

REVERBERACIONES EN LAS CUENCAS BARINAS-APURE Y MARACAIBO, OBSERVADAS MEDIANTE SÍSMICA DE GRAN ÁNGULO

MANUEL ALONSO^{1,2}; MICHAEL SCHMITZ^{1,2}; MARIANO ARNAIZ-RODRÍGUEZ²

¹Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas - FUNVISIS, Dpto. de Geofísica, 1070 Caracas, Venezuela.
e-mail: manuelalonso2305@gmail.com; schmitzschutt@gmail.com.

²Departamento de Geofísica, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. e-mail: marianoarnaiz@gmail.com.

Fecha

Fecha

RESUMEN

Con el propósito de definir las condiciones en las que se generan reverberaciones de ondas sísmicas provenientes de voladuras en las cuencas Barinas–Apure y de Maracaibo, se realizó un análisis de múltiples reflexiones de ondas utilizando los datos de sísmica de gran ángulo adquiridos en el proyecto GIAME. Con la rutina de procesamiento *Seisplot*, se generaron secciones sísmicas con sus reverberaciones interpretadas para los 9 disparos distribuidos entre los perfiles Andes Central y Andes Sur. Estas secciones sísmicas fueron comparadas con las secciones sísmicas sintéticas que se generaron mediante el módulo de *Sureflpsvsh* de *Seismic Un*x*, para finalmente elaborar modelos 1D de velocidades de ondas P y S y densidades que permiten determinar la profundidad de las cuencas y el contraste de impedancia en las capas que generan las reverberaciones. La cuenca Barinas-Apure presentó un mayor número de reverberaciones debido a un mayor contraste de impedancias. Las velocidades aparentes de las reverberaciones en la cuenca Barinas-Apure fueron mayores que las de Maracaibo por la diferencia de profundidad de su basamento. Entre las condiciones necesarias para que se generen reverberaciones en cuencas sedimentarias están: la presencia de altos contrastes de impedancia y una o varias capas de baja velocidad, donde los factores que las rigen son: la magnitud de la fuente, la profundidad del basamento, el tipo de litología y la inclinación de los estratos.

Palabras claves: Sísmica de gran ángulo, reverberaciones, modelo 1D, cuenca Barinas-Apure, cuenca de Maracaibo.

STUDY OF THE REVERBERATIONS OBSERVED IN THE BARINAS-APURE AND MARACAIBO BASINS FROM WIDE-ANGLE SEISMIC DATA

ABSTRACT

In order to define the conditions for generation of reverberations in the Barinas-Apure and Maracaibo basins, an analysis of multiple reflections was made using the wide-angle seismic data acquired by the research project GIAME. With the *Seisplot* processing routine, seismic sections were generated with their reverberations interpreted for the 9 shots distributed between the Andes Central and Andes Sur profiles. These seismic sections were compared with the synthetic seismic sections that were generated by the *Sureflpsvsh* module of *Seismic Un*x*, to finally derive 1D models of P and S wave velocities and densities which allowed to determine the depth of the basins and the impedance contrast of the strata that generated the reverberations. The Barinas-Apure basin presented a greater number of reverberations due to a greater impedances contrast. The apparent velocities of the reverberations in the Barinas-Apure basin were higher than those of Maracaibo due to the difference in depth of its basement. Among the necessary conditions to generate reverberations in sedimentary basins are: the presence of high contrasts and one or several low velocity layers, where the factors that rule them are: the magnitude of the source, the depth of the basement, the type of lithology and the inclination of the strata.

Keywords: Wide-Angle seismic, reverberations, 1D model, Barinas-Apure and Maracaibo basins.

INTRODUCCIÓN

La región noroccidental de Venezuela es un área tectónicamente compleja, donde la orogénesis de Los Andes, la expulsión del bloque triangular de Maracaibo, la subducción incipiente de los llanos bajo Los Andes venezolanos y la formación de las cuencas Barinas-Apure y de Maracaibo son algunos de los

rasgos tectónicos que determinan su complejidad (Arnaiz-Rodríguez, 2009).

Mediante el uso de la sísmica de refracción de gran ángulo en cuencas sedimentarias, normalmente se generan múltiples reflexiones de ondas entre la superficie y el basamento, donde existen altos contrastes de impedancia. A estas múltiples reflexiones también se le conocen como

reverberaciones y normalmente son consideradas como ruido sísmico, sin embargo, estas señales conllevan información del subsuelo, susceptibles de ser interpretadas en términos de su medio de propagación. En la sísmica de gran ángulo de diversos proyectos de investigación, tal como es el caso del proyecto de Geociencia Integral de los Andes de Mérida (GIAME), se ha observado que el número de reverberaciones en las secciones sísmicas de las cuencas Barinas-Apure y de Maracaibo varía entre ellas, e incluso entre distintos disparos de adquisición realizados en la misma cuenca (Schmitz, *et al.*, 2008; Montilla, 2015; Pinto, 2015; Yegres, 2017), y para lo que no se ha dispuesto de una herramienta que nos permita explicar el mayor o menor número de estas múltiples reflexiones en términos de las condiciones del subsuelo que prevalece en las distintas zonas de ambas cuencas.

En el proyecto GIAME se desarrollaron estudios geofísicos interdisciplinarios para determinar la estructura litosférica de los Andes de Mérida, en el que se realizaron mediciones a lo largo de cuatro perfiles, ubicados en la cadena montañosa de los Andes de Mérida (Schmitz, *et al.*, 2015). Para este trabajo, se analizaron los datos de sísmica de gran ángulo obtenidos en los perfiles Andes Central y Andes Sur, debido a que estos atravesaban parte de las cuencas de estudio (*Figura 1*).

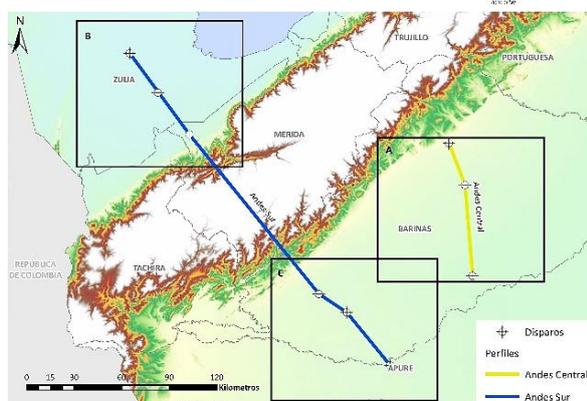


Figura 1. Área de estudio sobre las cuencas Barinas-Apure y de Maracaibo.

