

ESTRUCTURA LITOSFÉRICA A LO LARGO DE LOS ANDES VENEZOLANOS

FREDDY RONDÓN ^{1,3*}, MICHAEL SCHMITZ ^{1,2,3*}, JAVIER SÁNCHEZ-ROJAS ^{1*}, FERNANDO MAZUERA ^{1,2,4}, LUIS YEGRES ^{1,5},
JESÚS ÁVILA ^{1,6}, LORENA CISNEROS ³, NURIS ORIHUELA ², FRANCK AUDEMARD ¹, MANUEL BOLÍVAR ⁷

¹Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas - FUNVISIS, Dpto. de Geofísica aplicada, 1070 Caracas, Venezuela.

*fjrondon369@gmail.com; mschmitz@funvisis.gob.ve, jsanchez@funvisis.gob.ve.

²Universidad Central de Venezuela - UCV, Caracas, Venezuela.

³Universidad Simón Bolívar - USB, Dpto. de Ciencias de la Tierra, 1080 Caracas, Venezuela.

⁴University of Stavanger, Department of Petroleum Engineering, Stavanger, Norway.

⁵Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada - CICESE, Baja California, México.

⁶Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM. CDMX, México.

⁷PDVSA, Puerto la Cruz, Venezuela.

RESUMEN

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. Estos desplazamientos y regímenes de esfuerzos compresivos formaron diversas estructuras orogénicas como La Sierra de Santa Marta y de Perijá, Los Andes de Mérida y Las Cuencas del Lago de Maracaibo, Barinas-Apure y Falcón. Algunos trabajos científicos han presentado una explicación parcial de la evolución geotectónica de la región, sin embargo, ninguno ha llegado a un resultado específico por lo que la historia de la evolución de Los Andes de Mérida y su relación con las estructuras circundantes no ha sido aclarada aún. Tomando en cuenta estas condiciones, la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) ha llevado a cabo el proyecto de investigación Geociencia Integral de Los Andes de Mérida (GIAME), el cual tiene entre sus objetivos estudiar la evolución geodinámica y tectónica de la región noroccidental de Venezuela, además de las estructuras geológicas aledañas y estimar la profundidad del basamento y el espesor de sedimentos. Todos estos objetivos serán fundamentales para la creación de un modelo de la corteza terrestre de la cordillera de Los Andes de Mérida que permitirá complementar la información estructural y su relación con la raíz gravimétrica del orógeno.

Palabras clave: Estructura Litosférica, Sísmica de refracción profunda, Gravimetría, Modelos de Velocidades, Modelos gravimétricos, Los Andes de Mérida, Placa Suramericana, Bloque Maracaibo.

LITHOSPHERIC STRUCTURE ALONG THE VENEZUELAN ANDES

ABSTRACT

The northwestern region of the South American continent is one of the main active tectonic zones in the world, due to the convergence of the plates of South America, the Caribbean and Nazca. These displacements and regimes of compressive efforts formed diverse orogenic structures such as of The Santa Marta-Perijá Mountain range, The Mérida Andes and The Basements of Maracaibo Lake, Barinas-Apure and Falcón. Some scientific works have partially explained its geotectonic evolution of the region; however, none has reached a specific result. the geologic history of the Mérida Andes and its relationship with the surrounding structures has not been clarified yet. In order to these conditions into consideration, the Venezuelan Foundation for Seismological Research (FUNVISIS) has carried out the Integral Geoscience research project of The Mérida Andes (GIAME), which has among its objectives to study the geodynamic and tectonic evolution of the northwestern region of Venezuela, in addition to the nearby geological structures, and to estimate the depth of the basement and the thickness of the sediments, All these objectives will be fundamental for the creation of a model of the crust of the Andes of Mérida, which will complement the structural information and its relationship with the gravimetric root of the orogen.

Keywords: Lithospheric Structure, Deep Seismic Refraction, Gravimetric, Velocity Models, Gravimetric Models, The Mérida Andes, South American Plate, Maracaibo Block

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto *Geociencia Integral de Los Andes de Mérida* (GIAME) se realizaron en los años 2012 a 2015 investigaciones litosféricas de Los Andes de Mérida con la adquisición de tres perfiles sísmicos de gran ángulo, perpendiculares al rumbo del orógeno, y algunos perfiles complementarios a lo largo del eje de la cadena, para una longitud total de ~2500 km de datos sísmicos 2-D, así como 2692 mediciones gravimétricas a lo largo de los perfiles y espacialmente distribuidos en la región (Figura 1), cuyos resultados se reportan en este trabajo (Ávila et al., 2015; Saavedra, 2015; Schmitz et al., 2015; Calderón et al., 2016; Cisneros et al., 2016; Flores et al., 2016; Pinto et al., 2016;

Rondón et al., 2016; Schmitz et al., 2016; Ávila et al., 2017; Celis, 2017; Medina, 2017; Yegres et al., 2017; Mazuera-Rico et al., 2018). El principal objetivo de este proyecto es el de determinar la estructura litosférica del occidente de Venezuela con la finalidad de refinar los modelos geodinámicos de la región, y con ello mejorar el cálculo de la amenaza sísmica (Schmitz et al., 2015).

Por lo que enfocamos nuestro análisis de la estructura litosférica del orógeno en los tres perfiles perpendiculares, que permiten evaluar las diferencias a lo largo de la cadena mediante las estructuras obtenidas por la sísmica y gravimetría, así como el análisis de las deformaciones en superficie para relacionar las diferencias en las estructuras litosféricas a la dinámica de la región.

