

# RELOCALIZACIÓN ABSOLUTA Y RELATIVA DE LA SECUENCIA SÍSMICA DE LAGUNILLAS, ESTADO MÉRIDA, VENEZUELA

IVETTE BARRIOS<sup>1,2</sup>, HERBERT RENDÓN<sup>2</sup>, MICHAEL SCHMITZ<sup>2,3</sup>, ALEJANDRA MARTÍNEZ<sup>1,2</sup>, LEONARDO ALVARADO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Sismología, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas- FUNVISIS, Apartado 76880, El Marqués 1070, Venezuela. email: ivettebarrios@gmail.com, hrendon@funvisis.gob.ve, amartinez@funvisis.gob.ve, lalvarado@funvisis.gob.ve.

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar, Valle de Sartenejas, Baruta, 89000, estado Miranda.

<sup>3</sup>Departamento de Geofísica, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas- FUNVISIS Apartado 76880, El Marqués 1070, Venezuela. email: mschmitz@funvisis.gob.ve.

Recibido: XXX de 2019

Recibido en forma final revisado: XXX de 2019

## RESUMEN

Se realiza la relocalización de 152 eventos sísmicos ocurridos durante la secuencia sísmica de Lagunillas (estado Mérida, Venezuela) entre el 7 de noviembre de 2015 y el 31 de marzo 2016 con una magnitud de momento mayor o igual a tres. La base de datos utilizada se compone de la información disponible en la Red Sismológica Nacional y de la localización preliminar realizada en FUNVISIS. Se empleó un nuevo modelo de velocidad local 1D de la zona, se identificaron y corrigieron errores de lectura, se añadió una mayor variedad de fases y estaciones adicionales. El procesamiento de los datos se realizó con el software SEISAN y consta de dos etapas; durante la primera etapa se realizó una relocalización absoluta y la segunda etapa constó de una relocalización relativa utilizando la Determinación Conjunta de Hipocentros a través del programa VELEST. Al finalizar las relocalizaciones se evidencia la disminución de la dispersión de los eventos, se hallan sus profundidades de ocurrencia (superficiales, en un rango entre 5-25 km), lo que permite una mejor visualización de la geometría de la trazas estudiadas de la falla de Boconó (trazas Boc-a y Boc-b).

*Palabras Clave:* Secuencia sísmica, Falla de Boconó, Lagunillas, Relocalización absoluta, Relocalización relativa.

## ABSOLUTE AND RELATIVE RELOCATIONS FOR THE LAGUNILLAS SEISMIC SEQUENCE (MÉRIDA, VENEZUELA)

### ABSTRACT

We improved the location of 152 events ( $M \geq 3$ ) of the Lagunillas (Mérida state, Venezuela) seismic sequence, covering from 7<sup>th</sup> November 2015 to 31 March 2016. The database used is composed of information provided by stations from the Seismological National Network, and the preliminary locations of seismic events carried out in FUNVISIS. We used a new velocity model, identified and correct picking errors, identified additional phases, and included supplementary stations. The data processing with the SEISAN program package included two stages: Preliminary and absolute relocations during the first stage and a relative relocation using the Joint-Hypocenter-Determination of VELEST program for the second stage. The results show a decrease in the event scattering. We calculated seismic event depths (Near-surface, between 5 and 25 km in depth), which allowed better visualization of the geometry of the studied traces of the Boconó Fault (traces Boc-a and Boc-b).

*Keywords:* Seismic Sequence, Boconó fault, Lagunillas, Absolute relocation, Relative relocation.

## INTRODUCCIÓN

La tectónica de la región andina y costera de Venezuela pareciera estar controlada, fundamentalmente, por el movimiento de la Placa del Caribe en sentido este con respecto a la placa Suramericana (e.g., Audemard & Audemard, 2002; Audemard, 2003). La frontera entre ambas placas, en los Andes Venezolanos, está definida

por la Zona de Fallas de Boconó (Estevez y Schubert, 1993). A la actividad de la falla de Boconó se le adjudican varios eventos sísmicos destructivos ocurridos en Los Andes de Venezuela en tiempos históricos 1610, 1812, 1894, 1932 y 1950 (e.g., Audemard, 1997, 2014). A través del análisis paleosísmico de trincheras, Audemard (1997) estima que para los eventos de 1610 y 1894 (ocurridos en el segmento sur de la Falla de

Boconó cerca de la Grita) sus magnitudes varían entre 7,1 y 7,3 con un período de retorno de 280 años.

En el presente, toda la zona de fallas de Boconó, desde la depresión del Táchira en su extremo suroeste hasta el Mar Caribe al noreste, es sísmicamente activa (Estevez y Schubert, 1993). Esta sismicidad actual se produce dentro de una zona amplia, con la participación de todos los Andes de Mérida, lo que sugiere que otras fallas pueden ser también sismogénicas, así como las estructuras que levantan la cadena (Audemard, 2003).