Los nueve disparos que estaban distribuidos entre estos dos perfiles, fueron analizados para estudiar las reverberaciones observadas en las cuencas e interpretar las condiciones o propiedades del suelo (velocidad, densidad) que puedan generarlas en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo.

Durante este estudio se pudieron identificar dos tipos de reverberaciones. 1) Las que están asociadas con el paquete sedimentario, y que ocurren cuando la trayectoria de la onda sufre múltiples reflexiones entre el basamento y una capa somera de baja velocidad; y 2) las asociadas a la fase Pg, que ocurren cuando la trayectoria de la onda se refracta, de manera crítica, en el basamento cristalino, que posteriormente sufre de

múltiples reflexiones entre en el basamento y la capa somera de baja velocidad.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS

Esta etapa consistió en la recopilación e integración de información geológica y geofísica pre-existente en el área de estudio y sus alrededores, además de una revisión de las bases teóricas necesarias para entender el comportamiento de la propagación de ondas cuando se generan reverberaciones.

Los múltiples, también llamados reverberaciones, son arribos de señales sísmicas que han padecido más de una reflexión, esta situación es propia de los canales de baja impedancia donde la energía queda atrapada dentro de una guía de ondas. El nivel de amplitud de la llegada es proporcional al producto de los coeficientes de reflexión de cada uno de los reflectores involucrados. Estos coeficientes son muy pequeños para la mayoría de las interfaces, solo los contrastes de impedancia más fuertes generan múltiples lo suficientemente energéticos como para reconocer su llegada al sensor. Se pueden distinguir dos clases de múltiples: de trayectoria larga y trayectoria corta (*Figura 2*). El de trayectoria larga es el que presenta una trayectoria de viaje larga en comparación con la primera reflexión desde la misma interfaz profunda y por lo tanto los múltiples de trayectoria larga aparecen como llegadas separadas en un registro sísmico. En cambio, los múltiples de trayectoria corta llegan tan pronto después que la primera reflexión asociada haya llegado, que interfiere con esta y se agrega a la coda de la primera reflexión, por lo tanto, su efecto es que cambia la forma de la onda (Telford, 1990). Al observar el comportamiento de las reverberaciones en las secciones sísmicas generadas, se pudo observar que las mismas presentan características similares a la de los múltiples interformacionales, por mostrar trayectorias largas en comparación a la primera reflexión asociada y al estar en un medio muy estratificado, característico de las cuencas en estudio.

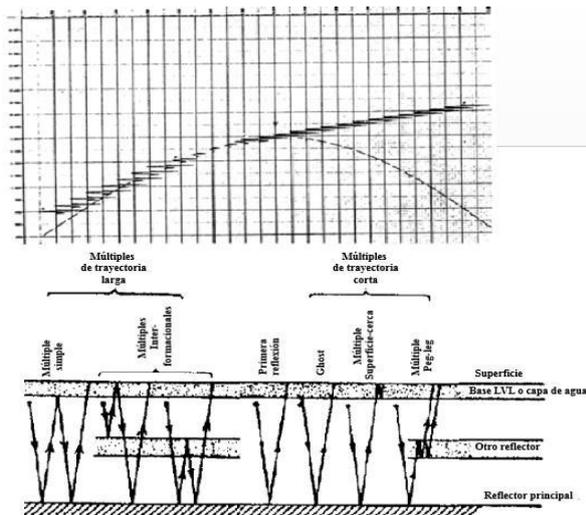


Figura 2. Sección sísmica y geometría de los tipos de múltiples (modificado del Telford, 1990)

Según lo antes mencionado, se hizo una representación de las posibles trayectorias de las reverberaciones, tanto las que podrían estar asociadas a la capa sedimentaria, como a las que podrían estar asociadas a la fase Pg (*Figura 3*).

La geología de ambas cuencas consiste en una sucesión de formaciones sedimentarias que datan desde el Cretácico inferior en la cuenca Barinas – Apure y desde el Carbonífero en la cuenca de Maracaibo. Estas formaciones están compuestas principalmente de areniscas, arcillas, lutitas, calizas, limolitas, conglomerados y margas, con distintos grados de consolidación. El basamento de ambas cuencas está compuesto de rocas ígneo metamórficas con una profundidad máxima estimada de 5,34 y 9,71 km en las cuencas Barinas-Apure y de Maracaibo respectivamente (Chacín, *et al.*, 2005; Arnaiz-Rodríguez, 2009; Arnaiz-Rodríguez, *et al.*, 2011).

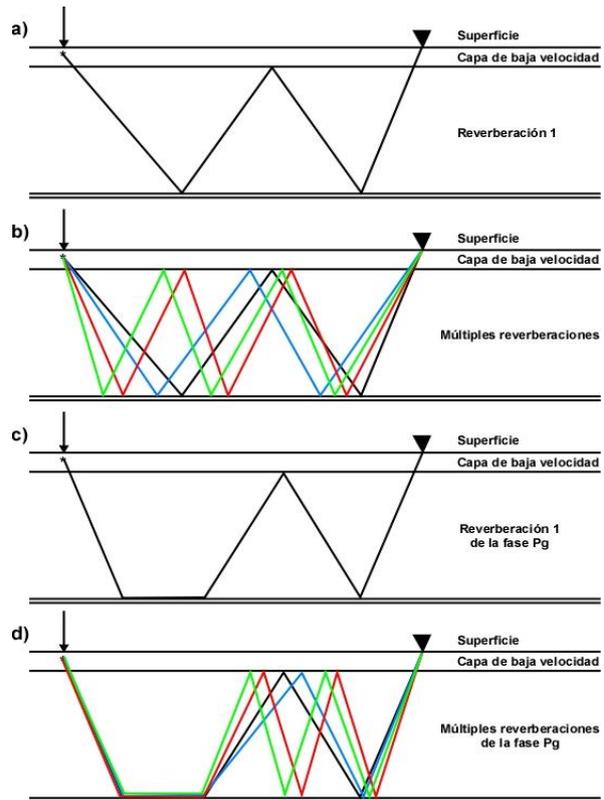


Figura 3. Representación de la trayectoria de las reverberaciones asociadas al paquete sedimentario (a y b) y a la fase Pg (c y d) en un modelo general de tres capas sin buzamiento.

