 2015. Dichos perfiles fueron denominados Andes Norte, Andes Central, Andes Sur y Burro Negro. En este trabajo nos enfocamos en los resultados llevados a cabo a lo largo del perfil Andes Sur.

Perfil Andes Sur

Se adquirió un perfil sísmico de gran ángulo (Andes Sur) (Figura 2) con una longitud aproximada de 500 km con rumbo NO - SE, desde la serranía de Perijá hasta la Cuenca de Barinas-Apure y perpendicular al rumbo de los Andes de Mérida, empleando 1350 sismómetros portátiles REFTEK-125A (Texans) que grabaron los disparos a lo largo de los diferentes perfiles en 4 instalaciones en el año 2014 y 2 instalaciones en el año 2015. Se utilizaron dos tipos de fuentes: explosivas para los disparos de mayor alcance y 3 camiones vibradores en los flancos de la cordillera, donde cada PV posee de 8 a 22 barridos. Se muestra un ejemplo sección sísmica y trazado de rayos del disparo en el flanco norte de los Andes de Mérida, (Figura 3).

Los datos fueron filtrados empleando una variedad de bandas de frecuencias entre 1 y 10 Hz. Los tiempos de arribo fueron seleccionados manualmente, empleando la rutina SEISPLOT (Arnaiz R. et al., 2014); las primeras llegadas, correspondieron a las fases sísmicas Pg y Pn; y las llegadas posteriores, principalmente a la fase PmP.

Los datos sísmicos fueron empleados para generar un modelo bidimensional 2-D de velocidades de ondas P, aplicando el método de modelado iterativo (*forward modeling*), para toda la corteza y la parte superior del manto.

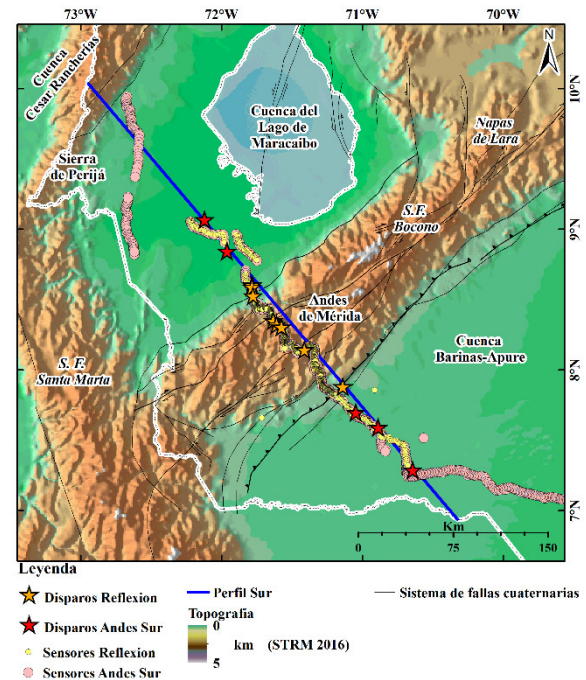


Figura 2. Mapa geológico-estructural del perfil de estudio, con ubicación de los disparos realizados (Ávila et al., 2021).

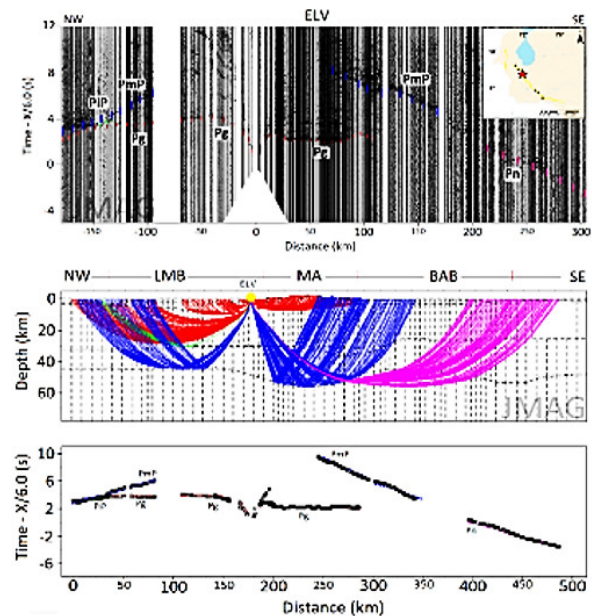


Figura 3. Sección sísmica y trazado de rayos del disparo en el flanco Norte de los Andes de Mérida (Ávila et al., 2021).

Se invirtió la estructura del Moho, las velocidades de la corteza inferior y del manto superior, a partir de los algoritmos de inversión por trazado de rayos y mínimos cuadrados de Zelt y Smith, (1992) lo cual permitió diferenciar el basamento de las cuencas de Maracaibo y Barinas - Apure, el afloramiento de las estructuras sobre los Andes de Mérida y las profundidades estimadas para la corteza superior.

Sísmica Pasiva

Se realizó el estudio de 406 mediciones de señales de ruido sísmico ambiental de las estaciones distribuidas a lo largo de la Cuenca de Maracaibo y la Cuenca Barinas - Apure adquiridos por Funvisis entre los años 2013 y 2016 empleando un digitalizador REF TEK modelo 130-B y un sismómetro REF TEK modelo 151-B.

En dicho estudio, se hizo una comparación entre las frecuencias fundamentales obtenidas mediante tres métodos que son: el cálculo de la relación H/V que corresponde a la relación espectral entre la componente horizontal y vertical del ruido ambiental, seguido por el método del cálculo de la elipticidad de la onda Rayleigh a través de la técnica de campo difuso y finalmente se utilizó el método del decremento aleatorio para estimar el espectro de frecuencias de la elipticidad de la onda Rayleigh. Los resultados obtenidos permitieron realizar modelos 2-D de velocidades, realizando la interpolación de modelos 1-D de velocidades V_p y V_s obtenidos a través de la inversión de las curvas de elipticidad de la onda Rayleigh (Figura 4).

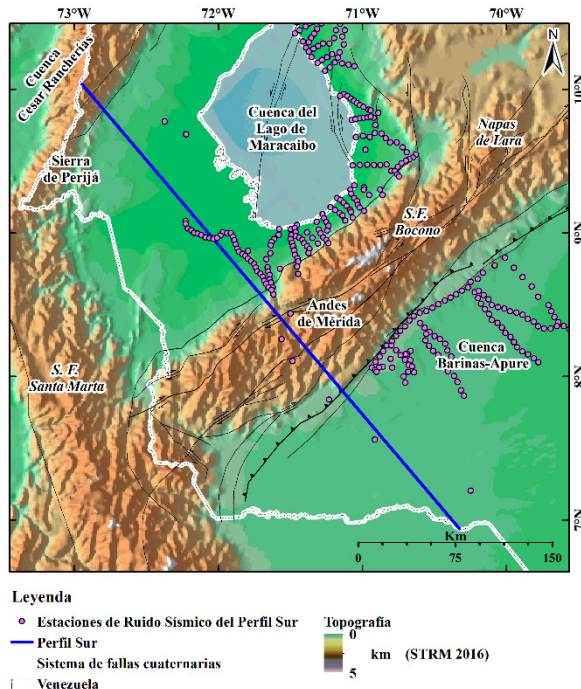


Figura 4. Ubicación de estaciones de ruido sísmico terrestres en la zona Noroccidental de Venezuela. Sistema de fallas de Venezuela (Audemard et al., 2000) sobre modelo digital de elevaciones (Jarvis et al., 2008).