El registro de la actividad sísmica mediante redes sismográficas locales durante los últimos 12 años, en los Andes Venezolanos, asociada a la Falla de Boconó, muestra que en la actualidad la actividad microsísmica ocurre, fundamentalmente, a través de tormentas locales que tienden a durar alrededor de 2 ó 3 meses. Durante estas tormentas, decenas de microsismos alcanzan a ser registrados, permitiendo la elaboración de modelos sismotectónicos locales (Laffaille y Estevez, 1986).

El 7 de noviembre de 2015 inició una secuencia sísmica en El Vigía estado Mérida, Venezuela, en la falla de Boconó. Se contabilizaron 962 eventos sísmicos, en un corto periodo de cuatro meses (hasta el 31 de marzo de 2016) con magnitudes de momento que varían entre 1 y 5,1. Esta secuencia sísmica fue registrada por la Red Sismológica Nacional. La localización inicial de los eventos fue realizada por FUNVISIS, de manera absoluta y utilizando un modelo de velocidad regional. Sin embargo, esto no es ideal ya que los modelos de velocidad 1D locales proporcionan hipocentros más consistentes y precisos que los modelos de velocidad regionales (Husen *et al.*, 2011). Por otro lado, en la mayoría de los casos, la precisión hipocentral de los sismos desde las rutinas de localización absoluta es bastante limitada, ocultando generalmente las verdaderas características tectónicas de la sismicidad. En este sentido, los parámetros hipocentrales se pueden mejorar drásticamente mediante el uso de métodos de localización relativa, donde la dispersión entre los hipocentros se puede reducir, revelándose estructuras más refinadas de la sismicidad asociada (Zhu *et al.*, 2005).

En la búsqueda de una mayor resolución de los parámetros hipocentrales, se estableció relocalizar los sismos de magnitud de momento mayor o igual a 3, lo cual redujo la cantidad de eventos para el período de estudio a 152, utilizando un nuevo modelo de velocidad 1D local generado, el cual se adecua a las condiciones geológicas y físicas de la zona de estudio, apreciándose en la correspondencia entre las fases observadas y las fases teóricas de las relocalizaciones.

En primer lugar se realizó una relocalización absoluta utilizando el software SEISAN, a partir de la

localización preliminar realizada por FUNVISIS. Se identificaron y corrigieron errores de lectura y se añadió una mayor variedad de fases y estaciones sismológicas adicionales.

En segundo lugar se realizó una relocalización relativa utilizando la Determinación Conjunta de Hipocentros (Joint-Hypocenter- Determination –JHD-). Este método es más confiable que los métodos individuales de localización relativa, ya que ayuda a disminuir la dispersión de los eventos, contribuyendo a crear el plano de inmersión y se puede obtener la ubicación absoluta de todos los eventos asumiendo un modelo de velocidad correcto. El procesamiento se hizo con el programa VELEST dentro del software SEISAN, el cual es usado además, para mejorar el acoplamiento entre el hipocentro y el modelo de velocidad para sismos locales.

En ambas relocalizaciones se redujo la dispersión de los eventos, disminuyó el valor del tiempo de viaje residual o RMS y se encontró la profundidad focal de los sismos en un rango comprendido entre 5-25 km.

## **GEOLOGÍA Y TECTÓNICA**

La falla de Boconó es un accidente transcurrente dextral, el cual está orientado en dirección SO-NE, tiene aproximadamente 600 km de largo. Se ubica entre la población de San Cristóbal, situada en proximidad de la frontera con Colombia, y la población de Morón, en la costa caribeña de golfo Triste y surca los Andes de Mérida sobre una longitud próxima a 400 km (Audemard, 2014).

Las soluciones de mecanismos focales confirman las determinaciones de fallas rumbo-deslizantes o inversas con base en los criterios geológicos (característico de la Falla Boconó y los piedemontes), ya que principalmente exhiben fallas de rumbo y deslizamiento inverso, respectivamente. Los mecanismos focales a lo largo del eje de la cadena montañosa muestran un comportamiento esencialmente rumbo-deslizante con componente dextral, mientras que pocos mecanismos focales en el lado oriental de Los Andes (entre ellos los terremotos de Guanare en 1975 y Ospino en 1977) muestran un deslizamiento inverso (Audemard, 2003).

Otros mecanismos focales, calculados por Laffaille (1981) y Laffaille & Estevez (1986) para eventos de menor magnitud dentro de la Zona de Fallas de Boconó, muestran soluciones correspondientes a una gran variedad de fallamiento normal e inverso, asociado a fallas subsidiarias y, particularmente, a cuencas de tracción y zonas de compresión, comunes en esta región (Alvarado, 2008).

La distribución de la profundidad de la sismicidad asociada al levantamiento de la cadena se presenta a profundidades entre los 20-25 km demostrando que la totalidad de la corteza frágil se deforma en la actualidad (Audemard, 2003). Las profundidades tienden a incrementarse hacia sus flancos noroeste y sureste, alcanzando profundidades que llegan a superar los 40 km y donde los estudios de mecanismos focales arrojan resultados consistentes con fallamiento inverso y fallas de compresión (Estevez y Schubert, 1993).