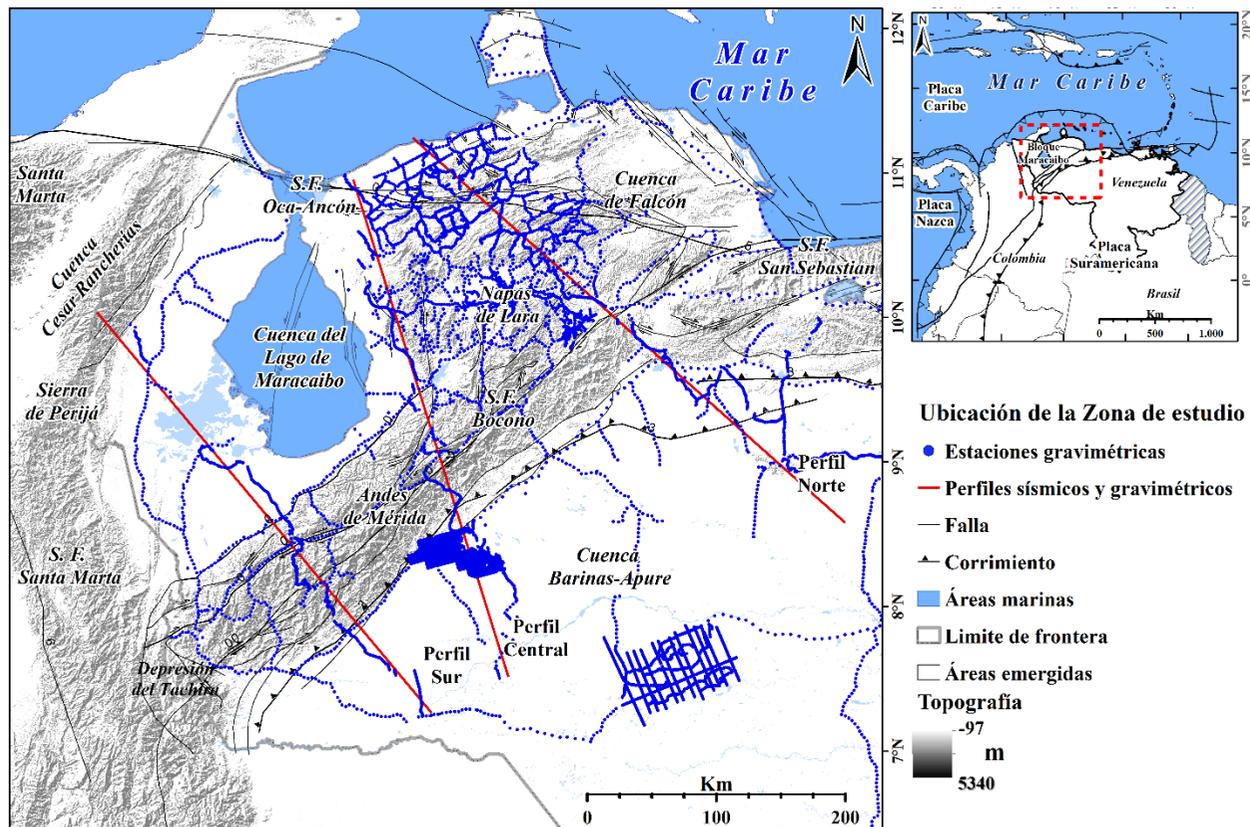


Figura 1. Mapa de ubicación de perfiles sísmicos y estaciones gravimétricas adquiridas en el marco del proyecto GIAME. Sistema de fallas de Venezuela (Audemard et al., 2000) sobre modelo digital de elevaciones (Jarvis et al., 2008).

MARCO GEOTECTÓNICO

Como resultado de la interacción de Las Placas del Caribe, Nazca y Suramérica se tiene una compleja zona de deformación en el occidente de Venezuela, en la cual destacan los Andes de Mérida con las cuencas de Maracaibo y de Barinas-Apure en ambos flancos, así como las napas de Lara y la cuenca de Falcón en el noroeste. El sistema de fallas transcurrentes de Boconó atraviesa longitudinalmente los Andes de Mérida (Figura 1). 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; Amaiz-Rodríguez 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.

METODOLOGÍA

DATOS GRAVIMÉTRICOS

Los trabajos gravimétricos comprendieron 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; esta tarea fue ejecutada mediante la

medición de circuitos cerrados en localidades de gravedad conocida y variaciones de altura significativa y mediciones sobre una vertical con cambio de altura en varias decenas de metros. Debido a la gran extensión del área de estudio de este proyecto la adquisición en el área de estudio se abordó dividiendo la región occidental de Venezuela en tres zonas, integradas por diferentes estados y 3 perfiles, de ubicación similar los perfiles sísmicos (Figura 1). se asumió una densidad de 2670 kg/m^3 , debido a que este valor es cercano a la densidad media de las rocas en superficie del área de estudio. El procesamiento consistió en el cálculo de la anomalía de Bouguer (AB) de la zona de estudio (Figura 2).

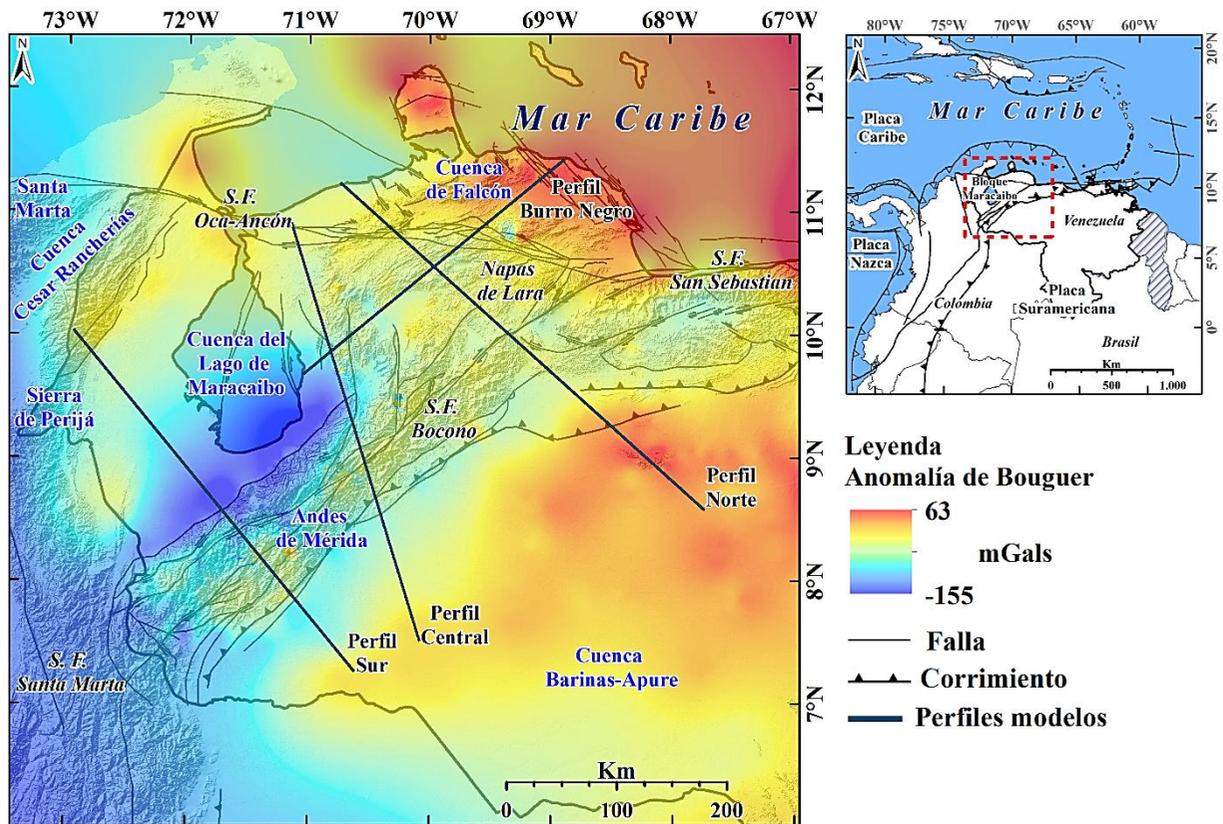


Figura 2. Mapa de anomalía de Bouguer del Occidente de Venezuela.

La interpretación de los datos se realizó mediante la implementación de diferentes técnicas, iniciando con la integración de la información en un Sistema de Información Geográfico (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 fueron generados modelos gravimétricos 2D de cada perfil (Cisneros et al., 2016; Rondón et al., 2016).

DATOS SÍSMICOS

El diseño técnico, en cuanto al control de la cobertura, longitud de los perfiles, distancias entre sitios de fuente, y

demás parámetros a establecer para el desarrollo de la sismica de gran ángulo de los perfiles sísmicos planteados para el proyecto GIAME fue desarrollado por Avila et al., (2015). Ellos realizaron un estudio de cobertura partiendo del diseño inicial planteado para la sismica del proyecto GIAME; luego de estudiar los diferentes modelos corticales de la génesis y evolución de Los Andes de Mérida propuestos hasta la actualidad generaron un modelo de entrada inicial basado en la interpretación de la mayor cantidad de datos geológicos y geofísicos disponibles. Al mismo tiempo generaron fases corticales sintéticas Pg (Refracciones en la capa de sedimentos y corteza superior), PmP (Reflexiones en la interfase corteza-manto) y Pn (Refracciones en el manto superior) basándose en estudios previos en los Alpes

Europeos (A nivel de estructura, génesis y evolución es similar a Los Andes de Mérida), así como también a 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 los instalaciones en el año 2015. En este trabajo nos enfocamos en las instalaciones llevadas a cabo a lo largo de los tres perfiles principales que cruzan la cordillera de Los Andes de Mérida.