Gravimetría

Esta fase comprendió la adquisición de datos mediante la incorporación de varios gravímetros y unidades geodésicas de última generación: en total 5 gravímetros Scintrex CG-5, así como cuadrillas geodésicas con equipos Trimble R8. Para los diversos equipos se realizó una fase inicial de calibración instrumental que permitió la homologación de las condiciones instrumentales en el año 2012.

Debido a la gran extensión del área de estudio de este proyecto la adquisición gravimétrica se abordó dividiendo la región occidental de Venezuela en tres zonas, integradas por diferentes estados y 3 perfiles, de ubicación similar a los perfiles sísmicos (Figura 5).

Los datos gravimétricos usados en el modelo gravimétrico del perfil Sur fueron compilados por la Universidad Central de Venezuela (Pérez, 2014; Hermoso, 2015) y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).

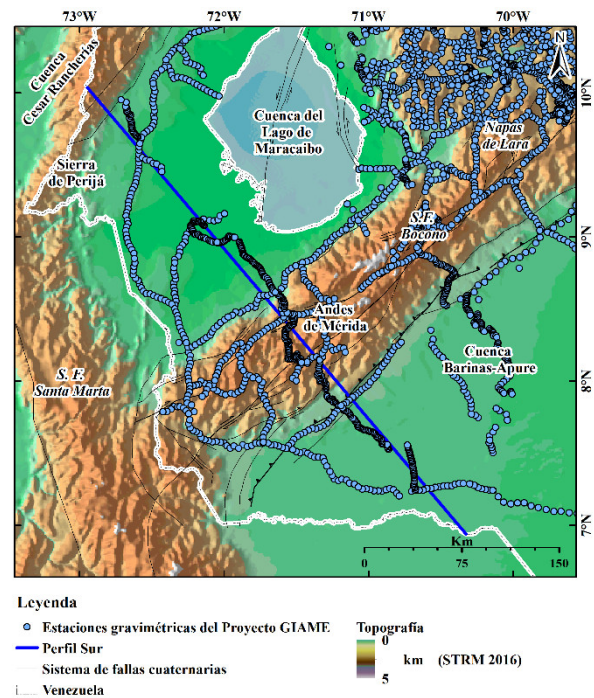


Figura 5. Ubicación de estaciones gravimétricas terrestres en la zona Noroccidental de Venezuela. Sistema de fallas de Venezuela (Audemard et al., 2000) sobre modelo digital de elevaciones (Jarvis et al., 2008).

Para 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).

El procesamiento consistió en el cálculo de la anomalía de Bouguer (AB) de la zona de estudio. 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. La anomalía de Bouguer (AB) (Figura 6) 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 2.670 Kg/m^3 , debido a que este valor es cercano a la densidad media de las rocas en superficie del área de estudio, se realizó empleando el programa DbGrav (Schmidt, 2007) el cual realiza la corrección topográfica a través del cálculo del efecto gravimétrico de un prisma basado en el re muestreo de un SRTM90.

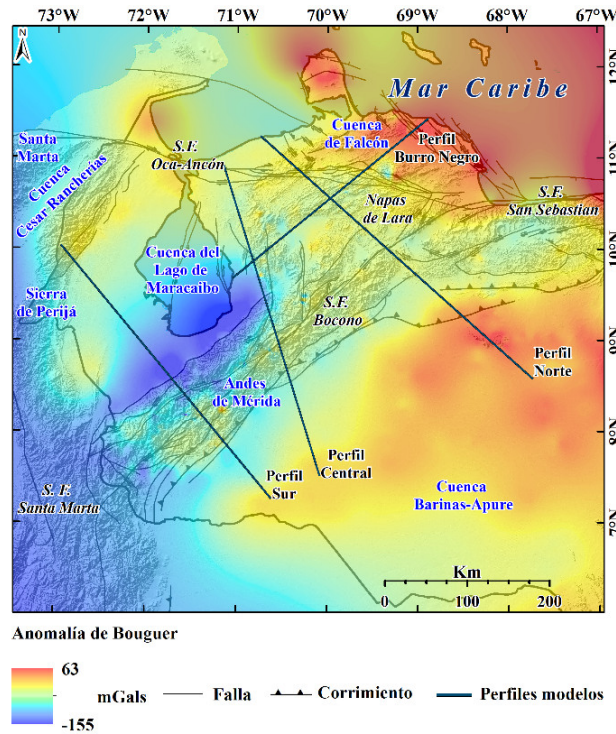


Figura 6. Mapa de Anomalía de Bouguer del perfil Sur del proyecto GIAME (Rondón et al., 2020).

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 anomalía de Bouguer es de $\sim \pm 3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ($3 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2 = 1 \text{ mGal}$). El mapa de anomalía de Bouguer (AB) de la zona de estudio fue realizado mediante el método de interpolación *Kriging* (Figura 6), 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. La interpretación de los datos se realizó mediante la implementación de diferentes técnicas, con la integración de la información en un Sistema de Información Geográfica (SIG), con las formaciones presentes, principales rasgos geológicos y densidades promedios de las rocas aflorantes en el área de estudio. Con la información de los trabajos previos fue generado el modelo integrado cortical del Perfil Sur.

Magnetometría

En esta etapa, se emplearon los datos magnéticos del Modelo de Anomalías Magnéticas Global EMAG2 (Earth Magnetic Anomaly Grid) (Maus et al., 2009). Este 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* (Figura 7).