Los datos de los perfiles del estudio fueron adquiridos empleando cargas explosivas entre 200 y 1360 kg de pentolita y ANFO (*ammonium nitrate fuel oil*), colocados en pozos de 60 metros de profundidad aproximadamente. La separación de cada disparo estuvo entre 20 y 30 km, y fueron registrados mediante sismógrafos independientes REF-TEK 125^a (*Texan*), separados entre 0,5 y 1 km. La tasa de muestreo fue de 100 muestras/segundo con una frecuencia fundamental de 4,5 Hz y una ventana de grabación de 36 horas para poder garantizar el correcto registro de cada disparo planteado. (Montilla, 2015; Saavedra, *et al.*, 2015).

Para conocer el buzamiento del basamento y el espesor sedimentario de las cuencas, se tomó como referencia los trabajos de González (2009) y Arnaiz-Rodríguez y Audemard (2014). Sobre el mapa estructural que propusieron Arnaiz-Rodríguez y Audemard (2014) se ubicaron los puntos de disparo, para poder asociar el número de reverberaciones con el espesor sedimentario (*Figura 4*). Además de esto, para la elaboración de los modelos 1D, se propusieron modelos de 3 capas, tomando como referencia los espesores y velocidades de onda P propuestos por Medina (2017), velocidades de onda S a partir de la relación $V_p/V_s=1,724$ propuesta por Niu *et al.*, (2007), y las densidades promedio a partir del trabajo de Celis (2017).

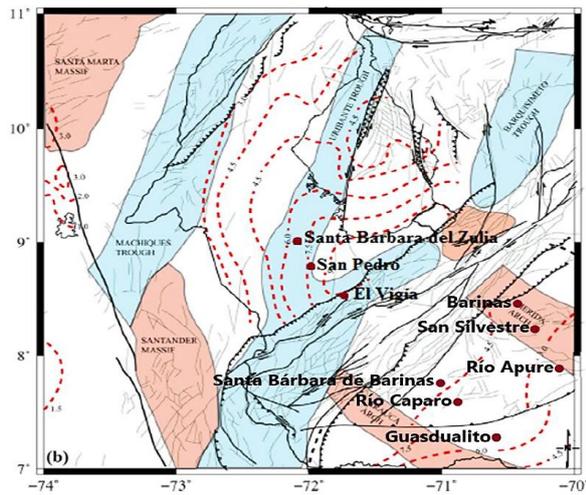


Figura 4. Mapa estructural del bloque de Maracaibo con isótopos que indican los espesores sedimentarios (Modificado de Arnaiz-Rodríguez y Audemard, 2014).

Procesamiento

En esta etapa se procesaron y elaboraron aquellas secciones sísmicas con una relación señal/ruido lo suficientemente óptima para la observación de las reverberaciones, a tales efectos.

Se utilizó la rutina de procesamiento *Seisplot* desarrollado por Mariano, *et al.*, (2014), la cual tuvo que ser modificada para que la misma pudiera realizar la selección de todas las reverberaciones interpretadas. Luego, estas secciones sísmicas se compararon con secciones sísmicas sintéticas, que se generaron mediante el módulo de *Sureflpsvsh* de *Seismic Un*x*, y se visualizaron con el software *Seisee* de Dalmorneftegeophysica (DMNG). Gracias a esto, se pudieron configurar los parámetros de entrada, como la frecuencia, tiempo de muestreo, offset, número de capas, profundidad de capas, densidades, velocidades de onda P y S, entre otros (Alonso, 2018), de las secciones sísmicas sintéticas hasta que estas coincidieran con las secciones sísmicas elaboradas con la rutina de *Seisplot* (Figura 5).

De esta manera, se pudo determinar los parámetros que fueron utilizados para la obtención del modelo 1D en cada disparo. Para la elaboración de los modelos 1D, se utilizaron los valores de velocidad de onda P y S y densidad, que fueron utilizados en la elaboración de las secciones sísmicas sintéticas, con respecto a la profundidad de cada capa.

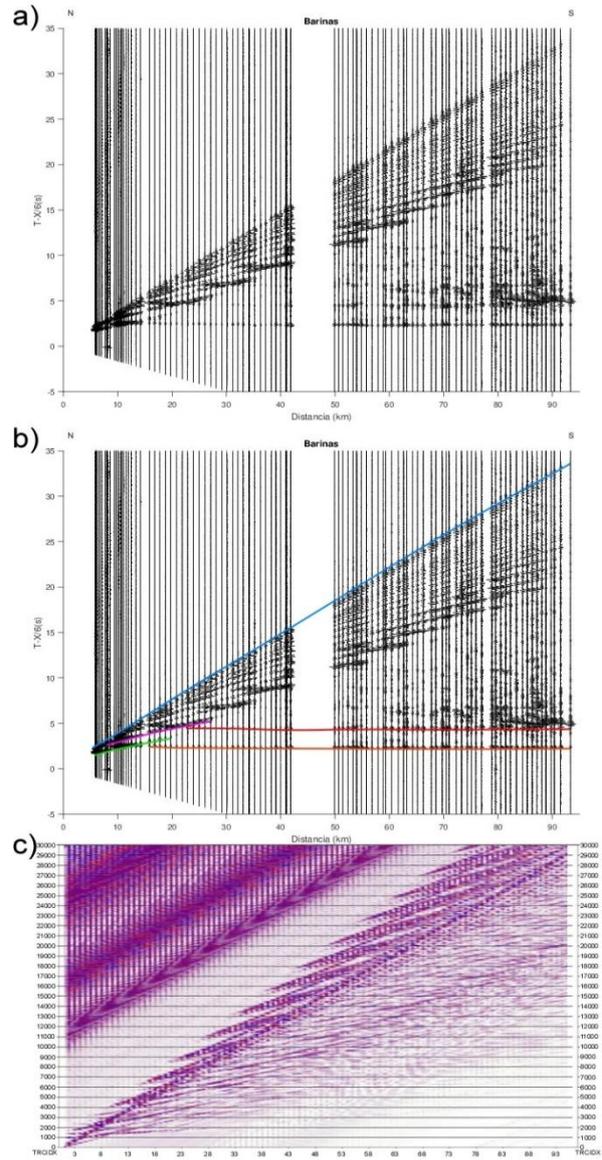


Figura 5. Secciones sísmicas procesadas del disparo de Barinas. a) Sección sísmica elaborada con el código *Seisplot*. b) Sección sísmica, indicando las distintas llegadas observadas. Azul: onda sísmica superficial. Morado: reverberación. Verde: onda directa. Naranja: fase Pg. Rojo: reverberación de Pg. c) Sección sísmica sintética visualizada con el software *Seisee*.