PERFIL ANDES NORTE

Como parte de las mediciones sísmicas del proyecto

GIAME (Geociencia Integral de Los Andes de Mérida), en el perfil Andes Norte de 560 km de longitud ([Figura 1](#)), se colocaron un total de 545 estaciones sísmológicas portátiles (*Texans*) con las cuales se grabaron las voladuras de 13 sitios con cargas explosivas de Pentolita+Anfo (200-1600 kg), emplazadas en pozos de 60 m de profundidad. Esto con la finalidad de emplear los datos obtenidos para generar modelos bidimensionales de velocidad de ondas “P”, a partir de la inversión tomográfica de las primeras llegadas y del modelado por trazado de rayos. Para con ello determinar las zonas de sutura, la estructura cortical y del manto litosférico en el margen continental. Los *Texans* fueron instalados en distancias de entre 0,5 a 1 km, con un intervalo de muestreo de 10 ms ([Figura 3](#)).

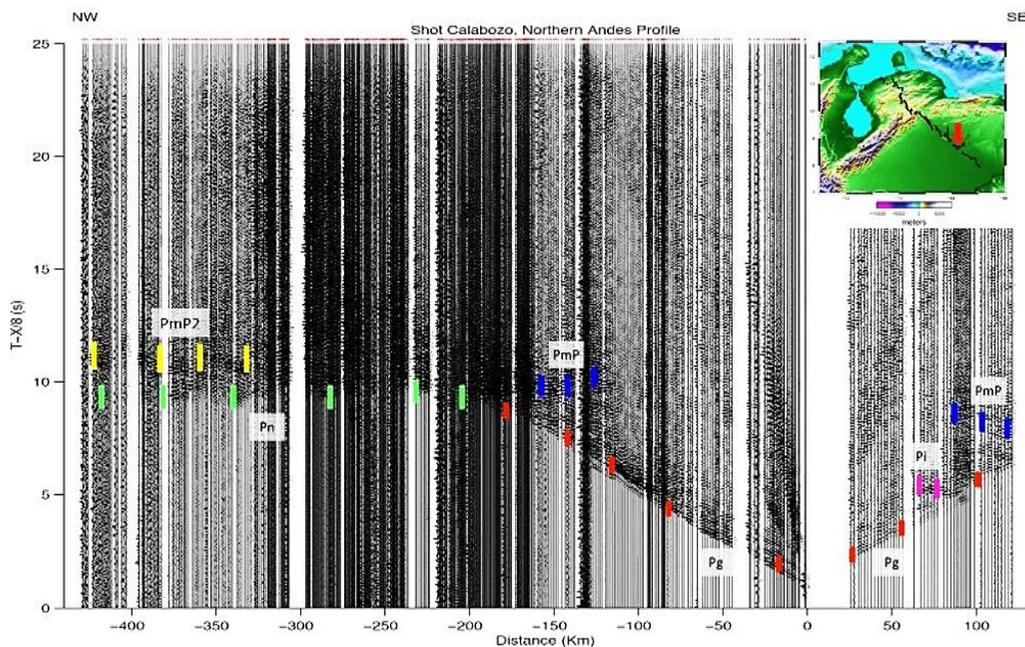


Figura 3. Sección sísmica del Perfil Andes Norte, disparo Calabozo, $V_{red}=8\text{km/s}$ ([Mazuera-Rico et al., 2018](#)).

PERFIL ANDES CENTRAL

El perfil Andes Central tiene una longitud de 380 km y se extiende desde la costa del estado Falcón ([Figura 1](#)), en su límite noroeste y atraviesa de forma perpendicular la cordillera de los Andes merideños hasta su extremo sureste en la cuenca de Barinas-Apure con 10 puntos de disparo, para este perfil fueron empleados un total de 475 sismógrafos digitalizadores independientes REF-TEK 125A (*Texan*).

Gran parte del procesamiento sísmico fue desarrollado implementando una rutina de MATLAB elaborada por los profesores Mariano Arnaiz (Universidad Central de Venezuela) y Maximiliano Bezada (University of

Minnesota), denominado SEISLOT ([Arnaiz R. et al., 2014](#)).

A partir de la metodología aplicada, se obtuvieron secciones sísmicas para cada disparo realizado en el perfil Andes Central, esto a partir de un riguroso procesamiento que permitió caracterizar lo más claramente posible las fases corticales de interés, como lo son: fase Pg (refracción en la corteza superior), fase Pi (reflexión intracortical), fase PmP (reflexión en la discontinuidad de Mohorovicic) y finalmente la fase Pn (refracción en el manto superior), adicionalmente en algunos disparos se aprecia una llegada reflectiva profunda, con la que se infiere un cambio importante de velocidades en el manto superior. ([Figura 4](#)).

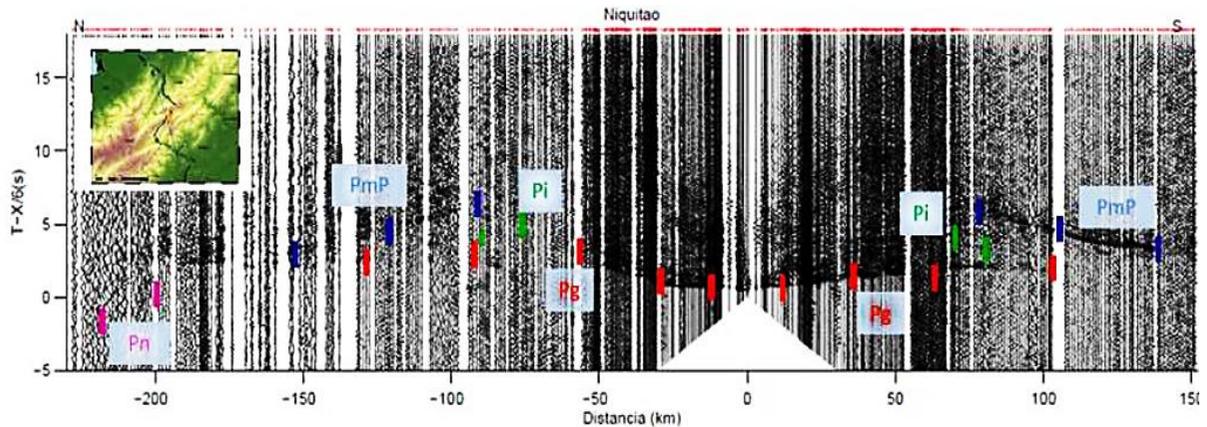


Figura 4. Sección sísmica del Perfil Andes Central, disparo Niquitao, $V_{red}=6\text{km/s}$ (Yegres et al., 2017).

PERFIL ANDES SUR

El perfil Andes Sur tiene una longitud de 500 km, dispuesto en un rumbo noroeste - sureste, desde la Serranía de Perijá hasta la cuenca de Barinas-Apure. Cabe mencionar que el modelo de (Medina, 2017), tiene una longitud diferente a la longitud total del perfil Andes Sur (260 km) por el alcance de sus datos sísmicos que básicamente se limitan a la Cadena montañosa. 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 de las fuentes de explosión a lo largo de este perfil (Figura 5). 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 SEISPLOTT (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 sísmica de refracción profunda, para toda la corteza y la parte superior del manto. 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.