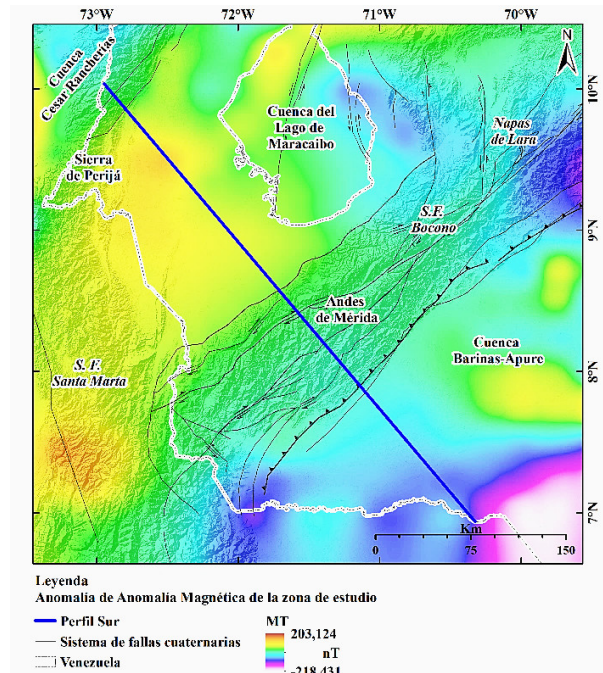


Figura 7. Modelo cortical integral del Perfil Sur; a) Ubicación relativa del modelo cortical 2D, Perfil Sur. b) Curva de anomalía magnética. c) Curva de anomalía de Bouguer. d) Modelo cortical integral del Perfil Sur.

Construcción de modelos 2D

Los modelos (gravimétrico y magnético) se realizaron utilizando el programa IGMAS (3D Interactive Gravity Magnetic Application System) (Götze, 1978; Götze y Lahmeyer, 1988; Schmidt y Götze, 1998) que, permite generar modelos gravimétricos y magnéticos a partir de secciones en dos dimensiones. El algoritmo de cálculo que usa está desarrollado en función de las integrales del teorema de Gauss.

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 software 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, es por ello que se incorporaron los resultados de otros métodos geofísicos y geológicos para ajustar la geometría, densidades y susceptibilidades del modelo principalmente de modelos sísmicos de velocidades V_p empleando fuentes sísmicas activas, (Medina, 2017; Avila et al., 2021) y modelos de velocidades V_p y V_s basado en la inversión de datos de ruido sísmico ambiental (Lolli, 2018).

Estimación de densidades y 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 de Mérida. 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 estimaron 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](#)).

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](#); [Arnaiz, 2009](#); [Bermudez, 2009](#); [Arnaiz et al., 2011](#); [Cedeño, 2011](#); [Sanchez-Rojas, 2011](#); [Verrocchi, 2011](#); [Sanchez y Palma, 2014](#)) (Tabla 1). Otras densidades desconocidas fueron estimadas usando la información litoestratigráfica existente basada en su distribución geográfica en el mapa geológico de Venezuela ([Hackley et al., 2006](#)) y el léxico estratigráfico venezolano ([Intevp, 2011](#)).

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](#); [Jaspe, 2004](#); [Núñez, 2005](#); [Arraiz, 2008](#); [González y Martínez, 2008](#); [Martínez, 2012](#)).

Ajuste de la geometría de los modelos

Basados en los trabajos previos realizados en la zona de estudio, se construyó cada estructura del modelo integrado cortical tomando en cuenta las siguientes consideraciones.

- La estructura de la Placa Caribe es tomada de los trabajos de [Malavé y Suárez, \(1995\)](#), [Pérez et al., \(1997\)](#), [Colmenares y Zoback, \(2003\)](#), [Cortéz y Angelier, \(2005\)](#), [Masy et al., \(2007\)](#), [Bezada et al., \(2010\)](#) y [Sanchez y Palma, \(2014\)](#), 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, \(2002\)](#), [Cediel et al., \(2003\)](#).

Tabla 1. Densidades consideradas de modelos gravimétricos del área de estudio ([Rondón et al., 2020](#)).

ρ (gr/cm ³) \ Autor	Arnaiz, 2009	Cedeño 2011	Folinsbee 1972	Guédez 2003	Henriques 2004	Kellogg et al. 1982	Núñez 2005	Sánchez 2014	Schmitz 2005	Verrocchi 2011
Agua Oceánica								1,03		
Manto Astenosférico								3,34		
Manto Litoférico Caribe								3,14-3,41		
Corteza Oceánica Caribe		2,9-2,95						2,95-3,18		
Manto Litoférico	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 Inf. Placa Suramericana ¹	2,95	2,8-2,85		2,9		2,90	2,9	2,77-2,85	2,85-2,93	2,93
Corteza Sup. Placa Suramericana ²	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 Inf. Bloque Maracaibo ¹	2,945									
Cuenca Barinas-Apure	2,5									
Graben de Apure	2,6-2,65									
Graben de Mantecal	2,6									

¹ Inf.= Inferior

² Sup.= Superior

Tabla 2. Susceptibilidades consideradas de modelos magnéticos del área de estudio (Rondón et al., 2020).

Autor χ (SI)	Arraiz 2008	Jaspe 2004	Núñez 2005	Martínez 2012	Rodríguez et al. 2003	González et al. 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

- 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 de Kellogg y Bonini, (1982), Audemard, (1991), Audemard y Audemard, (2002), Cediel et al., (2003), Rodriguez y Sousa, (2003), Henriques, (2004), Chacín et al., (2005), Guédez, (2003), Linares et al., (2014), Arnaiz, (2009), Arnaiz et al., (2011), Sanchez y Palma, (2014), Medina., (2017), Lolli., (2018) y Ávila et al., (2021).
- El límite de la discontinuidad de Mohorovicic fue establecido, tomado de referencia los trabajos de Niu et al., (2007), Schmitz et al., (2008), , Pinto, (2015) y Ávila et al., (2021).
- El estudio de Arnaiz y Orihuela, (2013) sobre la profundidad de Curie fue utilizado como información preliminar.
- 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 modelado a partir de secciones sísmicas de Mann et al., (2006).
- Las cuencas de Maracaibo y de Barinas-Apure fueron modeladas como cuencas de flexión a partir de los trabajos de Henriques, (2004), Chacín et al., (2005), Requena y Zambrano, (2008), Arnaiz, (2009), Medina, (2017), Lolli., (2018) y Ávila et al., (2021).
- Los grábenes de Apure y Mantecal se modelaron con los trabajos de González, (2009) y Arnaiz, (2009).
- La estructura cortical de la Sierra de Perijá fue generada basada en el modelo de Audemard y Audemard, (2002) y las secciones sísmicas de Sanchez et al., (2008). El Bloque Santa Marta, la Cuenca Cesar Rancherías y la Sierra de Perijá fueron creados a partir de la sección estructural de

Chicangana et al., (2011). Los flancos de los Andes de Mérida y de la Sierra de Perijá fueron modelados a partir de las secciones sísmicas de Duerto et al., (2006).

- Se identificaron y generaron las unidades aflorantes a lo largo de los perfiles descrita por Hackley et al., (2006).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Mapa de anomalía gravimétrica

El mapa de anomalía de Bouguer de la región noroccidental de Venezuela (Figura 6). muestra valores que varían en el rango entre -155 a 63 mGals.