Durante los últimos 50 años se han propuestos distintos modelos para explicar la estructura principal de los Andes de Mérida, Sin embargo, Audemard & Audemard (2002) afirman que todos estos modelos propuestos se basan en datos geológicos y / o geofísicos

parciales, por lo cual sólo tienen importancia local. Además, la mayoría de ellos han subestimado mucho el papel de la tectónica activa regional que está controlado por el rompecabezas de interacción entre las placas actuantes.

### Trazas de la Falla de Boconó

Referente a la zona de estudio, Audemard (2014) identifica que la Falla de Boconó presenta dos trazas en la región de la población de Lagunillas, Boc-a y Boc-b (Figura 1). Estas trazas están dispuestas en un relevo transtensivo de casi una decena de kilómetros de solape y 1,5 km de separación, delimitando la cuenca en tracción homónima de Lagunillas, la cual contiene la Laguna de Urao.



**Figura 1.** Segmentos de la falla de Boconó identificados a través de estudios paleosísmicos (Audemard, 2014). Se ubican las isosistas de diferentes terremotos y los sitios de trincheras paleosísmicas ejecutadas y estudiadas. La zona de estudio se ubica dentro de la isosista VIII del sismo de 1894 (línea negra).

### Cuenca Las González a lo largo de la Falla de Boconó

Alvarado (2008) propone que la traza norte de la Cuenca La González pierde su linealidad en el sector Los Corrales cambiando de rumbo y orientándose casi en sentido este-oeste, originando así una curvatura de alivio que es responsable de la formación de la Cuenca de tracción Lagunillas. Esta curvatura de alivio está conformada por dos trazas de falla que delimitan la cuenca y termina en el norte de la población de San Juan de Lagunillas donde las dos trazas se vuelven a unir.

Además propone que la forma de esta cuenca es de graben asimétrico, y que posiblemente tenga, dentro de él, pequeños altos estructurales. El basamento está compuesto por la Formación Sabaneta del Paleozoico. Alvarado (2008) después de haber realizado el análisis fotogeológico y de campo correspondiente observó que la traza norte presenta suficientes pruebas de movimiento, con un gran componente de movimiento dextral y una componente normal, a diferencia de la traza sur propuesta por Schubert (1982), la cual no presentaba ninguna muestra de movimiento reciente.

## METODOLOGÍA

### *Discriminación de los eventos*

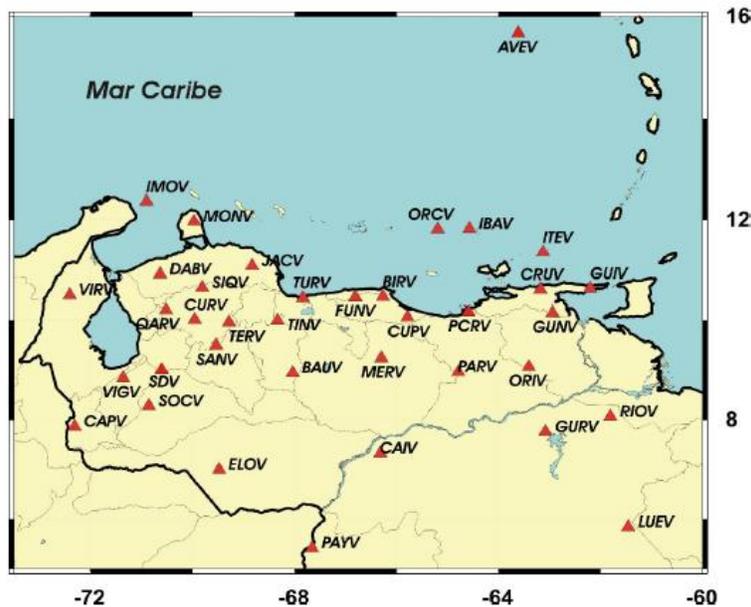
Se relocalizaron 152 eventos sísmicos con una magnitud de momento mayor o igual a 3, ocurridos en el lapso de tiempo desde el 7 de noviembre de 2015 hasta el 31 de marzo de 2016 (En este lapso de tiempo se contabilizaron 962 sismos con magnitud de momento desde 1 a 5,1).