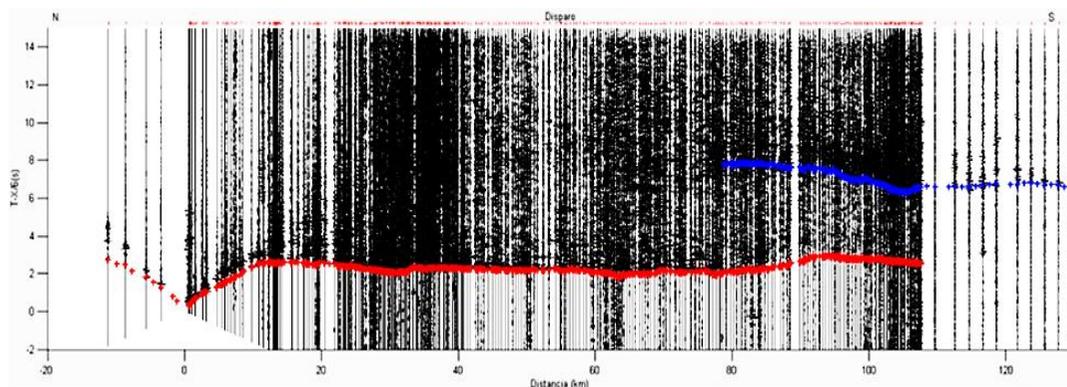


Figura 5. Sección sísmica del Perfil Andes Sur, disparo Refl. 26 en el flanco norte de los Andes, $V_{red}=6\text{km/s}$ (Medina, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSION

En el mapa de anomalía de Bouguer (AB) observada (Figura 2) se puede observar sobre el flanco norte del sistema de fallas Boconó un mínimo gravimétrico con un valor de aprox. -120 mGal, correspondiente a la respuesta gravimétrica regional de la raíz cortical de Los Andes de Mérida, a los sedimentos de la cuenca del lago de Maracaibo, y a la posible existencia de una subducción de tipo A; producto de la colisión de La Placa Suramericana

con el Bloque Maracaibo (Arnaiz-Rodríguez et al., 2011; Rondón et al., 2016). Sobre Los Andes de Mérida se observan valores de AB cercanos a -100 mGal, que disminuyen hacia el Norte, cercano a Barquisimeto, a valores alrededor de -50 mGal. Hacia la cuenca del lago de Maracaibo los valores de AB están en el rango entre -120 y -60 mGal, en la Cuenca Barinas-Apure el valor de AB está en el rango de -80 a -65 mGal. Estas respuestas se asocian con la profundidad del basamento y el espesor de los sedimentos de ambas cuencas.

“PERFIL ANDES NORTE”

A lo largo del perfil Andes Norte el espesor cortical oscila alrededor de 40 km, con una disminución en la cuenca de Falcón de valores de ~30 km que puede ser vista como una extensión del adelgazamiento cortical identificado en el este y por debajo de la cuenca de Falcón a lo largo de la extensión occidental del sistema de fallas Oca-Ancón, que ha sido interpretada como una cuenca extensiva de Trasarco (e.g. Sousa et al., 2005; Bezada et al., 2008).

Adicionalmente no se visualiza una raíz cortical asociada a Los Andes de Mérida, observación congruente entre los análisis sísmicos (Mazuera-Rico et al., 2018) y gravimétricos (Figura 7 y Figura 7) en contraposición a lo observado en los otros dos perfiles suroccidentales, lo cual indica que el perfil Andes Norte se localiza fuera del dominio cortical andino. Hacia la Cuenca de Guárico existen evidencias de la presencia de una cuenca profunda antepaís Paleozoica.

Las velocidades sísmicas de las ondas P (V_p) en el perfil sísmico Andes Norte (Figura 7), varían entre 3,2 a 5,75 km/s para la cobertura sedimentaria y 5,5 a 6,3 km/s para las rocas Paleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas del orógeno Andino. V_p de la corteza superior varía entre 6,15 y 6,55 km/s, y de la corteza inferior, zona de transición del “Moho” y el manto superior entre 6,75 y 8,3 km/s. Las apreciables diferencias en las estructuras de velocidad sugieren zonas de sutura entre las iii provincias Proterozoica y Paleozoica (sutura de Ouachita-Marathon), y los terrenos Paleozoicos y Meso-Cenozoicos (sutura peri-Caribe) (Mazuera-Rico et al., 2018). Las densidades observadas en el modelo gravimétrico son de 2,7 a 2,75 g/cm^3 para la corteza superior, 2,8 g/cm^3 para la corteza inferior y 3,2 g/cm^3 para el manto superior. Se observa el cierre de la Cuenca de Maracaibo con la exhumación de cuerpos del Paleoceno y Eoceno, que no se caracterizan por generar valores mínimos de anomalía, sino más bien valores que superan en este caso a los generados por el flanco Sur-Andino, donde se alcanzan valores de aproximadamente -60 mGal (Figura 7).