GENERACIÓN DE SECCIONES SÍSMICAS CON REVERBERACIONES INTERPRETADAS

Para interpretar las reverberaciones en la cuenca Barinas- Apure, fueron analizados los seis disparos al sur de los perfiles Andes Central y Andes Sur, mediante los segmentos Barinas - Río Apure y Santa Bárbara de Barinas – Guasdalito, mientras que los tres disparos al norte del perfil Andes Sur del segmento Santa Bárbara del Zulia – El Vigía, fueron utilizados para analizar la cuenca de Maracaibo (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de los disparos de adquisición por segmento, perfil y carga explosiva.

Perfil	Segmento	Disparo	Carga explosiva (kg)
Andes Central	Barinas - Río Apure	Barinas	570
		San Silvestre	240
		Río Apure	1190
Andes Sur	Santa Bárbara del Zulia - El Vigía	Santa Bárbara del Zulia	680
		San Pedro del Zulia	200
		El Vigía	1360
	Santa Bárbara de Barinas - Guasualito	Santa Bárbara de Barinas	800
		Río Caparo	170
		Guasualito	200

Cuenca Barinas-Apure. Perfil Andes Central

Barinas

En esta sección sísmica se pudo identificar 17 reverberaciones asociadas al espesor sedimentario y 4 asociadas a la fase Pg (*Figura 6*). En este sector el espesor sedimentario fue de 3,6 km, donde el buzamiento del basamento era hacia el sureste. Se pudo apreciar que solo hubo reverberaciones al sur del disparo, y esto puede ser debido a la presencia del piedemonte de los Andes de Mérida al norte de la fuente, que a pesar de que haya un mayor contraste de impedancias en este sentido, ya no forma parte del espesor sedimentario. La presencia de reverberaciones asociadas a la fase Pg puede estar motivado a un basamento somero.

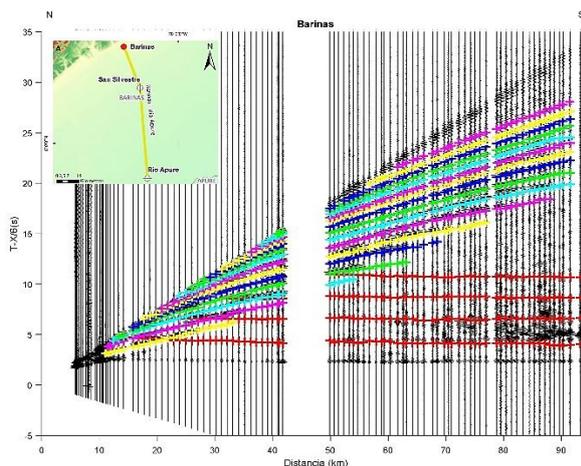


Figura 6. Sección sísmica interpretada del disparo de Barinas. Las cruces de color rojo representan las reverberaciones asociadas a la fase Pg, las demás al paquete sedimentario.

San Silvestre

En esta sección sísmica se pueden observar un total de 12 reverberaciones asociadas al paquete sedimentario, y 2 asociadas a la fase Pg hacia el sur de la fuente (*Figura 7*). En esta zona, el espesor de sedimentos fue de 3,5 km, donde el buzamiento del basamento era hacia el noroeste. Se observaron reverberaciones a ambos lados de la fuente debido a la lejanía del piedemonte andino que estaba al norte, sin embargo, este disparo presentó un menor número de reverberaciones, posiblemente motivado a una menor carga de adquisición. El hecho de que no haya presencia de reverberaciones asociadas a la fase Pg al norte del disparo, puede ser debido a un basamento más profundo en ese sentido.

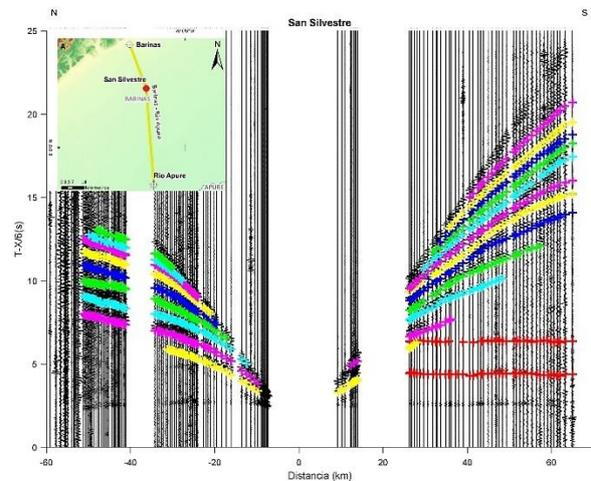


Figura 7. Sección sísmica interpretada del disparo de San Silvestre.

Río Apure

Para esta sección se identificaron un total de 19 reverberaciones asociadas al espesor sedimentario, y 4 asociadas a la fase Pg (*Figura 8*). Donde el espesor sedimentario fue de 2,8 km, con un basamento que buzaba hacia el noroeste. Esta sección fue la que presentó un mayor número de reverberaciones con respecto a las demás de este perfil y esto puede estar motivado a un espesor sedimentario menor y a una carga de adquisición mayor. Para esta sección no se tienen datos al sur de la fuente, debido a que no se dispusieron de geófonos que registraran más señales hacia este sentido.

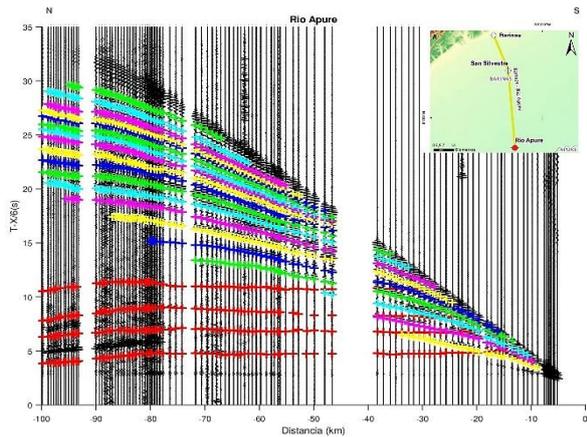


Figura 8. Sección sísmica interpretada del disparo de Río Apure.