### *Base de datos utilizada*

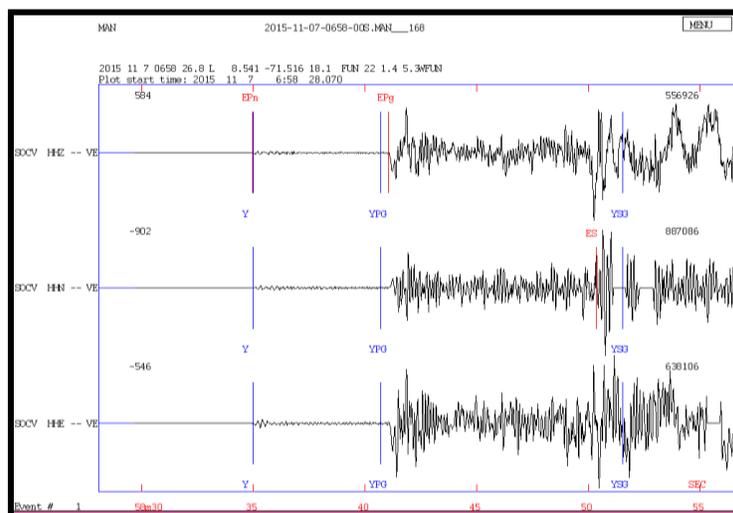
La Red Sismológica Nacional de FUNVISIS se compone de 38 estaciones de banda ancha distribuidas

en todo el territorio nacional. Además, esta red cuenta con el aporte de información de estaciones banda ancha internacionales de Colombia, Curazao, Aruba y Trinidad y Tobago (**Figura 2**).

Esta base de datos también se compone de la ubicación preliminar de los sismos, trabajo elaborado de manera rutinaria por los analistas de FUNVISIS mediante el uso del programa SEISAN (Havskov & Ottemöller, 1989; 1999; Ottemöller *et al.*, 2017), en el cual se observa las formas de onda asociadas a cada estación con su respectiva selección de las fases sísmicas (**Figura 3**).



**Figura 2.** Red Sismológica Nacional (FUNVISIS): 38 estaciones de banda ancha distribuidas en todo el territorio nacional.



**Figura 3.** Visualización de la correspondencia entre las fases sísmicas (teóricas: azul - observadas: rojo) en la relocalización absoluta del evento con fecha 07-11-2015, hora 06:58, en la señal perteneciente a la estación SOCV.

### Definición de modelo de velocidad 1-D

La precisión de la localización hipocentral depende de varios factores que incluyen la geometría de la red de estaciones sismológicas, las fases disponibles, la precisión en la lectura de los tiempos de llegada de las fases y del conocimiento detallado del modelo de velocidades de la zona de estudio (Pavlis, 1986).

Para mejorar la ubicación hipocentral de los sismos, se generó un modelo de velocidad local para la zona de estudio (**Tabla 1**). Para ello se utilizaron los datos correspondientes al modelo de velocidades 2D generado por Saavedra (2015), a partir de estudios sísmicos de gran ángulo con la técnica de trazado de rayos correspondiente al disparo Centro Andes (El Vigía - Valera) del proyecto Geociencia Integral de los Andes de Mérida (GIAME).

FUNVISIS		NUEVO MODELO	
Tope de la Interfase (km)	Velocidad de las ondas P (km/s)	Tope de la Interfase (km)	Velocidad de las ondas P (km/s)
0	5,7	0	5,7
9,5	6,3	24	6,8
35	8,3	50	8,1
100	8,5	100	8,5

**Tabla 1.** a) Modelo de velocidad utilizado en FUNVISIS y nuevo modelo de velocidad local generado para este estudio.

### Relocalizaciones

Para realizar la relocalización absoluta se utilizó el programa HYPOCENTER dentro del software SEISAN (Lienert & Havskov, 1995). HYPOCENTER localiza sismos locales, regionales y globales. El programa acepta las fases P, Pg, Pn, S, Sg, Sn, Pb, Sb, Rg, T y Lg, la mayoría pertenecientes a las fases del modelo IASPEI (Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra). Maneja un esquema de pesos para los residuos, utiliza los azimut relativos a cada estación y calcula distintas magnitudes.

La relocalización relativa se realizó con el programa VELEST dentro del software SEISAN (Kissling *et al.*, 1994). VELEST trabaja con el método de localización relativa JHD, mejora el problema de acoplamiento entre los hipocentros y el modelo de velocidad para sismos locales. El programa simultáneamente localiza los sismos y calcula un modelo de velocidad 1D con correcciones de estaciones, donde las soluciones vienen a través del residuo o RMS mínimo (el residuo se define

como la diferencia entre los tiempos de viaje observados y calculados de las ondas, mientras que el RMS es la raíz cuadrada del residuo).

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para mejorar la ubicación espacial y la determinación del tiempo origen de estos eventos, se realizó una mejor escogencia de las llegadas de las fases sísmicas, se aumentó la variedad de las fases sísmicas identificadas en la localización (las nuevas fases sísmicas empleadas son Pg, Pn, Sg y Sn) y se añadieron estaciones sismológicas (en este sentido, se incorporaron las estaciones sismológicas que registraron los eventos con buena señal y no fueron tomadas en cuenta para la localización inicial de FUNVISIS). Además se utilizó en la relocalización el modelo de velocidad local previamente generado. En la **Figura 3** se puede apreciar la correspondencia entre las fases observadas (color rojo) y las fases teóricas (color azul), lo cual es un indicativo de que el modelo de velocidad usado se ajusta a los parámetros geológicos y físicos que caracterizan la zona de estudio. Se utilizó un total de 2844 lecturas, de las cuales 1710 corresponden al número de lecturas de la onda P y 1134 de la onda S.