Los altos valores de mínimo gravimétrico (~ -110 mGals) en el gradiente del flanco Norandino pueden estar relacionados a la fuerte pendiente del basamento de la Cuenca del Lago de Maracaibo y a su profundidad máxima estimada en ~ 10 km. Mientras que el mínimo (~ -80 mGals) hacia el flanco Sur andino puede ser vinculado con la profundidad de la Cuenca Barinas-Apure, los valores por encima de -25 mGals, pueden ser vinculados a la respuesta gravimétrica de la Placa Suramericana.

Se observa una fuerte tendencia asimétrica que ya ha sido descrita por Bucher, (1952) a lo largo de la cordillera de los Andes, definido principalmente por estructuras de gran complejidad tectónica y geológica.

Sobre el flanco norte del Sistema de fallas Boconó, se observa un mínimo gravimétrico con un valor de aproximadamente -150 mGals, que 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 y a la posible existencia de una subducción de tipo A; producto de la colisión de la Placa Suramericana con el Bloque Maracaibo.

En los Andes de Mérida, las anomalías positivas se asocian a rocas Precámbrico-Proterozoicas con alto grado de metamorfismo. Los máximos, se vinculan a las rocas Precámbricas y proterozoicas de los Andes. Las anomalías negativas (−40 mGals) 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 sedimentarias de las respectivas cuencas, en asociación con los sistemas de corrimiento presentes en ambos flancos de la cadena.

Mapa de anomalía magnética

La anomalía magnética (AM) en la zona de estudio (Figura 7) posee valores que varían entre −220 y 220 nT. Los valores de la anomalía magnética regional indican la presencia de características tectónicas resaltantes de las cuencas asociadas permitiendo inferir su origen, y vincularlos a su configuración geológica regional. Las zonas con altos valores de anomalía magnética negativas están vinculadas a aquellas con grandes cargas sedimentarias como las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure.

La Cuenca del Lago de Maracaibo presenta un valor de ~20 nT. Esta anomalía puede atribuirse a la carga sedimentaria en la Cuenca de Falcón. 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-Apure, estas respuestas pueden atribuirse a la carga sedimentaria de la misma y 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 −120 nT. Este valor, al igual que la anomalía anterior, se puede atribuir a la interacción de la Cuenca con la raíz de los Andes. Podemos observar que, el comportamiento en la zona de los Andes es homogéneo, el cual puede corresponder a la composición de masa uniforme del orógeno andino.

Densidades y susceptibilidades del modelo cortical integral

Las densidades gravimétricas y susceptibilidades magnéticas finales asignadas a los cuerpos geológicos del modelo se resumen en la Tabla 3.

Los valores preliminares de densidades y susceptibilidades asignado a cada cuerpo de los cuerpos fueron variados con la finalidad de lograr el mejor ajuste entre el valor de AB observado por el valor de AB calculado en el modelo.

Modelo integral cortical propuesto para el perfil Andes Sur del proyecto GIAME-ANDES de Mérida

En el perfil cortical integral Andes Sur (Figura 8 y Figura 9) se puede observar una raíz cortical que no se encuentra simétrica al eje del orógeno, sino está desplazada ~50 km hacia el noroeste respecto a la expresión topográfica del orógeno.

Tabla 3. Densidades (ρ) y susceptibilidades magnéticas (χ) del modelo cortical integral (Rondón et al., 2020).

Cuerpo Geológico	ρ (gm/cm ³)	χ (SI)
Densidad de Bouguer	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 P. S. ³	2,80-2,95	0,01-0,06
Corteza Superior P. S. ³	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 L. M. ¹	2,72	0,0045-0,0048
Basamento de los Andes de Mérida	2,70-2,75	0,0005-0,0078
Basamento de la Cuenca B-A ²	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	

¹L. M.= Lago de Maracaibo

²B-A= Barinas-Apure

³P. S.= Placa Suramericana

En la Cuenca de Maracaibo los sedimentos del Plioceno tienen velocidades Vp de 2,5 a 3 km/s y una densidad de 2,0 g/cm³ a profundidades no mayores a 3 km. Los sedimentos del Mioceno - Eoceno tienen Vp de 3,5 a 4,5 km/s y densidades de 2,2-2,4 g/cm³ hasta 5 km de profundidad, seguidos por sedimentos del Paleoceno - Cretáceo con Vp de 4,5 a 5,2 km/s, densidades de 2,45-2,51 g/cm³ y una profundidad de ~10 km, lo que marca el basamento de la Cuenca de Maracaibo, para la corteza superior, desarrollada durante el Triásico Superior, las velocidades sísmicas superan los 5,5 km/s con una densidad de 2,72 g/cm³, se observa que a medida que la Cuenca se acerca al Piedemonte se hace ligeramente más profunda; a medida que se acercan las capas al Piedemonte NW se observa en el modelo de velocidad la tendencia de estas capas a ser cada vez más delgadas (Figura 8d).

Sobre los Andes de Mérida las velocidades son de ~5 km/s con densidades de 2,71-2,74 g/cm³ producto del afloramiento del basamento cristalino en esta área. Luego en el flanco sureste, hacia la Cuenca Barinas-Apure el modelo de velocidades muestra velocidades Vp de 2 a 3 km/s y densidades de 2,15-2,2 g/cm³ para los sedimentos molásicos del Plioceno con una profundidad aproximada de 2 km, para los sedimentos del Mioceno el rango de velocidades Vp varía de 3,5 a 4,5 km/s con una profundidad de 4 km, los sedimentos consolidados del Cretáceo muestran velocidades Vp superiores a 5,2 km/s con una densidad de ~2,73 g/cm³ delimitando el basamento de la Cuenca Barinas-Apure a ~5 km de profundidad (Figura 8d).

La corteza superior, desarrollada durante el Triásico superior, tiene Vp mayor a 5,5 km/s en el tope, aumentando a 6,5 km/s a 20-23 km de profundidad y que marca la discontinuidad de Conrad (Arnaiz et al., 2011; Rondón et al., 2020).