Cuenca Barinas – Apure. Perfil Andes Sur

Santa Bárbara de Barinas

En esta sección se observaron 20 reverberaciones asociadas únicamente al paquete sedimentario (Figura 9). El espesor sedimentario cuenta con unos 4,6 km, con un basamento buzando hacia el noroeste. Esta sección presentó un gran número de reverberaciones asociadas al paquete sedimentario en comparación a las demás secciones, y esto puede estar motivado a mayores contrastes de impedancia. La ausencia de reverberaciones asociadas a la fase Pg puede ser debido al gran espesor sedimentario. No se registraron reverberaciones al norte de la fuente por la cercanía del piedemonte andino.

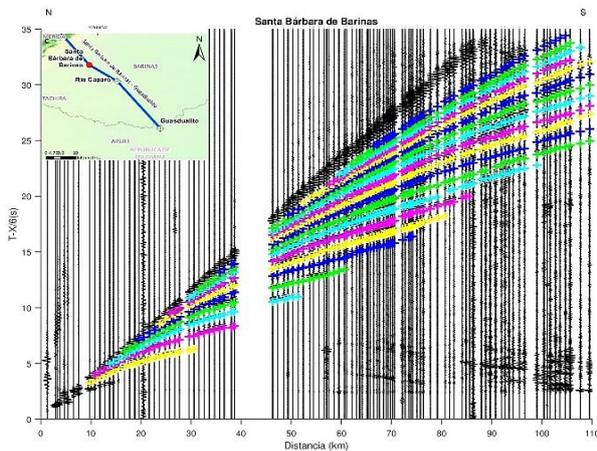


Figura 9. Sección sísmica interpretada del disparo de Santa Bárbara de Barinas.

Río Caparo

Para esta sección sísmica se pudo observar un total de 15 reverberaciones asociadas al paquete sedimentarias y 1 reverberación asociada a la fase Pg al sur de la fuente (Figura 10). El espesor sedimentario correspondiente este sector fue de 4,2 km, con un buzamiento de basamento hacia noroeste. Se observaron reverberaciones a ambos lados de la

fuente, pero se interpretaron más (tanto las asociadas al paquete sedimentario como a las de la fase Pg) al sur de la fuente, en sentido contrario al buzamiento del basamento.

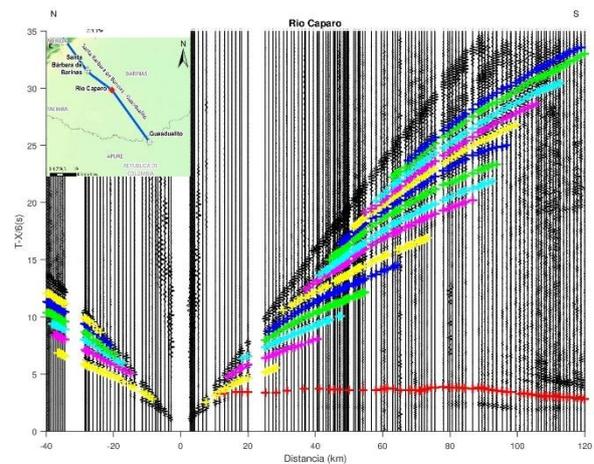


Figura 10. Sección sísmica interpretada del disparo de Río Caparo.

Guasualito

Para esta sección se observó un total de 20 reverberaciones asociadas con el paquete sedimentario, mientras que se observaron 2 y 1 reverberaciones asociadas a la fase Pg al sur y al norte de la fuente respectivamente (Figura 11). En este sector el espesor de sedimentos alcanzaba los 6,2 km con un buzamiento de basamento hacia el sureste. Este disparo a pesar de haber sido adquirido con una carga explosiva baja y con gran espesor sedimentario, se registró un alto contenido de reverberaciones. Esto puede estar motivado a un alto contraste de impedancia en este sector. Se registraron reverberaciones a ambos lados de la fuente, pero en comparación a otras secciones sísmicas, las reverberaciones a ambos lados de la fuente tienen una geometría muy similar, lo que puede significar un buzamiento de capas muy leve.

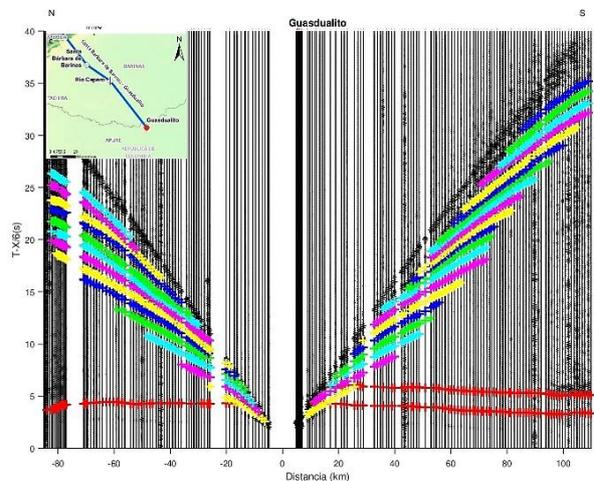


Figura 11. Sección sísmica interpretada del disparo de Guasualito.

Se elaboró la siguiente tabla de parámetros promedio por capa de la cuenca Barinas-Apure (*Tabla 2*).

Tabla 2. Valor promedio de los parámetros de velocidad de onda P y S, densidad, espesor, impedancia y contraste de impedancia por cada capa de la cuenca Barinas-Apure

Cuenca Barinas-Apure					
VP (km/s)	VS (km/s)	ρ (g/cc)	Esp. (km)	Z (km.g/s.cc)	C.Z (km.g/s.cc)
2,3	1,33	2,25	2	5,175	4,505
4	2,32	2,42	2	9,68	
5,2	3,02	2,54	1	13,208	3,528

A partir de los valores de velocidad de onda P y S, densidad y espesores de capa, se pudo generar el modelo 1D de la cuenca Barinas-Apure (*Figura 12*), comparándola también con la velocidad de onda en el basamento cristalino. Mediante los valores de impedancia se pudieron conocer los contrastes de impedancia entre cada capa, para finalmente relacionar estos valores con las litologías de formaciones correspondientes a cada capa.