### RMS de las relocalizaciones

La localización original realizada en FUNVISIS reporta un RMS igual a 0,98. Luego de la relocalización absoluta los valores de tiempo de viaje residuales disminuyeron, obteniendo un RMS igual a 0,67, mientras que para la relocalización relativa se obtuvo un valor residual aún más bajo igual a 0,59. Estos valores demuestran que el RMS disminuye con las relocalizaciones, siendo un indicativo de la mejora en la ubicación espacial de los eventos estudiados (Ottemöeller *et al.*, 2011).

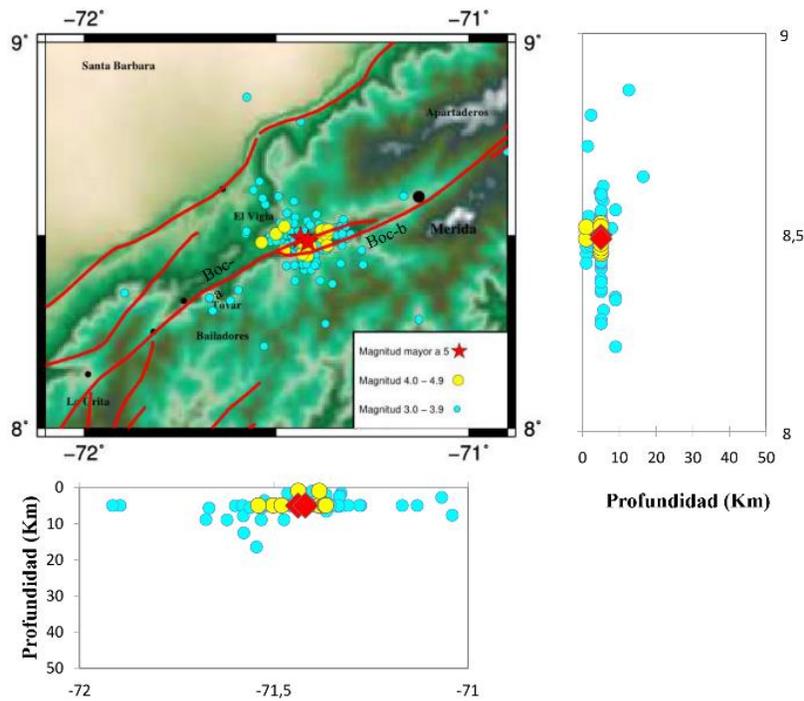
### Características de la distribución de la secuencia sísmica

Las **figuras 5** y **6** muestran la distribución epicentral de las relocalizaciones. Al compararlas con las localización inicial (**Figura 4**), se puede apreciar que la dispersión epicentral de los eventos en ambas relocalización disminuye, evidenciándose una menor dispersión en la relocalización relativa. Por otro lado, los sismos tienden a concentrarse hacia el norte, aproximándose a la traza Boc-a, o traza norte, siendo ésta la que presenta evidencias de actividad sismogénica, tal como lo indica Alvarado (2008).

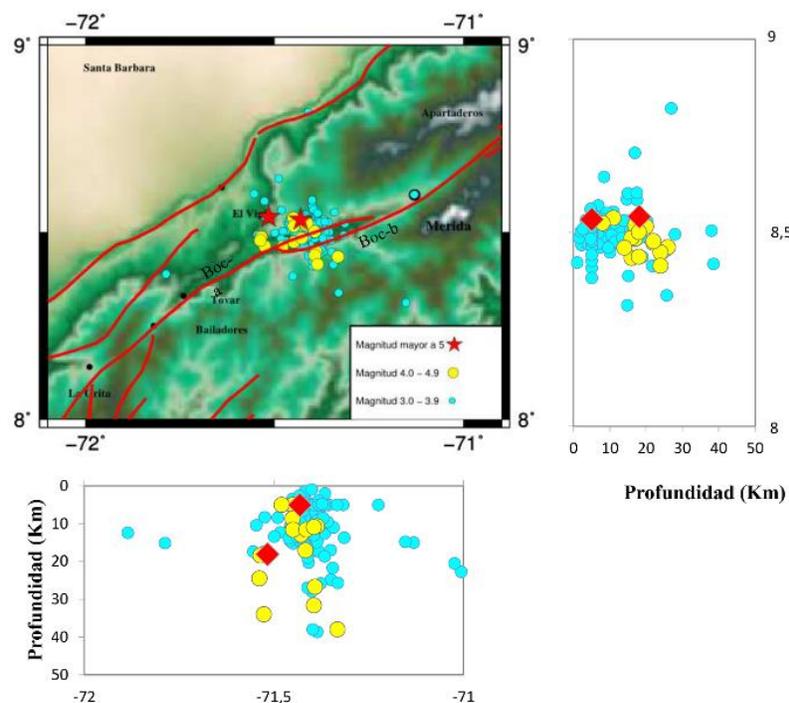
La distribución hipocentral de los perfiles A y B se muestra en la **figura 7** (sus orientaciones se presentan en la **figura 6**). Se observa en estos perfiles de profundidad hipocentral que la longitud y el ancho de la ruptura están

alrededor de los 25 Km. El 95% de los sismos son someros, están distribuidos principalmente en el rango de profundidad entre 5-25 km. Esta distribución de