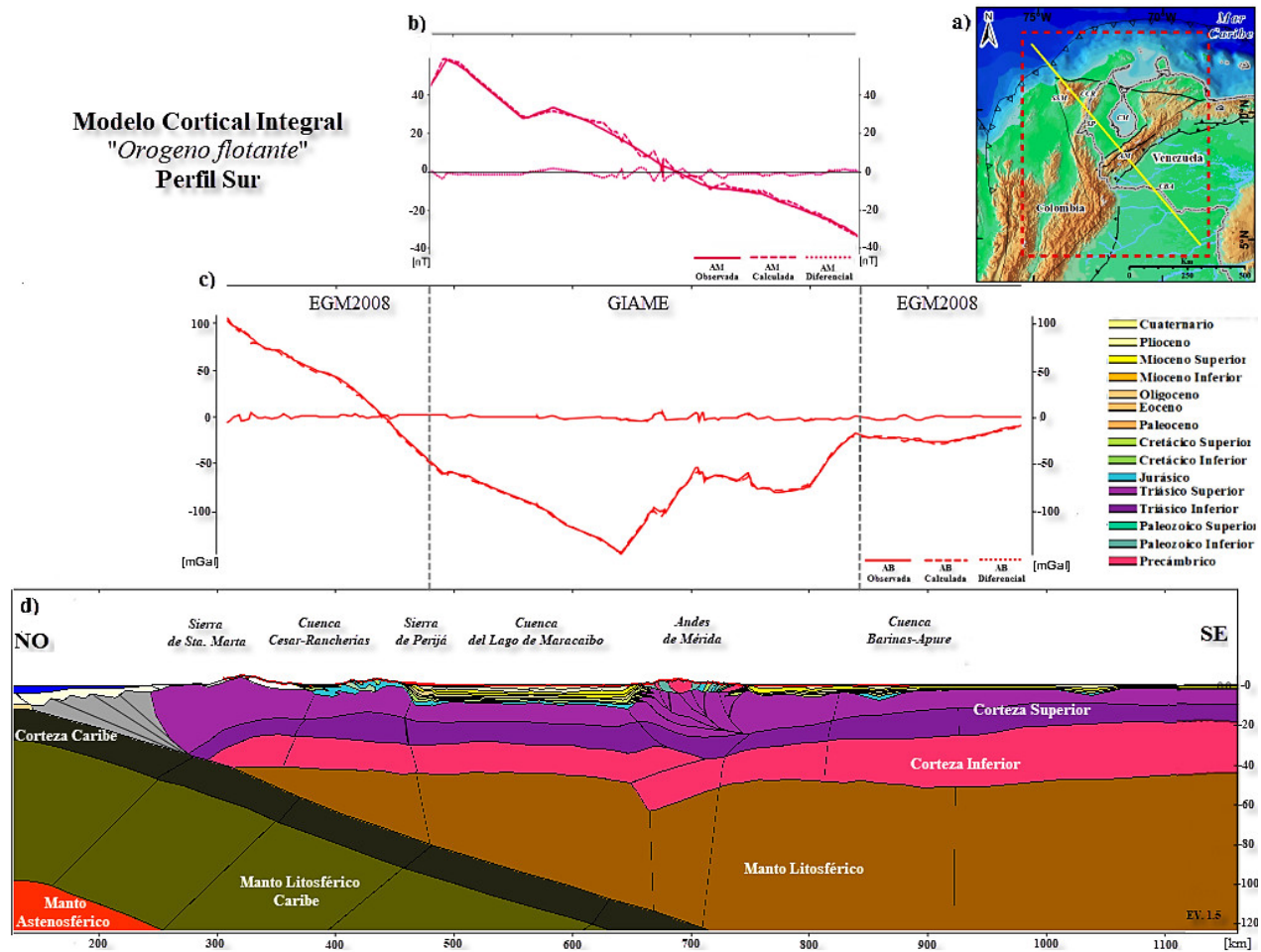


Figura 8. Mapa de Anomalía Magnética del Perfil Central y Sur del proyecto GIAME.

La corteza inferior (Figura 8d), tiene V_p de 6,4 a 6,85 km/s hasta 40-45 km de profundidad marcando la discontinuidad de Mohorovicic (Rondón et al., 2020) (densidades de 2,8-2,9 g/cm³). Las velocidades V_p del manto superior son mayores a 7,5 km/s, con densidades entre 3,15 y 3,25 g/cm³. Observando el comportamiento de la curva de anomalía gravimétrica (Figura 8c), las estructuras 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 mGals; este ajuste decae en un rango de 5-10 mGals 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, el desplazamiento de la raíz cortical del orógeno andino o por ser la zona retrocorrimiento cortical más pronunciado hacia el sureste, producto de la carga del Bloque Maracaibo.

El análisis del comportamiento de la curva de anomalía magnética (Figura 8b), se observa un buen ajuste entre la profundidad del punto de Curie y la discontinuidad corteza-manto, sin embargo, se observan discrepancias en el extremo NO y en los Andes de Mérida, tales discrepancias pueden ser atribuida a errores de interpolación por ausencia de datos en la zona o heterogeneidades no incluidas en el modelo. Desde el flanco SE de la Cuenca Barinas - Apure

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.

En general, el ajuste entre las curvas observadas y calculadas gravimétricas y magnéticas (Figura 8c y 8b) para los perfiles gravimétrico-magnético está entre 97 y 98 %.

En este perfil se observa que el núcleo cristalino de los Andes es de 80 km de ancho en el perfil Andes Sur y la raíz del orógeno de los Andes de Mérida se encuentra desplazada unos 35 km hacia el flanco noroccidental de la cadena andina.

La corteza inferior es más gruesa debajo la Cuenca Barinas-Apure disminuyendo su grosor hacia el noreste (Figura 8d y Figura 9), pero en compensación la corteza superior se hace más gruesa hacia el centro de la cadena de los Andes de Mérida.

El modelo generado del perfil Andes Sur (Figura 8a) apoya el modelo del orógeno flotante propuesto por Audemard y Audemard, (2002) y demostrado en (Rondón et al., 2020), el cual sugiere un sistema de compensación regional, en el que

los Andes de Mérida son una cadena montañosa asimétrica y cuyo orógeno posee forma de flor positiva. Este orógeno delimita el Bloque de Maracaibo al este en respuesta a la subducción tipo B de bajo ángulo de la Placa del Caribe debajo del continente suramericano en dirección NO-SE con un buzamiento de $\sim 25^\circ$ (Figura 8d y Figura 9).

La raíz andina a lo largo del perfil Andes Sur varía entre 45 y 55 km de profundidad y está desplazada ~ 50 km hacia el noroeste respecto a la expresión topográfica del orógeno; este desfase es generado por la subducción tipo A incipiente de la litósfera suramericana por debajo del Bloque de Maracaibo, y podría ser vinculada al mínimo gravimétrico (~ 150 mGals) presente (Figura 8c).

La Sierra de Perijá se presenta como un pliegue tipo anticlinal asociado a la propagación de la falla El Tigre. El Bloque Maracaibo se encuentra 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 Placa Suramericana subduce bajo el Bloque Maracaibo por ser más densa (Figura 8d y Figura 9).

El basamento de la Cuenca del Lago de Maracaibo (Figura 8d) se ubica a mayor profundidad (~ 10 km) que el de la Cuenca Barinas-Apure (~ 5 km) quizás debido a que el Bloque posee un espesor elástico (Arnaiz, 2009) considerablemente menor al de la Placa Suramericana. La discontinuidad de Conrad 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 SE, producto de la carga del Bloque Maracaibo en la que los Andes de Mérida funcionan como una cuña de apilamiento de corteza frágil.