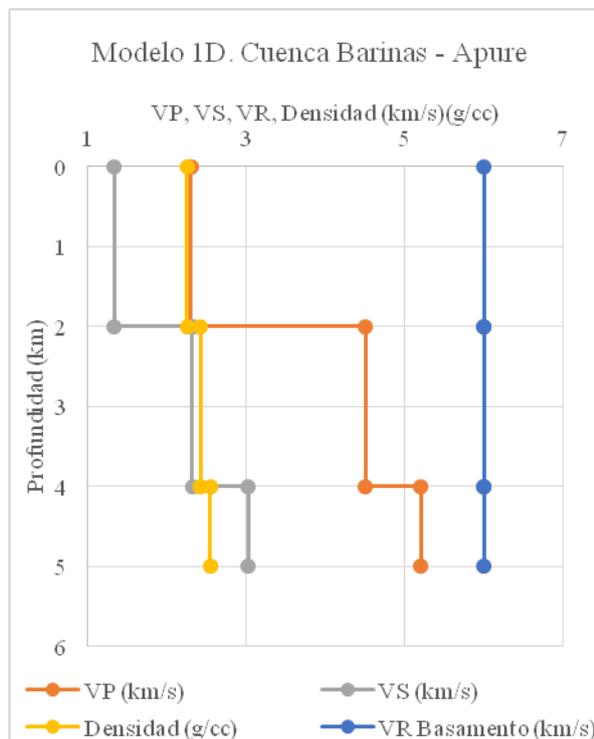


Figura 12. Modelo 1D de velocidades y densidades general de la cuenca Barinas-Apure. Donde VR representa la velocidad de las reverberaciones en el basamento, a modo de comparación de las velocidades de onda P (VP) y onda S (VS).

En la cuenca Barinas-Apure los valores de velocidad de onda P y S y densidad aumentan con respecto a la profundidad, esto puede suceder por la presencia de sedimentos mejor consolidados en profundidad. La primera capa, que es la más profunda y data entre el Cretácico inferior y el Oligoceno, se corresponde con las formaciones Aguardiente, Escandalosa, Navay, Burguita Gobernador, Paguey y la base de Guafita. Tiene un espesor aproximado de un 1 km y está conformado de sedimentos bien consolidados como areniscas micáceas, glauconíticas, calcáreas, cuarzosas y limolíticas y lutitas silíceas, tripolíticas y calcáreas). La segunda está relacionada con espesores de 2 km de sedimentos medianamente consolidados que datan del Mioceno, como conglomerados, areniscas glauconíticas, limonitas y lodolitas, que forman parte de las formaciones Guafita, Parángula y Río Yuca. La tercera capa, tiene un espesor aproximado de 2 km de sedimentos molásicos poco consolidados que datan del Plioceno hasta el presente, los cuales están conformados de estratos macizos de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillitas, que corresponden a la formación Río Yuca.

Cuenca de Maracaibo. Perfil Andes Sur

Santa Bárbara del Zulia

Se observaron un total de 18 reverberaciones asociadas solamente al paquete sedimentario (*Figura 13*). En este sector, el espesor sedimentario fue de 6,5 km con un buzamiento de basamento hacia sureste. Se observan reverberaciones a ambos lados de la fuente, pero se ven más hacia la zona donde el basamento es menos profundo, es decir, en dirección contraria a su dirección de buzamiento.

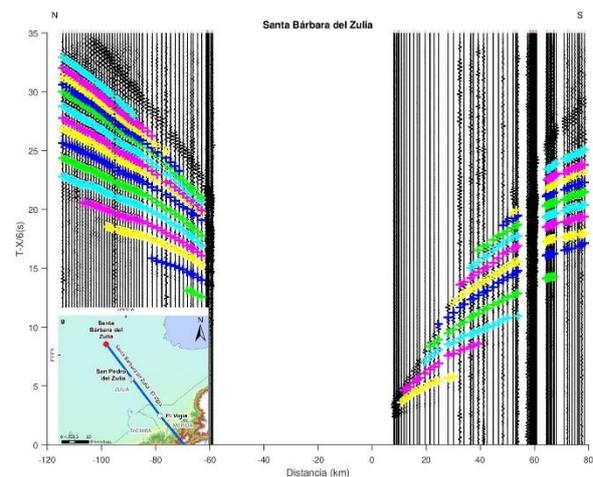


Figura 13. Sección sísmica interpretada del disparo de Santa Bárbara del Zulia.

San Pedro

En esta sección sísmica fueron observadas un total de 14 reverberaciones asociadas al espesor de sedimentos, mientras que se observó 1 asociada a la fase Pg al sur de la fuente (*Figura 14*). El

buzamiento del basamento se mantiene hacia el sureste y el espesor de sedimentos presente es de 7,7 km. Las reverberaciones se distribuyen a ambos lados de la fuente, pero al observar su geometría se puede inferir un marcado buzamiento hacia el sureste. Además de esto, se observa una reverberación asociada a Pg hacia el sur, donde puede haber un mayor contraste de impedancia.

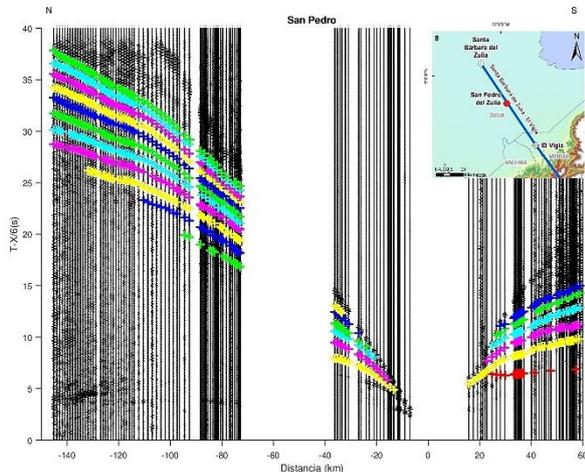


Figura 14. Sección sísmica interpretada del disparo de San Pedro.

El Vigía

Se pudo interpretar un total de 13 reverberaciones asociadas al espesor sedimentario con 1 reverberación asociada a la fase Pg al sur de la fuente (Figura 15). El espesor sedimentario fue de 9 km, con un buzamiento de basamento que ahora está orientado hacia el noroeste. A pesar de haber sido el disparo con mayor carga de adquisición de este estudio, también fue la sección con menor número de reverberaciones. Y esto puede estar motivado a un alto espesor sedimentario.