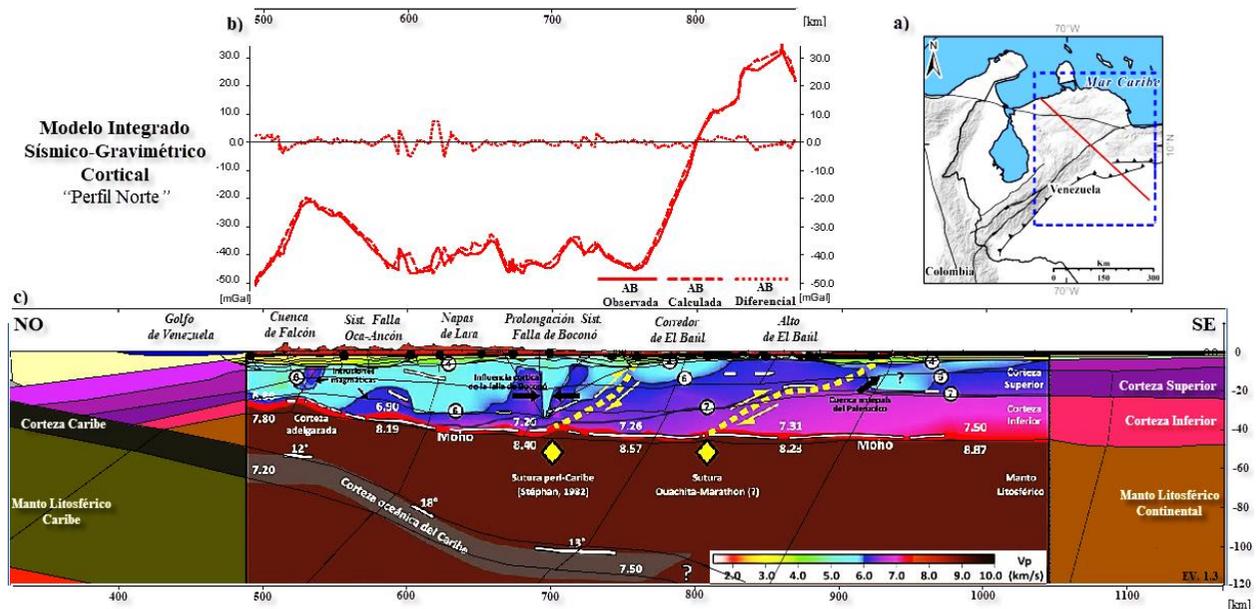


Figura 6. Integración del modelo de velocidades (V_p) del perfil sísmico Andes Norte (Mazuera-Rico et al., 2018), con el modelo gravimétrico Andes Norte, realizado con datos gravimétricos GIAME y EGM2008 (Pavlis et al., 2008). (a) Ubicación regional. (b) Curvas de Anomalía de Bouguer integrada (Observada vs calculada del modelo y residual). (c) Modelo integrado cortical 2D Andes Central. Interpretación de la estructura litosférica del noroccidente de Venezuela. Se muestra la localización a lo largo de la superficie de los Texan (círculos rojos) y los disparos en tierra (círculos negros) empleados en la construcción del modelo. La superficie del Moho visualizada a partir de la inversión ZS92 se muestra en blanco, mientras que la derivada a partir del método ZB98 se representa como una línea roja gruesa. Del mismo modo, se representan algunas reflexiones sobre segmentos de la corteza (“PiucP” y “PlcP”) y las provenientes del tope de la losa del Caribe “PmP2” (líneas blancas). Los rombos amarillos representan la posición sugerida para las zonas de sutura (líneas amarillas segmentadas) entre los terrenos Proterozoico y Paleozoico, y entre los terrenos Paleozoico y Meso-Cenozoico. La topografía en el tope del modelo, se representa de manera exagerada (Mazuera-Rico et al., 2018).

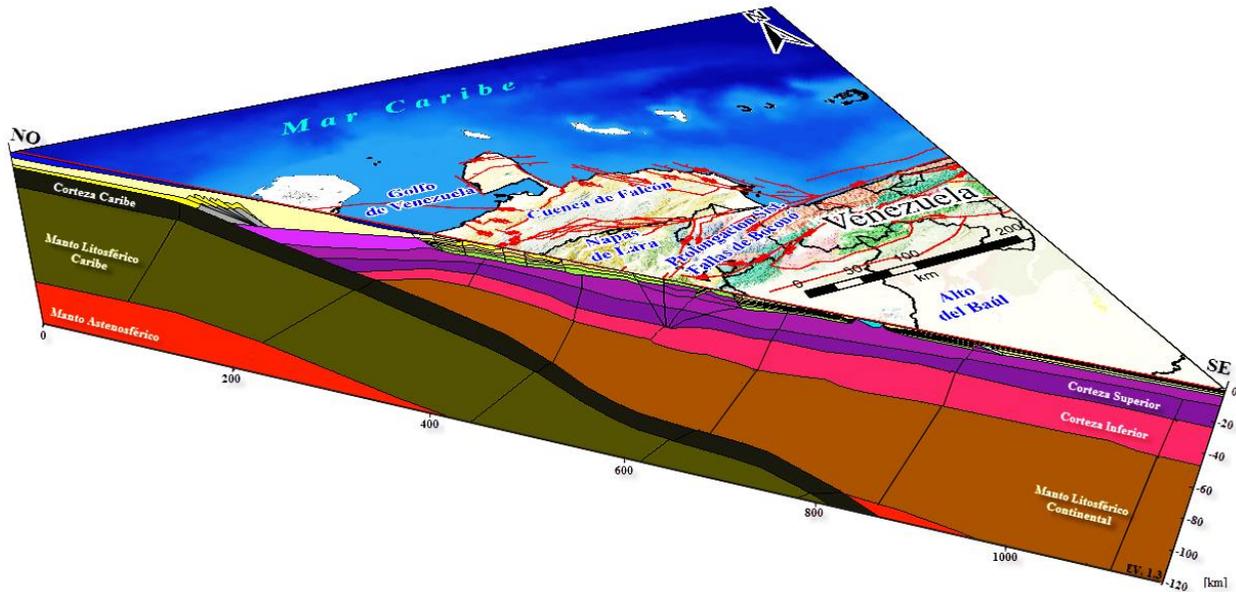


Figura 7. Vista 3D del Modelo gravimétrico 2D del perfil Andes Norte, en ella se observa la subducción Tipo B de La Placa del Caribe debajo del continente Suramericano, en este perfil no se visualiza una raíz cortical asociada a Los Andes de Mérida por lo que se asume que el perfil Norte pudiera encontrarse fuera del dominio andino.

El mínimo gravimétrico observado en la curva de anomalía de Bouguer es de aproximadamente -60 mGal, esto permite inferir que la discontinuidad de moho se hace más profunda hacia el sur de Los Andes de Mérida donde la subducción tipo A parece haber alcanzado mayores profundidades (Celis, 2017).

El moho es más somero en el perfil Andes Norte con respecto a los perfiles Andes Central y Andes Sur, donde incluso para La Placa Suramericana se reportan valores de 35 km de profundidad. Esto puede deberse a que al norte hay menor influencia por parte del cinturón orogénico. La losa de la corteza oceánica de La Placa Caribe fue reconocida en un contexto de subducción plana, o de bajo ángulo, por debajo del Noroccidente de Venezuela.

“PERFIL ANDES CENTRAL”

El modelado sísmico (Figura 9) de la estructura de la corteza del perfil Central a lo largo de Los Andes de Mérida permitió muestrear a partir de un riguroso procesamiento las fases corticales de interés, como lo son: fase Pg (refracción en la corteza superior), fase Pi (reflexión intracortical), fase PmP (reflexión en la discontinuidad de Mohorovicic) y finalmente la fase Pn (refracción en el manto superior), adicionalmente en algunos disparos de aprecio una llegada reflectiva profunda, con la que se infiere un cambio importante de velocidades en el manto superior. Se identificó la corteza media y superior por llegadas de Pg hasta 15 km de profundidad con altos contrastes de velocidad lateral debido a la elevación andina y la consiguiente sedimentación asociada hacia ambos flancos de la

cordillera. La profundidad máxima de 52 km, controlada por las reflexiones PmP, se desplaza con respecto a la altitud más alta en el perfil Central, aproximadamente 20 km hacia el noroeste.

A lo largo del perfil Andes Central se observa una raíz cortical clara, tanto en el perfil proveniente del análisis de los datos sísmicos (Figura 9), como en el perfil con los datos gravimétricos (Figura 9 y Figura 10). Los valores derivados para la profundidad de la discontinuidad de Moho varían desde 29 km de profundidad para la cuenca Falcon, hasta 40-53 km cerca del núcleo de la cadena, y 35 km en el extremo sur del perfil en la cuenca Barinas-Apure. La raíz cortical se define con una profundidad máxima de 53 km, que se desplaza con respecto a la parte más alta de la cadena en este segmento, aproximadamente 10 km hacia el noroeste.

El modelo sísmico Andes Central (Figura 9) consta de 5 capas, la primera de ellas representativa de los sedimentos cenozoicos, con un rango de velocidad promedio de 2 a 4 km/s, los cuales están sustentados por una segunda capa definida como sedimentos cretáceos, ($V_p = 4$ a 5 km/s) con una profundidad máxima de 10 y 6 km en las cuencas Maracaibo y Barinas-Apure, respectivamente.