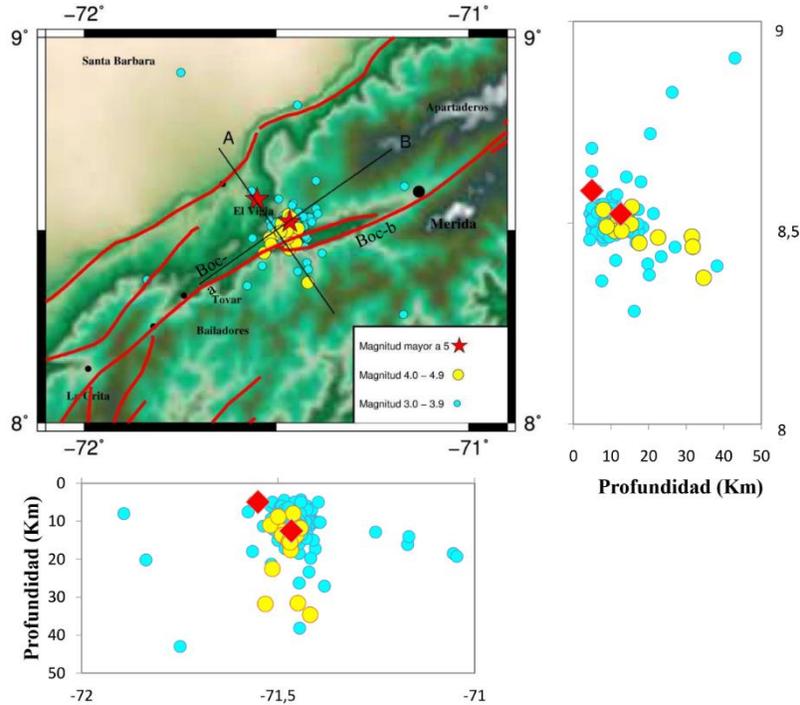
profundidad focal se acopla con la sismicidad asociada al levantamiento de la cadena de los Andes, restringida principalmente a la corteza superior.



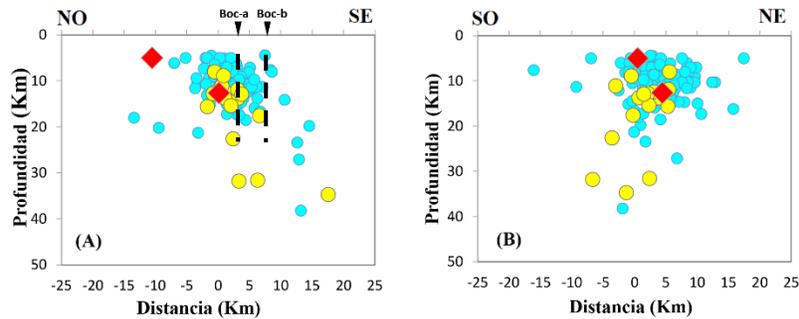
**Figura 4.** Mapa de la zona epicentral. Distribución inicial de los epicentros y perfiles de profundidad a lo largo de la longitud y latitud. Los datos provienen de la Red Sismológica Nacional y de la localización realizada en FUNVISIS.



**Figura 5.** Relocalización absoluta: Distribución de los epicentros y perfiles de profundidad a lo largo de la longitud y latitud.



**Figura 6.** Relocalización relativa: Distribución de los epicentros y perfiles de profundidad a lo largo de la longitud y latitud. El perfil A tiene una orientación N145E, perpendicular a la falla de Boconó. El perfil B tiene una orientación N55E, paralelo a la falla de Boconó.



**Figura 7.** Perfiles de profundidad focal. El perfil A tiene una orientación N145E, perpendicular a la falla de Boconó. El perfil B tiene una orientación N55E, paralelo a la falla de Boconó. Boc-a y Boc-b representan la forma deducida de las trazas norte y sur respectivamente de la falla de Boconó. Los triángulos indican las trazas de falla en la superficie.

El 5% de los sismos están ubicados en la corteza inferior, alcanzando una profundidad máxima de 43 km. Estos sismos podrían estar asociados a fallamiento inverso, fallas de compresión o fallas subsidiarias de la Falla de Boconó, tal como proponen diversos autores (Laffaille, 1981; Laffaille & Estevez, 1986; Estevez & Schubert, 1993), que además asocian este tipo de fallas a cuencas de tracción y zonas de compresión, comunes en esta región, y que llegan a alcanzar profundidades que superan los 40 km.