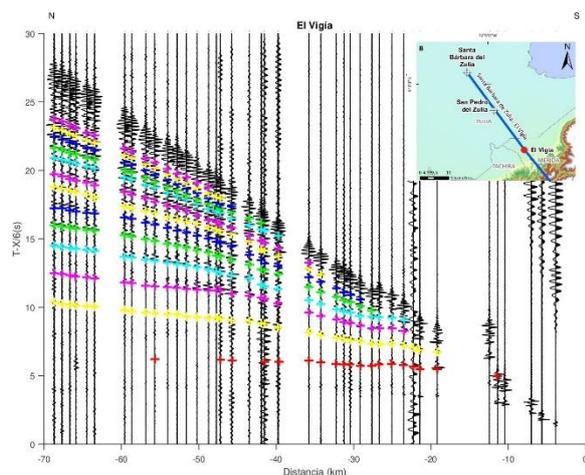


Figura 15. Sección sísmica interpretada del disparo de El Vigía.

Se elaboró la siguiente tabla de parámetros promedio de la cuenca de Maracaibo (Tabla 3), donde se relacionaron las 3 capas de la cuenca con sus respectivas velocidades de onda P y S, densidad, espesor, impedancia y contraste de impedancia. Finalmente, se asociaron con las litologías de sus formaciones correspondientes.

Tabla 3. Valor promedio de los parámetros de velocidad de onda P y S, densidad, espesor, impedancia y contraste de impedancia por cada capa de la cuenca de Maracaibo.

Cuenca de Maracaibo					
VP (km/s)	VS (km/s)	ρ (g/cc)	Esp. (km)	Z (km.g/s.cc)	C.Z (km.g/s.cc)
2,7	1,57	2,3	2	6,21	3,79
4	2,32	2,5	3	10	
4,9	2,84	2,55	4	12,495	2,495

Utilizando los valores promedio de los parámetros en cuestión en la Tabla 3, se pudo generar el modelo 1D de la cuenca Barinas-Apure (Figura 16), comparándola también con la velocidad de onda en el basamento cristalino.

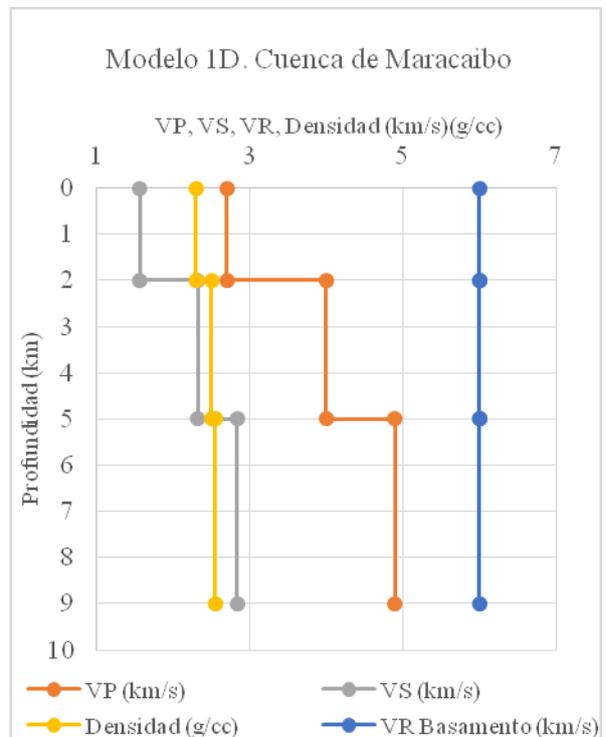


Figura 16. Modelo 1D general de la cuenca de Maracaibo.

En la cuenca de Maracaibo los valores de velocidad de onda P y S y densidad aumentan con respecto a la

profundidad. Esto se debe a la presencia de sedimentos mejor consolidados en profundidad. La primera capa data del Jurásico al Paleoceno, tiene un espesor aproximado de 4 km de sedimentos bien consolidados de areniscas, arcillas, lutitas, calizas, margas y dolomitas, que corresponden a las formaciones La Quinta, Río Negro, Apón, Lisure, Maraca, La Luna, Colón, Mito Juan y Guasare. La segunda capa tiene un espesor aproximado de 3 km de sedimentos medianamente consolidados que datan del Eoceno al Mioceno (lutitas, areniscas, limolitas y calizas) que corresponden a las formaciones Misoa, Paují, Ico tea y La Rosa. La tercera capa, y la más reciente, data del Plioceno hasta el presente, tiene un espesor 2 km de sedimentos poco consolidados conformado de arcillas, arcillitas, limolitas, areniscas y lutitas que forman parte de las formaciones Lagunillas, Isnotú y La Puerta.

DISCUSIÓN

En las secciones sísmicas donde se registraron reverberaciones a ambos lados de la fuente se observó un mayor número de reverberaciones hacia las zonas que iban en sentido contrario al buzamiento del basamento. Esto se debe a que, si las ondas se propagan hacia el sentido contrario al buzamiento del basamento, el ángulo de incidencia del rayo (que debe ser igual al ángulo reflectante del mismo) va a ir disminuyendo. Esto produce una mayor cantidad de múltiples reflexiones entre los 2 reflectores que, en este caso, son la base de la primera capa de baja velocidad y el tope del basamento de la cuenca (**Figura 17**). Por lo tanto, también puede influir el buzamiento de la capa de baja velocidad.

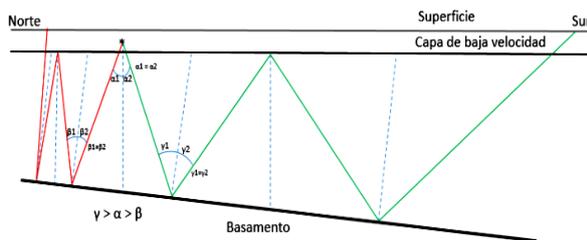


Figura 17. Representación de la trayectoria del rayo sísmico asociado a una reverberación correspondiente al paquete sedimentario a ambos lados del disparo, entre un basamento con buzamiento hacia el sur y una capa de baja velocidad sin buzamiento. Línea roja: reverberación que se propaga hacia el norte. Línea verde: reverberación que se propaga hacia el sur. Línea azul punteada: línea normal imaginaria perpendicular a la base reflectante.