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.

Existe un alto grado de correlación entre la profundidad del Moho del modelo con los valores de los estudios de Niu et al., (2007) y Saavedra, (2015) para los Andes de Mérida.

Se observó que la profundidad de la discontinuidad de Mohorovičić de la Placa Suramericana (45 km a 50 km) es mayor que la del Bloque de Maracaibo (38 km a 45 km). El modelo integral cortical del perfil Sur sugiere un sistema de compensación de carácter regional, en la 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 de Maracaibo puede ser atribuida tanto a la gran carga sedimentaria que soporta, como a la subducción tipo A con la Placa Suramericana (Figura 8d y Figura 9).

CONCLUSIONES

El modelo cortical integral del Perfil Sur de los Andes de Mérida basado en la integración de los resultados de los modelos sísmicos de velocidades Vp empleando fuentes sísmicas activas, (Ávila et al., 2021 y Medina., 2017), modelo gravimétrico 2D (Rondón et al., 2020), modelo magnético 2D (Marchena., 2018) y modelos de velocidades Vp y Vs de inversión de datos de ruido sísmico ambiental (Lolli., 2018), sugieren que el modelo que mejor describe la estructura de los Andes de Mérida es el modelo del orógeno flotante propuesto inicialmente por (Audemard y Audemard, 2002).

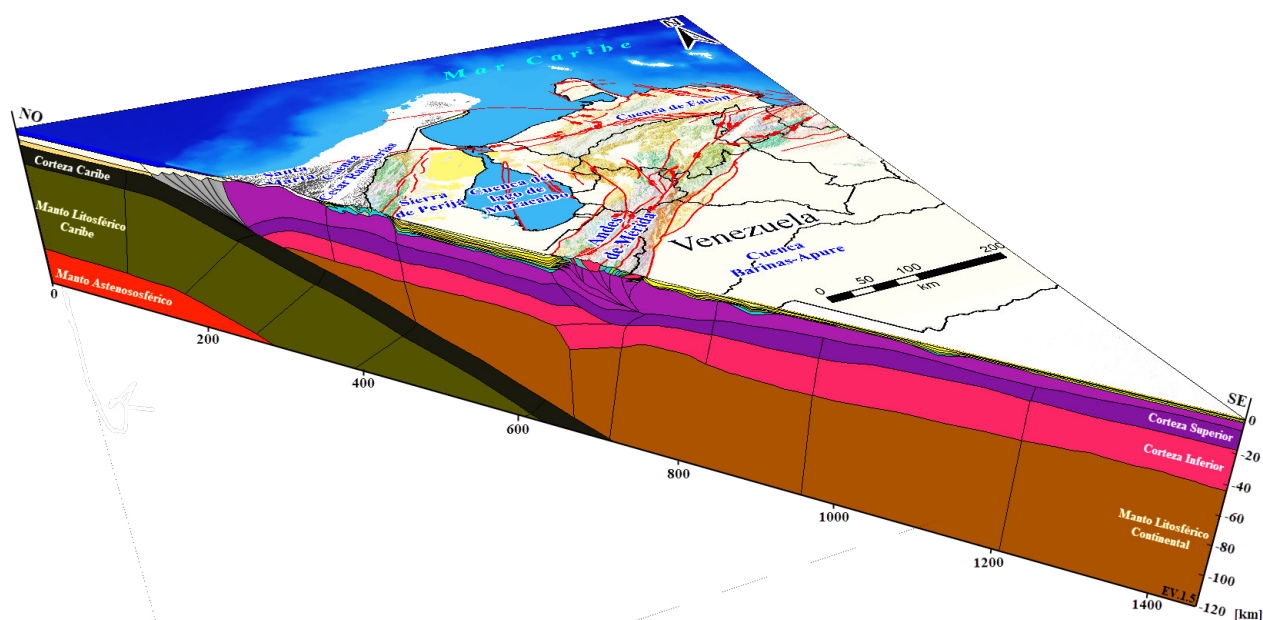


Figura 9. Vista 3D del modelo cortical integral 2D del Perfil Sur, proyecto GIAME, ubicado en la región noroccidental del continente suramericano, se observa la subducción Tipo B de la Placa del Caribe debajo del continente Suramericano, así como la subducción tipo A de la litósfera Suramericana por debajo del Bloque de Maracaibo; en este perfil la raíz del orógeno de los Andes de Mérida alcanza ~ 55 km.

El modelo cortical muestra un sistema donde 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, en este sistema la Placa Suramericana subduce 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 retrocorrimiento cortical más pronunciado hacia el SE, producto de la carga del Bloque Maracaibo en la que los Andes de Mérida son un orógeno tipo A 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.

Las curvas de AB y de AM del modelo sugieren 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 la Cuenca Barinas-Apure, mientras que la flexión del Bloque Maracaibo es producida por la subducción tipo A con la Placa Suramericana y por la gran carga sedimentaria que soporta.

Existe una subducción tipo B de la Placa Caribe debajo de la Placa Suramericana en dirección NO-SE con un buzamiento de $\sim 25^\circ$ observada en los modelos gravimétrico y magnético.

La discontinuidad de Mohorovicic de la Placa Suramericana (45 km a 50 km) es mayor que la observada en el Bloque de Maracaibo (38 km a 45 km), sugiriendo que el espesor cortical 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).

El espesor cortical del Bloque Maracaibo varía entre 35 y 40 km, siendo menor al espesor mostrado en la Placa Suramericana. Así mismo, 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 Orógeno de los Andes de Mérida delimita el Bloque de Maracaibo al Este en respuesta a la subducción de bajo ángulo de la Placa del Caribe debajo del continente suramericano.

Según lo observado en el modelo corticales del perfil Andes Sur, la raíz andina, varía entre 45 y 55 km de profundidad y se encuentra desplazada ~ 50 km hacia el NO respecto a la expresión topográfica del orógeno; este desfase es generado por la subducción tipo A incipiente de la litósfera suramericana por debajo del Bloque de Maracaibo.

AGRADECIMIENTOS

Aporte al proyecto Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME) (FONACIT 2012002202) y al Convenio específico PDVSA-FUNVISIS (12/09/2012). Para las

mediciones sísmicas, gravimétricas, magnéticas y de ruido sísmico se contó con equipos y personal de PDVSA, PDVSA-INTEVET, de FUNVISIS, de la UCV y la USB. Las mediciones sísmicas fueron realizadas con equipos de FUNVISIS y del IRIS/PASSCAL Instrument Centre (Socorro, NM, EE. UU.).