Una tercera capa, estipulada como el basamento cristalino infrayace por debajo de las cuencas y que aflora en la cordillera andina, con velocidades promedio entre 5,5 y 6,3 km/s con una densidad de $2,78 \text{ g/cm}^3$ hasta alrededor de 15 km debajo de las cuencas y 25 km debajo del orógeno. La corteza inferior y cuarta capa es la corteza inferior por encima de la discontinuidad de Moho,

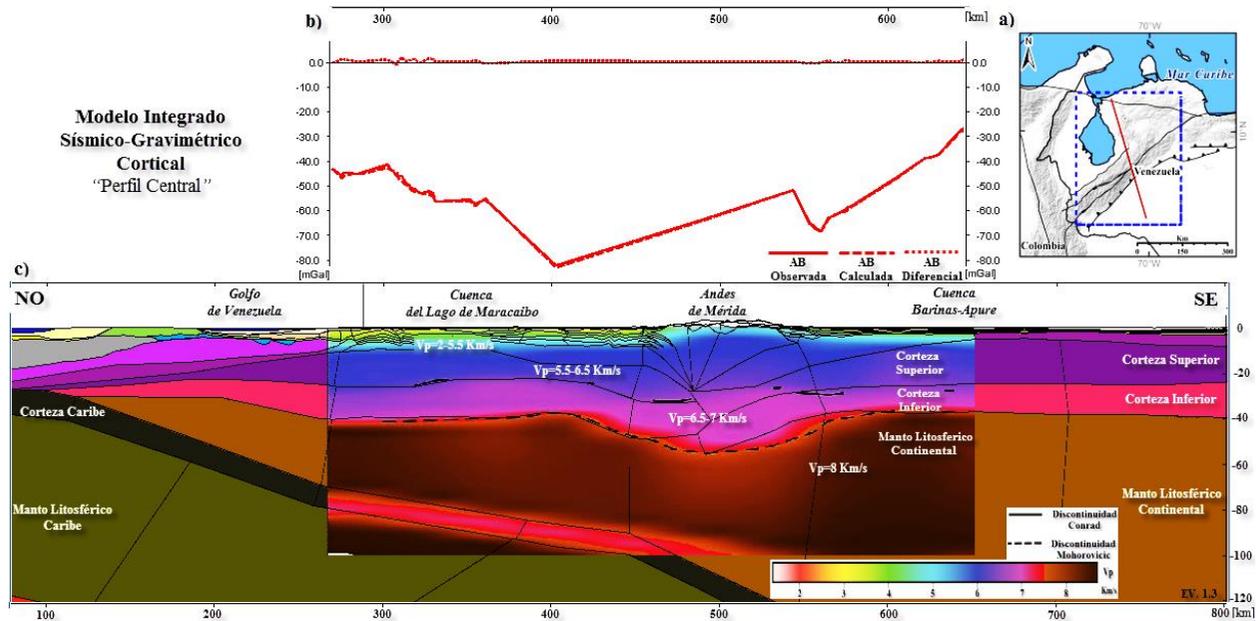


Figura 8. Integración del modelo de velocidades (V_p) del perfil sísmico Andes Central (Yegres et al., 2017) (modelo con líneas punteadas), con el modelo gravimétrico Andes Central (Cisneros et al., 2016) (líneas continuas), realizado con datos gravimétricos GIAME y EGM2008 (Pavlis et al., 2008). (a) Ubicación regional. (b) Curvas de Anomalía de Bouguer integrada (Observada vs calculada del modelo y residual). (c) Modelo integrado cortical 2D Andes Central.

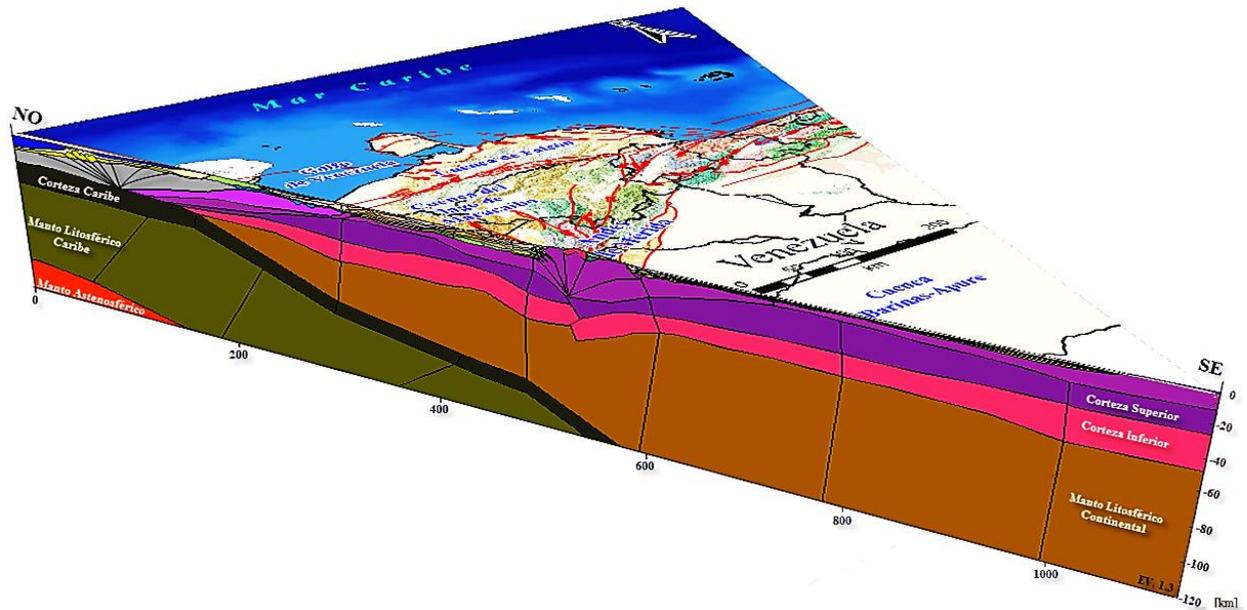


Figura 9. Vista 3D del Modelo gravimétrico 2D del perfil Andes Central, en ella se observa la subducción Tipo B de La Placa del Caribe debajo del continente suramericano, así como, la subducción tipo A incipiente de la litósfera suramericana por debajo del bloque de Maracaibo, en este perfil la raíz del Orógeno de los Andes de Mérida alcanza ~53 km.

presenta un rango de velocidades promedio de 6,5 a 7 km/s y una densidad de $2,84 \text{ g/cm}^3$, sustentada finalmente por una quinta capa correspondiente al manto litosférico superior, con velocidades superiores V_p mayor a 7,7 km/s con una densidad de $3,22 \text{ g/cm}^3$. El modelo gravimétrico (Figura 9 y Figura 10) sugiere en base al comportamiento de la anomalía de Bouguer que la

compensación tiene un carácter regional. Este modelo propone la existencia de una subducción A incipiente de Suramérica continental hacia el bloque de Maracaibo, la flexión de La Placa Suramericana es producida por la carga orogénica de los Andes de Mérida y la Cuenca de Barinas-Apure, mientras que la flexión del Bloque de Maracaibo es producida por la subducción tipo A de La

Placa Suramericana y por la gran carga sedimentaria que soporta. El modelo de densidad que mejor se adapta a las observaciones gravimétricas a lo largo del perfil Central en Mérida Andes es un modelo del orógeno flotante con subducción incipiente tipo A con inclinación hacia el noroeste.