Tomando como ejemplo la Figura 17, si la capa de baja velocidad también buzara hacia el sur, entonces el número de reverberaciones aumentaría hacia el sur, y a su vez, disminuiría las que se propagan hacia el norte. Por lo tanto, en zonas donde exista buzamiento del basamento y/o la capa de baja velocidad, habrá un

mayor número de reverberaciones en las zonas donde haya un menor espesor sedimentario. Sin embargo, debe haber un espesor sedimentario mínimo para que se puedan generar las reverberaciones, ya que estas no fueron registradas en los disparos que estaban sobre el piedemonte andino.

CONCLUSIONES

Se analizaron nueve disparos a lo largo de 2 perfiles que atraviesan las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo, dentro del marco del proyecto de investigación GIAME. Estos disparos estaban distribuidos entre los perfiles Andes Central y Andes Sur para estudiar las reverberaciones observadas en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo, en donde se pudieron identificar reverberaciones asociadas al paquete sedimentario y a la fase Pg.

La cuenca Barinas – Apure presentó en promedio un mayor número de reverberaciones asociadas al paquete sedimentario (17,5) que la cuenca de Maracaibo (14,67). Se propone que el número de reverberaciones depende de diferentes factores, entre ellos puede estar el contraste de impedancia, la estratificación, la profundidad y el buzamiento de las estructuras. En el caso de la cuenca Barinas-Apure, esta presentó un mayor número de reverberaciones que la cuenca de Maracaibo debido a que esta presenta un mayor contraste de impedancia, un menor espesor sedimentario y menores profundidades de basamento.

Las reverberaciones asociadas a la fase Pg se pudieron observar de mejor manera en los disparos ubicados sobre la cuenca Barinas – Apure, mientras que los de la cuenca de Maracaibo se observan levemente por sus bajas amplitudes. Este tipo de reverberación se ven claramente en la cuenca Barinas-Apure debido a que presenta profundidades de basamento menores y contrastes de impedancia más altos que en la cuenca de Maracaibo.

La cuenca de Maracaibo presenta mayores espesores sedimentarios que la cuenca Barinas-Apure. La primera capa de la cuenca Barinas – Apure, que data del Cretácico inferior, presenta velocidades de onda P y onda S mayores que la capa más antigua de la cuenca de Maracaibo. La segunda capa de ambas cuencas, que datan del Eoceno y Mioceno, presentan velocidades de onda similares entre ellas. Por su parte, la tercera capa de la cuenca de Maracaibo, que data del Plioceno, presenta mayores velocidades de onda P y S que la capa más reciente de la cuenca Barinas-Apure; por lo tanto, el grado de consolidación sedimentaria de la cuenca Barinas-Apure es mayor en profundidad que en la cuenca de Maracaibo, mientras que los sedimentos más recientes de la cuenca de Maracaibo están mejor consolidados que los de la cuenca Barinas-Apure.

Entre las condiciones necesarias que se proponen que hacen falta para que se puedan generar reverberaciones en cuencas sedimentarias están: la

presencia de un alto contraste de impedancia, al menos una capa de baja velocidad y un espesor sedimentario mínimo. Donde los factores que rigen estas condiciones para que haya un mayor o menor número de reverberaciones figuran: la magnitud de la fuente y el buzamiento del basamento y de la capa de baja velocidad.

REFERENCIAS

- Alonso, M. (2018). *Estudio de las reverberaciones observadas en las cuencas Barinas-Apure y Maracaibo a partir de sísmica de gran ángulo*. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Arnaiz-Rodríguez, M. (2009). *Modelado gravimétrico cortical de la zona noroccidental de Venezuela*. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Arnaiz-Rodríguez, M., 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. y Audemard F. (2014). *Variations in elastic thickness and flexure of the Maracaibo block*. El Servier. Journal of South American Earth Sciences 56 (2014) 251-264.
- Arnaiz-Rodríguez, M., Bezada, M., Schmitz, M. (2014). *SEISLOT: un código interactivo para mostrar y seleccionar las primeras llegadas en sísmica de gran ángulo*. Jornadas de Investigación JIFI, UCV, 8 pp. DOI: 10.13140/2.1.1833.8888
- Celis, S. (2017). *Modelo gravimétrico 3D de Los Andes de Mérida*. (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Miranda, Venezuela.
- Chacín, L., Jácome, M.I., e Izarra, C. (2005). *Flexural and gravity modelling of the Mérida Andes and Barinas-Apure basin, Western Venezuela*. Tectonophysics, 405, 155-167.
- 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 Simón Bolívar, Miranda, Venezuela.
- Montilla L. (2015). *Análisis de la estructura cortical del perfil de sísmica de gran ángulo "Andes Sur", segmento Machiques-El Vigía*. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- 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*. J. Geophys. Res., 112, B11308, DOI: 10.1029/2006JB004802.
- Pinto, H. (2015). *Modelado bidimensional de velocidades de ondas en la parte austral de Los Andes de Mérida*. (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar, Miranda, Venezuela.
- Saavedra M., Schmitz M. y Ávila J. (2015). *Modelos corticales de velocidades en la región occidental de Venezuela, zona Centro-Sur de Los Andes*. Sismología y Sismotectónica. X CONVESIS 2015. Cumaná, Venezuela.
- Schmitz M., Avila J., Bezada M., Vieira E., Yáñez M., Levander A. Zelt, C.A., Jácome M.I. and Magnani M.B. (2008). *Crustal thickness variations in Venezuela from deep seismic observations*. Tectonophysics, 459, 14–26.
- Schmitz, M., Orihuela, N., Choy, J., Gil, E., Mazuera, F., Sánchez, J., Audemard, F., Arnaiz-Rodríguez, M., Reinoza, C., Araujo, F., Ritter, O., Levander, A., Niu, F., Ávila, J., García, K., Yegres, L., Cruces, J., Weckmann, U., Tietze, K., Cerrada, M., González, J., Barreto, G., Rendón, H., Bolívar, M., Molero, Y. y Lara, J. (2015). *Investigaciones geofísicas integradas para estudiar la estructura litosférica de Los Andes de Mérida*. Sismología y Sismotectónica. X CONVESIS 2015. Cumaná, Venezuela.
- Yegres L. (2017). *Modelado bidimensional de la corteza de Los Andes de Mérida en el perfil Andes Central, a partir de sísmica de refracción profunda*. (Tesis de maestría). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.