REFERENCIAS

- ARNAIZ, M. S. (2009). *Modelado gravimétrico cortical de la zona noroccidental de Venezuela*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- ARNAIZ-RODRÍGUEZ, M. S. & ORIHUELA, N. (2013). Curie point depth in Venezuela and the Eastern Caribbean. *Tectonophysics*, 590, 38-51.
- ARNAIZ-RODRÍGUEZ, M. S., RODRÍGUEZ-MILLÁN, I., & AUDEMARD, F. (2011). Análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 420-438.
- ARNAIZ-RODRÍGUEZ, M. S., BEZADA, M., & SCHMITZ, M. (2014). SEISPLIT: Un código interactivo para mostrar y seleccionar las primeras llegadas en sísmica de gran ángulo. *Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería (JIFI)*. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- ARRAIZ P., D. N., & DINIS D., E. (2008). *Interpretación integrada del macizo ígneometamórfico de la región de El Baúl, estado Cojedes*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- AUDEMARD, F. A., MACHETTE, M., COX, J., DART, R., & HALLER, K. (2000). *Map and database of quaternary faults and folds in Venezuela and its offshore regions*. USGS Open-File report 00-0018. <https://doi.org/10.3133/ofr0018>.
- AUDEMARD, F. E. (1991). *Tectonics of Western Venezuela*. [PhD Thesis]. Rice University, Texas, USA.
- AUDEMARD, F. E. & AUDEMARD, F. A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela; relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, 345(1-4), 299-327.
- AVILA, J., SCHMITZ, M., MAZUERA, F., YEGRES, L., GIL, E., BOLÍVAR, M., MONTILLA, L., & PINTO, H. (2015). Estructura cortical de la región centro-sur de Los Andes de Mérida a partir de perfiles de refracción sísmica de gran ángulo. *Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana*. Jalisco, México.

- AVILA, J., SCHMITZ, M., MORTERA, C., BANDY, W., YEGRES, L. ZELT, C., & G. S. W. GROUP (2021). Crustal structure and tectonic implications of the southernmost Merida Andes, Venezuela, through wide-angle seismic data analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol 116, 103853. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103853>.
- BERMUDEZ, M. A. (2009). Cenozoic exhumation patterns across the Venezuelan Andes: insights from fission-track thermochronology. [Ph.D. Thesis]. Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- BEZADA, M. J., MAGNANI, M. B., ZELT, C. A., SCHMITZ, M., & LEVANDER, A. (2010). The Caribbean-South American plate boundary at 65°W: Results from wide-angle seismic data. *Journal of Geophysical Research*, 115(B8), 1-17.
- BEZADA, M. J., SCHMITZ, M., JÁCOME, M. I., RODRÍGUEZ, J., AUDEMARD, F. & IZARRA, C. (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.
- CEDENO, L. (2011). Modelado Gravimétrico 2D de un perfil en la región noroccidental de Suramérica específicamente en el Bloque Norandino [Tesis de Pregrado], Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- CEDIEL, F., SHAW, R. P., & CCERES, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean block. *Tectonics*. *Tectonics Memoir* 79, 815- 848.
- COLMENARES, L. & ZOBACK, M. D. (2003). Stress field and seismotectonics of northern South America. *Geology* 31(8), 721-724.
- COLLETTA, B., ROURE, F., DE TONI, B., LOUREIRO, D., PASSALACQUA, H. & GOU, Y. (1997). Tectonic inheritance, crustal architecture, and contrasting structural styles in the Venezuela Andes. *Tectonics*, 16(5), 777-794.
- CORTÉZ, M. & ANGELIER, J. (2005). Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes. *Tectonophysics*, 403, 29-58.
- CHACÍN, L., JÁCOME, M. I. & IZARRA, C. (2005). Flexural and gravity modelling of the Mérida Andes and Barinas-Apure Basin, Western Venezuela. *Tectonophysics*, 405(1-4), 155-167.
- CHICANGANA, G., KAMMER, A. & JIMÉNEZ, V. (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. www.capycua.com.co.
- DE TONI, B. & KELLOGG, J. (1993). Seismic evidence for blind thrusting of the northwestern flank of the Venezuelan Andes. *Tectonics*, 12(6), 1393-1409.
- DUERTO, L., ESCALONA A., & MANN, P. (2006). Deep structure of the Mérida Andes and Sierra de Perijá mountain fronts, Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Bull*, 90(4), 505-528.
- FOLINSBEE, R. A. (1972). *The gravity field and plate boundaries in Venezuela* [Ph.D. Thesis]. Massachusetts Institute of Technology- Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, USA.
- GONZÁLEZ, J. M. & MARTINEZ, F. J. (2008). Estudio geofísico integrado en la región de Siquisique, norte del estado Lara [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- GONZÁLEZ, W. G. (2009). Interpretación del Basamento PreCretácico en las Cuencas Barinas-Apure y Oriental de Venezuela [Tesis de Maestría]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- 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. & LAHMEYER, B. (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 [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- HACKLEY, P. C., URBANI, F., KARLSEN, A. W. & GARRITY, C. P. (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 [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