Los Andes de Mérida fueron modelados asumiendo las mismas conclusiones de (Audemard y Audemard, 2002) de la existencia de “subducción suave en incipiente buzante hacia el NO, a mayor escala de un orógeno flotante”. Los máximos gravimétricos hallados en el orógeno 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. Este orógeno generó la cuenca antepaís de Barinas-Apure a un lado mientras que flexiono fuertemente la cuenca de Maracaibo hacia el otro lado donde una profunda cuenca flexural se desarrolló en asociación con retrocorrimientos a lo largo del piedemonte en el noroeste

“PERFIL ANDES SUR”

En el perfil Andes Sur (Figura 11 y Figura 11) se observa una raíz cortical que no se encuentra simétrica al eje del orógeno, sino unos 30 km desplazada hacia el Noroeste. Los sedimentos del Plioceno muestran 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 – Cretácico con Vp de 4,5 a 5,2 km/s, densidades de 2,45-2,51 g/cm³ y una profundidad entre 9-10 km, lo que marca el basamento de la cuenca de Maracaibo, para la corteza superior, desarrollada durante el Triásico Superior, las velocidades 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 NE se observa en el modelo de velocidad la tendencia de estas capas a ser cada vez más delgadas. 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

Cretácico 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. 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-Rodríguez et al., 2011; Rondón et al., 2016). La corteza inferior tiene Vp de 6,4 a 6,85 km/s hasta 40-45 km de profundidad marcando la Discontinuidad de Mohorovicic (Rondón et al., 2016) (densidades de 2,8 - 2,9 g/cm³). Las velocidades Vp del manto superior son mayores a 7,5 km/s, con densidades entre 3,15 y 3,25 g/cm³.

La topografía está más marcada en los dos perfiles al sur, disminuyendo al norte, donde estructuralmente, el perfil Andes Norte (Figura 7) se encuentra fuera del dominio de los Andes. De igual manera, el núcleo cristalino de los Andes varía de 30 km en el perfil Andes Norte. a 50 km en el perfil Andes Central hasta aumentar a 80 km de ancho en el perfil Andes Sur, de igual manera se observó una mayor exhumación de rocas más antiguas en el Sur indicada por Celis, (2017) observando los tres perfiles que cruzan los Andes de Mérida y que puede estar asociada a la subducción incipiente de La Placa Suramericana por debajo del Bloque de Maracaibo que se desarrolla de Norte (donde no se observa) a Sur.

A diferencia del perfil Central, en este, se observa la raíz del orógeno de los Andes de Mérida más desplazada hacia el flanco noroccidental de la cadena andina. Además, la corteza inferior es más gruesa en este perfil disminuyendo su grosor hacia el noreste (Figura 11 y Figura 11), pero en compensación la corteza superior se hace más gruesa hacia el centro de la Cadena de Los Andes de Mérida.

Los modelos se ajustan al modelo del orógeno flotante (Audemard y Audemard, 2002). donde La Placa Caribe subduce por debajo del Bloque Maracaibo y La Placa Suramericana, 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 tener mayor densidad.

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 NO, producto de la carga del Bloque Maracaibo en la que Los Andes de Mérida funcionan como una cuña de apilamiento de corteza frágil. Se observa que Los Andes de Mérida son una cadena montañosa asimétrica con estructura de flor positiva y cuya raíz cortical se encuentra desplazada hacia el NO.

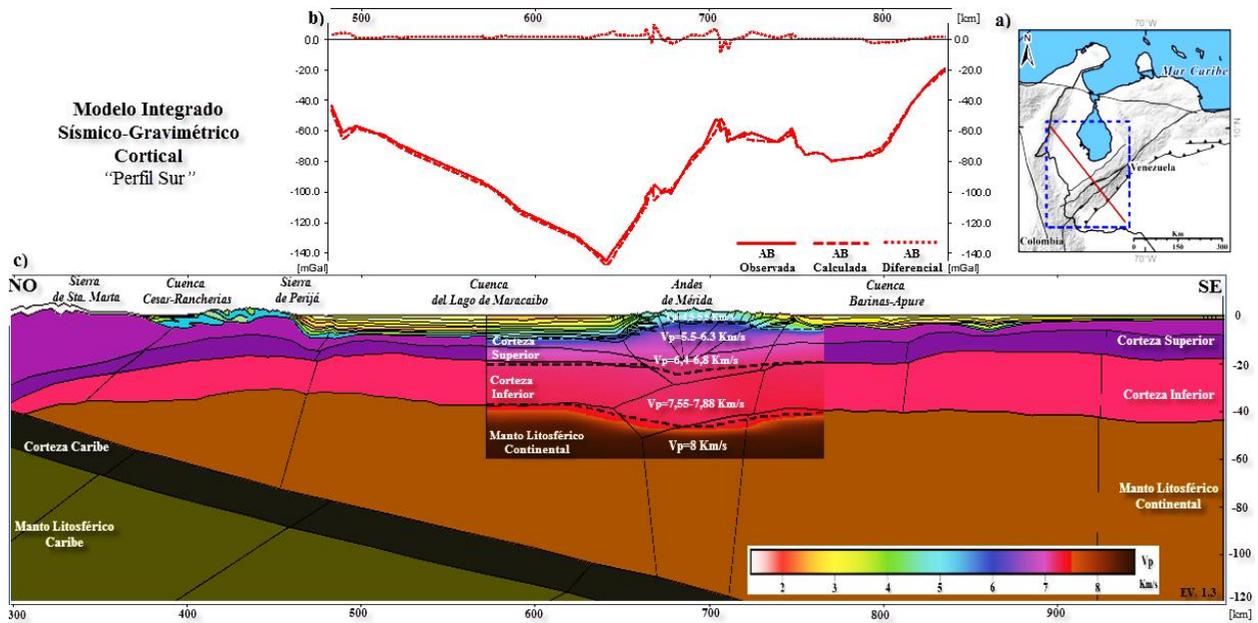


Figura 10. Integración del modelo de velocidades (V_p) del perfil sísmico Andes Sur (Medina, 2017) (modelo con líneas punteadas), con el modelo gravimétrico Andes Sur (Rondón et al., 2016) (líneas continuas), realizado con datos gravimétricos GIAME y EGM2008 (Pavlis et al., 2008). (a) Ubicación regional. (b) Curvas de Anomalía de Bouguer integrada (Observada vs calculada del modelo y residual). (c) Modelo integrado cortical 2D Andes Sur.