En el perfil A (orientación N145°E, perpendicular a la falla de Boconó), se observa la interpretación de las

trazas de falla Boc-a y Boc-b en profundidad. Se aprecia que la mayoría de los sismos están comprendidos dentro de la traza de falla Boc-a o traza norte, siendo esta la que presenta actividad sismogénica según Alvarado (2008).

#### **Profundidad hipocentral**

Se observa en la **Figura 4** que la profundidad de los eventos obtenida por FUNVISIS se concentra en los primeros 10 km, evidenciándose una franja de sismos con hipocentros a una profundidad de 5 km que corresponde a los eventos cuya profundidad hipocentral converge a cero km (estos son fijados manualmente a 5 km). En las **Figuras 5 y 6** se aprecia que a través de las

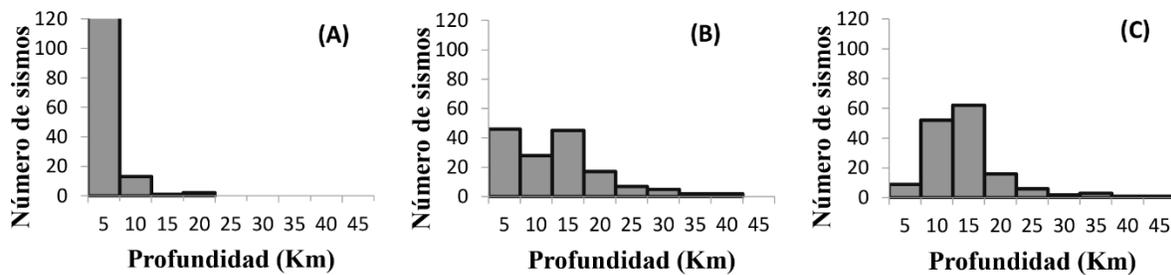
relocalizaciones se obtuvieron las profundidades de ocurrencia de los sismos, se observa la reubicación de los eventos a 5 km de profundidad (eventos ubicados por el programa de localización a cero km de profundidad), quedando un total de 11 sismos ubicados por el programa a cero km para la relocalización absoluta y de 6 sismos para la relocalización relativa (inicialmente, localización FUNVISIS eran 110 sismos).

Los histogramas de la distribución de la profundidad focal (**Figura 8**) muestran que en ambas relocalizaciones el 95% de los sismos se ubican en la corteza superior, distribuidos en un rango entre 5-25 km. Ésta distribución hipocentral se asocia a la actividad sísmica

del levantamiento de la cadena de los Andes, restringida principalmente a la corteza superior y se presenta a profundidades entre los 20-25 km, tal como indica Audemard (2003).

El 5% de los eventos se encuentran ubicados en la corteza inferior, distribuidos en el rango entre 25-43 km de profundidad. Estos sismos podrían estar asociados a fallamiento inverso, fallas de compresión o a fallas subsidiarias de la Falla de Boconó.

Inicialmente (localización FUNVISIS), el 89% de los sismos se concentran en el rango entre 0-5 km.



**Figura 8.** Histograma de la distribución de la profundidad focal. Localización inicial (A). Relocalización absoluta (B). Relocalización relativa (C).

## DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

La secuencia sísmica de Lagunillas, estado Mérida, ocurre en la zona de fallas de Boconó, entre los segmentos Boc-a y Boc-b identificadas por Audemard (2014), en la región de la población de Lagunillas (**Figura 1**), a través de estudios paleosísmicos. La falla de Boconó es un accidente transcurrente dextral, el cual está orientado en dirección SO-NE. Sin embargo, existen mecanismos focales que muestran soluciones correspondientes a una gran variedad de fallamiento normal e inverso, asociado a fallas subsidiarias y, particularmente, a cuencas de tracción y zonas de compresión (Laffaille, 1981). La distribución de la profundidad de la sismicidad asociada al levantamiento de la cadena se presenta a profundidades entre los primeros 20-25 km (Audemard, 2003).

A partir de los resultados obtenidos de la relocalización absoluta y relativa de 152 eventos sísmicos con magnitud de momento mayor o igual a 3 pertenecientes a la secuencia sísmica de Lagunillas en el estado Mérida, se puede establecer las siguientes conclusiones:

- El modelo de velocidad local 1D generado se adecua a las condiciones geológicas y físicas de la zona de estudio, lo cual se puede apreciar en la correspondencia

entre las fases observadas y las fases teóricas de la localización (**Figura 3**).