- HERMOSO, O. Y. (2015). Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos en la región Occidental de Venezuela [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- HILST, R. V. D. & MANN, P. (1994). Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. *Geology*, 22(5), 451-454.
- HOSPERS, J. & VAN WIJNEN, J. C. (1958). Rock Densities of the Central Venezuelan Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 69(3), 359-362. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1958\)69\[359:RDOTCV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1958)69[359:RDOTCV]2.0.CO;2)
- INTEVER, P. (2011). Lexico Estratigráfico de Venezuela. <http://www.pdv.com/lexico/>.
- JARVIS, A., REUTER, H. I., NELSON, A., & GUEVARA, E. (2008). Hole-filled seamless SRTM data V4. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- 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 [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- KELLOGG, J. N. & BONINI, W. E. (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 & L. A. BURKLEY (1984). Mesozoic-Pleistocene fission-track ages on rocks of the Venezuelan Andes and their tectonic implications. In Bonini, W. E. Hargraves, R. B. Shagam, R. (Eds). *The Caribbean South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. (Vol. 162), 365-384. Geological Society of America.
- LINARES, F., ORIHUELA, N., GARCIA, A., & AUDEMARD, F. (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.
- LOLLI, M. (2018). Inversión de datos de ruido sísmico ambiental adquiridos en el Proyecto GIAME [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- MALAVÉ, G. & SUÁREZ, G. (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 & M. V. CASTILLO (2006). Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela. *AAPG Bulletin*, 99(4), 445-477.
- MARCHENA, D. (2018). *Modelado magnético de perfiles en la sección sur y central de Los Andes de Mérida (PROYECTO GIAME)*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- MARTINEZ, Y. S. (2012). Caracterización geológica mediante la integración de información geofísica del sector Mantecal-La Estacada, Estado Apure [Tesis de Grado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- MASY, J., SCHMITZ, J. ÁVILA, J., & JÁCOME, M. I. (2007). Modelado bidimensional de la corteza en la zona de colisión Caribe Suramérica en las Antillas de Sotavento. *IX Congreso Geológico Venezolano*. Caracas, Venezuela.
- MAUS, S., BARCKHAUSEN, U., BERKENBOSCH, H., BOURNAS, N., BROZENA, J., CHILDERS, V., DOSTALER, F., FAIRHEAD, J. D., FINN, C., VON FRESE, R. R. B., GAINA, C., GOLYNSKY, S., KUCKS, R., LÜHR, H., MILLIGAN, P., MOGREN, S., MÜLLER, R. D., OLESEN, O., PILKINGTON, M., SALTUS, R., SCHRECKENBERGER, B., THÉBAULT, E., & CARATORI TONTINI, F. (2009). EMAG2: A 2-arc min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements. *Geochemistry. Geophysics. Geosystems.*, 10(8), 1-12. Q08005.
- 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, Caracas, Venezuela.
- MONOD, B., D. DHONT & 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. & DRAKE, C. L. (1963). Physical properties of marine sediments. In Hill, M. N. (Ed). *The Sea*, Vol. 3, (794-815). New York, Interscience.
- NIU, F., BRAVO, T., PAVLIS, G., VERNON, F., RENDON, H., BEZADA, M., & LEVANDER, A. (2007). Receiver function study of the crustal structure of the southeastern Caribbean plate boundary and Venezuela. *Journal of Geophysical Research*, 112(B11), 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 [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- PAVLIS, N. K., HOLMES, S. A., KENYON, S. C. & FACTOR, J. K. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. *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. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11), 10753-10770.
- PÉREZ, K. M. (2014). Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos del perfil guasdualito, edo. Apure-encontrados, edo. Zulia, región Sur Andina [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- PEREZ, O. J. & AGGARWAL, Y. P. (1981). Present-day tectonics of the southeastern Caribbean and northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11), 10791-10804.
- PÉREZ, O. J., BILHAM, R., BENDICK, R., VELANDIA, J. R., HERNÁNDEZ, N., MONCAYO, C., HOYER, M. & KOZUCH, M. (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 & G. LAGOS (1997). Microseismicity, tectonics and seismic potential in southern Caribbean and northern Venezuela. *Journal of Seismology*, 1, 15-28.
- PÉREZ, O. J., WESNOUSKY, S. G., DE LA ROSA, R., MÁRQUEZ, J., UZCATEGUI, R., QUINTERO, C., LIBERAL, L., MORA-PAEZ, H., & SZELIGA, W. (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.
- PINTO, H. G. (2015). Modelado bidimensional de velocidades de ondas p y s en la parte austral de Los Andes de Mérida [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- REQUENA, J. A. & ZAMBRANO, M. D. (2008). Generación de un Modelo Geológico Estructural a Partir de Datos Sísmicos 2d de la Región Central De Zulia Oriental [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- RODRIGUEZ, J. & SOUSA, J. (2003). Estudio geológico-estructural y geofísico de la sección cabo San Roman-Barquisimeto, estados Falcón y Lara [Tesis de Pregrado]. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- RONDÓN, F., CISNEROS, L., CALDERÓN, J., MARCHENA, D., OSCOPIO, V., SÁNCHEZ-ROJAS, J., ROCABADO, V., & SCHMITZ, M. (2020). Modelos Gravimétricos y Magnéticos Corticales 2D Propuestos para los Andes de Mérida. *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*. 35(2), 1-21.
- SAAVEDRA, M. J. (2015). Modelos Corticales De Velocidades En La Región Occidental De Venezuela, Zona Centro-Sur De Los Andes [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- 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, 1-15.
- SANCHEZ, G., H. ROJAS, M. REYES, G. TANG, E. PATIÑO, A. GONCALVES & J. NAMSON (2008). Nuevo modelo estructural de la parte central de La Sierra de Perijá, Venezuela, PDVSA: 6.
- SANCHEZ-ROJAS, J. & PALMA, M. (2014). Crustal density structure in northwestern South America derived from analysis and 3-D modeling of gravity and seismicity data. *Tectonophysics*, 634, 97-115.
- SANTIAGO, N., BELLIZZI, L., ESCORCIA, L., HERNÁNDEZ, M., HERNÁNDEZ, Z., LARA, J., MARCANO, J., MOYA, M., OLIVEROS, R., OROPEZA, Y., PARRA, K., PEÑA, Y. & RIVAS, Y. (2014). *Proyecto Evaluación del sistema petrolífero Apure-Portuguesa*. Petróleos de Venezuela. S.A. (PDVSA).
- SCHMIDT, S. & H. J. GÖTZE (1998). Interactive visualization and modification of 3D-models using GIS-functions. *Physics and Chemistry of The Earth*, 23(3), 289-295.
- SCHMIDT, S. (2007). DbGrav, Beta Versión 2.1, Cálculo de la corrección topográfica basado en el re muestreo de SRTM90 a través del efecto gravimétrico de un prisma. Comunicación personal.
- SCHMITZ, M., J. AVILA, M. BEZADA, E. VIEIRA, M. YÁÑEZ, A. LEVANDER, C. A. ZELT, M. I. JÁCOME & 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 & 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.
- SCHMITZ, M., N. ORIHUELA, J. CHOY, E. GIL, F. MAZUERA-RICO, J. SÁNCHEZ-ROJAS, F. AUDEMARD, M. ARNAÍZ-RODRÍGUEZ, C. REINOZA, F. ARAUJO, O. RITTER, A. LEVANDER, F. NIU, J. ÁVILA, K. GARCÍA, L. YEGRES, J. CRUCES, U. WECKMANN, K. TIETZE, M. CERRADA, J. GONZÁLEZ, G. BARRETO, H. RENDÓN, M. BOLÍVAR, Y. MOLERO & J. LARA (2015). Investigaciones geofísicas integradas para estudiar la estructura litosférica de los Andes de Mérida. X *CONVESIS*. Cumaná, Venezuela: 12.
- STEPHAN, J. F. (1982). Evolution géodynamique du domaine Caraïbe, Andes et chaîne Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Venezuela) [PhD thesis]. Université de Paris, Paris, Francia.
- VARGAS, C. (2002). Estudio aeromagnético de la región central de La Sierra de Perijá, estado Zulia [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- VERROCCHI, Y. (2011). Modelado Gravimétrico 2D de un perfil en la región noroccidental de Suramérica [Tesis de Pregrado]. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- WEBER, J. C., T. H. DIXON, C. DEMETS, W. B. AMBEH, P. JANSMA, G. MATTIOLI, J. SALEH, G. SELLA, R. BILHAM & 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), 75-78.
- ZELT, C. A. & SMITH, R. B. (1992). Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure. *Geophysical Journal International*, 108(1), 16-34.