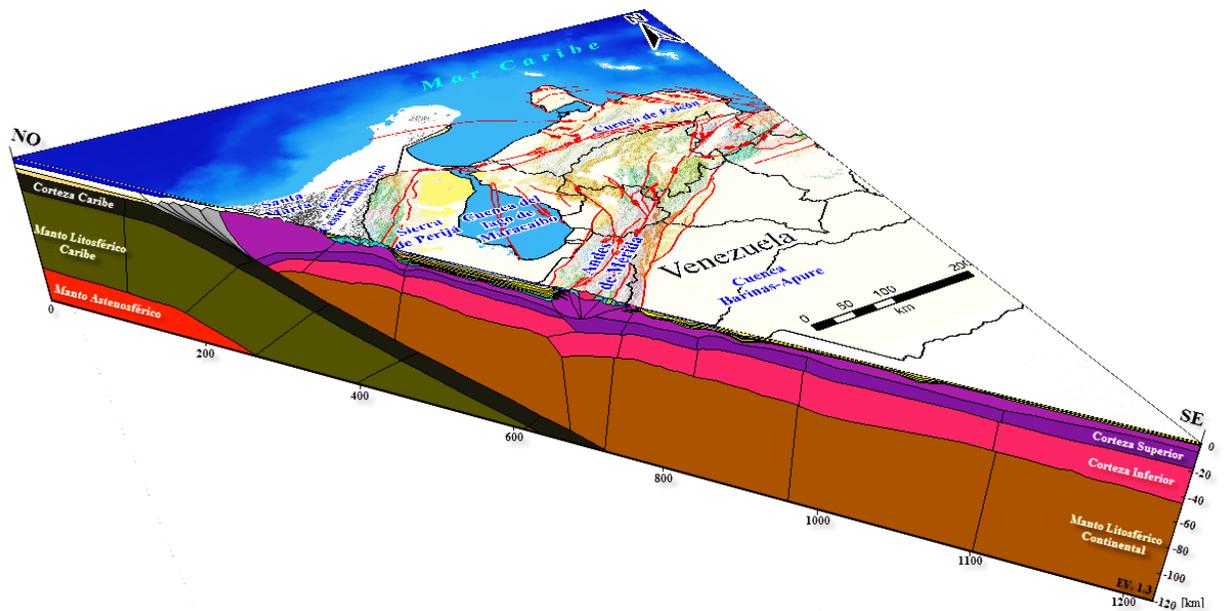


Figura 11. Vista 3D del Modelo gravimétrico 2D del perfil Andes Sur (Rondón et al., 2016), en ella se observa la subducción Tipo B de la Placa del Caribe debajo del continente Suramericano así como, la subducción tipo A incipiente de la litósfera Suramericana por debajo del bloque de Maracaibo, en este perfil la raíz del Orógeno de los Andes de Mérida alcanza ~55 km.

CONCLUSIONES

Los Andes de Mérida (MA) es un orógeno que delimita el bloque de Maracaibo al oeste en respuesta a la subducción de La Placa del Caribe debajo del continente suramericano. Los estudios gravimétricos y sísmicos realizados en los MA en el marco del proyecto GIAME han evidenciado

variaciones importantes de la litósfera a lo largo del orógeno. El modelado sísmico y gravimétrico de la estructura litosférica de MA se realizó a lo largo de 3 perfiles. En el perfil Andes Norte no se observa una raíz cortical, por lo cual se infiere que se encuentra fuera del dominio andino propiamente dicho.

En los perfiles Andes Central y Andes Sur, la raíz andina, que varía entre 45 y 53 km de profundidad, está desfasada unos 30 km hacia el Noroeste respecto a la expresión topográfica del orógeno. Según los modelados gravimétricos y sísmicos, este desfase corresponde a una subducción tipo A incipiente de la litósfera suramericana por debajo del bloque de Maracaibo. El sistema de compensación de MA no es isostático, sino corresponde a la configuración de Placas en el límite entre Suramérica y el bloque de Maracaibo, lo que permite el balanceo de masas en la región.

A diferencia del perfil Central, en el perfil Sur, se observa la raíz del orógeno de los Andes de Mérida más desplazada hacia el flanco noroccidental de la cadena andina, además la corteza inferior es más gruesa en este perfil disminuyendo su grosor hacia el noreste, pero en compensación la corteza superior se hace más gruesa hacia el centro de la Cadena de Los Andes de Mérida.

La flexión de La Placa Suramericana se produce por el levantamiento de MA y por el espesor sedimentario de la cuenca Barinas-Apure, mientras que el bloque de Maracaibo se flexiona debido a la subducción incipiente de La Placa Suramericana y a la carga sedimentaria de casi 10 km de espesor.

La configuración tectónica en la región central y sur de MA es más compleja que en la región norte. Esto se ve reflejado en los afloramientos de unidades geológicas de edad Precámbrico, Paleozoico y Jurásico en la región central y sur y no en la región norte, donde las unidades que afloran son de edades del Cretácico y más jóvenes.

El modelo de densidades presenta menores valores para la corteza del bloque de Maracaibo que para La Placa Suramericana. La existencia de un mínimo gravimétrico absoluto (~ -120 mGal) con dirección SO-NE, que coincide con el flanco Norandino, podría deberse al desplazamiento cortical de la raíz de MA por la existencia de la subducción tipo A bajo el bloque de Maracaibo y al importante depocentro de la Cuenca de Maracaibo en el piedemonte, generado por la flexión producida por el levantamiento orogénico.

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

REFERENCIAS

- 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 R., M. S., M. BEZADA y M. SCHMITZ (2014). "SEISPLOT: Un código interactivo para mostrar y seleccionar las primeras llegadas en sísmica de gran ángulo." Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería (JIFI). U. Facultad de Ingeniería. 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. 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, F. MAZUERA, L. YEGRES, E. GIL, M. BOLÍVAR, L. MONTILLA y H. PINTO (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.
- ÁVILA, J., M. SCHMITZ y J. SÁNCHEZ-ROJAS (2017). "Modelado sintético de perfiles sísmicos de gran ángulo para estudios de cobertura de interfaces usando fuentes sísmicas". XI CONVESIS. Caracas, Venezuela: 12.
- 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.
- CALDERÓN, J., J. SÁNCHEZ-ROJAS, V. ROCABADO y M. SCHMITZ (2016). "Modelado gravimétrico 2,5D del perfil Burro Negro ubicado en el Noroccidente de Venezuela". Jornadas de Investigación, Facultad de Ingeniería UCV, JIFI 2016. Caracas, Venezuela.
- CELIS, S. (2017). "*Modelado gravimétrico 3D de los Andes de Mérida*" Proyecto de Grado presentado ante la Ilustre Universidad Simón Bolívar como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Geofísico, Universidad Simón Bolívar. 105
- CISNEROS, L., J. SÁNCHEZ-ROJAS y V. ROCABADO (2016). "Modelado gravimétrico 2D del perfil central del proyecto GIAME en el noroccidente venezolano". Jornadas de Investigación, Facultad de Ingeniería UCV, JIFI 2016. Caracas, Venezuela: 8.

- 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.
- 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.
- FLORES, L., M. SCHMITZ, J. ÁVILA y E. GIL (2016). "Crustal structure across the northwestern region of Venezuela, Northern Andes profile, from wide-angle seismic data". IASPEI Regional Assembly. San José, Costa Rica.
- FOLINSBEE, R. A. (1972). "*The gravity field and plate boundaries in Venezuela*". PhD, Mass. Inst. of Technology-Wodds Hole Oceanog. Inst.160
- HOSPERS, J. y J. C. VAN WIJNEN (1958). "ROCK DENSITIES OF THE CENTRAL VENEZUELAN ANDES." *Geological Society of America Bulletin* 69(3): 359-362.
- 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)*.
- 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.
- 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.
- 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.
- PINTO, H., M. SCHMITZ, J. ÁVILA, L. MONTILLA, E. GIL y G. A. S. W. GROUP (2016). "Velocity model across the southern part of the Merida Andes, Venezuela, from wide angle seismic profiles". IASPEI Regional Assembly. San José, Costa Rica.
- 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
- 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 y J. LARA (2015). "Investigaciones geofísicas integradas para estudiar la estructura litosférica de los Andes de Mérida". X CONVESIS. Cumaná, Venezuela: 12.
- SCHMITZ, M., J. SÁNCHEZ, F. MAZUERA, L. YEGRES, J. ÁVILA, E. GIL, N. ORIHUELA y G. A. S. W. GROUP (2016). "Gross crustal structure of the Merida Andes, Venezuela, from seismic wide angle and gravimetric studies". IASPEI Regional Assembly. San José, Costa Rica.
- SOUSA, J., J. RODRÍGUEZ, C. GIRALDO, I. RODRÍGUEZ, F. A. AUDEMARD y R. ALEZONES (2005). "An integrated geological-geophysical profile across northwestern Venezuela". 6th International Symposium on Andean Geodynamics. Barcelona: 689-692.
- 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.
- ZELT, C. A. y R. B. SMITH (1992). "Seismic traveltimes inversion for 2-D crustal velocity structure." *Geophysical Journal International* 108(1): 16-34.