- A partir del análisis del RMS se evidencia que la relocalizaciones (absoluta y relativa) aportan una ubicación espacial más óptima para los eventos respecto a la localización inicial realizada por FUNVISIS, presentando la relocalización relativa un valor de RMS más bajo. Esto se debe principalmente a la incorporación en el procesado de los datos de un modelo de velocidad local adecuado y coherente para la zona de estudio, la identificación de una mayor variedad de fases sísmicas y la mejora de la ubicación de las mismas en las formas de onda de las señales. Además de emplear el método de relocalización relativa de JHD que reduce de manera significativa la dispersión entre los hipocentros.

- La longitud de la ruptura es de alrededor de 20 km, mientras que el ancho de la ruptura está alrededor de los 25 km.

- En ambas relocalizaciones se disminuyó la dispersión de los eventos, donde los sismos tienden a concentrarse hacia el norte, a ubicarse cercanos a la traza Boc-a, o traza norte, la cual presenta evidencias de actividad sísmogénica, tal como indica Alvarado (2008).

- Los eventos relocalizados son someros, el 95% de los sismos se ubica en la corteza superior, en un rango de profundidad entre 5-25 km. Esta sismicidad se asocia a la actividad sísmica del levantamiento de la cadena de

los Andes que se presenta a profundidades inferiores a los 20-25 km, tal como indica Audemard (2003).

- Para futuros trabajos debería considerarse incluir modelos de velocidad 3D.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los árbitros anónimos por sus comentarios y sugerencias. Los autores agradecen también al Dr. Carlos Reinoza por su apoyo en la elaboración de este artículo. Las figuras se generaron con el programa GMT (Wessel & Smith, 1991).

## REFERENCIAS

- ALVARADO M., 2008. Caracterización Neotectónica de la cuenca La González. Estado Mérida, Venezuela. Tesis de Maestría, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 89 p.
- AUDEMARD F. A., 1997. Holocene and historical earthquakes on the Boconó fault system, southern Venezuelan Andes: Trench confirmation. *Journal of Geodynamics*, 24: 155-167.
- AUDEMARD F. A., 2003. Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. *Quaternary International*, 101-102C: 43-65.
- AUDEMARD F. A., 2014. Segmentación sismogénica de la falla de Boconó a partir de investigaciones paleosísmicas por trincheras, Venezuela occidental: ¿Migración de la ruptura hacia el noreste en tiempos históricos?. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (2): 247-259.
- AUDEMARD F. E. & AUDEMARD, F. A., 2002. Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean Geodynamic Interaction. *Tectonophysics* 345; 299-327.
- ESTEVEZ R. & SCHUBERT C., 1993. Sismotectónica y prevención sísmica en los Andes Venezolanos. *Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismoresistente y Primeras Jornadas Andinas de Ingeniería Estructural*. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- HAVSKOV, J. & OTTEMOELLER, L., 1989. Routine Data Processing in Earthquake Seismology with Sample Data. Universidad de Bergen, Noruega, p. 352.
- HAVSKOV, J. & OTTEMOELLER, L., 1999. SEISAN earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70(5): 532-534.
- OTTEMOELLER, L., VOSS, P. & HAVSKOV, J., 2017. SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and Mac OS X. Recuperado de: <http://seis.geus.net/software/seisan/>
- HUSEN, S., KISSLING, E. & CLINTON, J. F., 2011. Local and regional minimum 1D models for earthquake location and data quality assessment in complex tectonic regions: application to Switzerland. *Swiss Journal of Geosciences*, 104(3); 455-469.
- KISSLING, E., ELLSWORTH, W. L., EBERHART-PHILLIPS, D. & KRADOLFER, U., 1994. Initial reference model in local earthquake tomography. *Journal of Geophysical Research*, 99(B10): 19635-19646.
- LAFFAILLE, J., 1981. Mecanismos focales de algunos eventos sísmicos en el occidente de Venezuela. (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes (ULA), Mérida.
- LAFFAILLE, J. & ESTEVEZ, R., 1986. Modelo sismotectónico para la serranía de El Escorial. *Acta Científica Venezolana*, 37: 121-125.
- LIENERT B. R. & HAVSKOV, J., 1995. A computer program for locating earthquakes both locally and globally, *Seismol. Res. Lett.*, 66: 26-36.
- PAVLIS, G. L., 1986. Appraising earthquake hypocenter location errors: A complete, practical approach for single-event locations. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 76: 1699-1717.
- SAAVEDRA, M. J., 2015. Modelos corticales de velocidades en la región occidental de Venezuela, zona centro-sur de los Andes. Trabajo especial de grado. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas. p. 142.
- SCHUBERT C., 1982. Cuencas de tracción en los Andes merideños y en las montañas del Caribe, Venezuela. *Acta Científica Venezolana*, 33: 389-395.
- WESSEL P. & SMITH, W. H. F., 1991. Free software helps map and display data. *EOS Trans, AGU* 72 (441): 445-446.
- ZHU, A. L., XU, X. W., ZHOU, Y. S., YIN, J. Y., GAN, W. J. & CHEN, G. H., 2005. Relocation of Small Earthquakes In Western Sichuan, China and Its Implications for Active Tectonics. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(3): 692-700.