

# CALIBRACIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO DEL SUBSUELO DE BARQUISIMETO Y CABUDARE A TRAVÉS DE MÉTODOS SÍSMICOS Y LA RESPUESTA ESPECTRAL EN SUPERFICIE

Cecilio Morales<sup>1</sup>; Michael Schmitz<sup>1</sup>; Satish Pullammanappallil<sup>2</sup>

**Forma de citar:** Morales, C., Schmitz, M., y Pullammanappallil, S. 2015. Calibración del modelo geológico – geofísico del subsuelo de Barquisimeto y Cabudare a través de métodos sísmicos y la respuesta espectral en superficie. Boletín de Geología, 37 (1): 57-66.

## RESUMEN

En el marco del proyecto de microzonificación sísmica de Barquisimeto y Cabudare, se ha llevado a cabo la adquisición de datos geológicos, geofísicos y geotécnicos con el objetivo de obtener las características de los sedimentos someros y profundos, tanto de la terraza aluvial de Barquisimeto como de la cuenca de tracción de Cabudare. En este trabajo se utilizan datos de siete (7) perfiles sísmicos de refracción, realizándose una reinterpretación a partir del análisis de secciones sísmicas de microtemores bajo la metodología ReMi, la cual ayudó a definir el perfil de velocidades de ondas de corte  $V_s$  hasta el tope del basamento rocoso. Estos resultados se integran con la información geológica y geotécnica disponible, construyéndose modelos geológicos - geofísicos sobre los cuales se calcula la respuesta espectral en superficie tomando en cuenta la influencia y las características del depósito de suelo que servirá luego para el cálculo de las formas espectrales en superficie según las clases de sitio en Barquisimeto y Cabudare. A partir de la adquisición de datos de sismos reales ( $M_w = 6.4$ , Tucacas 29 de septiembre de 2009), en un observatorio acelerográfico instalado en la terraza aluvial de Barquisimeto en el marco del proyecto, fue posible realizar una calibración de los resultados de las metodologías sísmicas. Utilizando el acelerograma adquirido a la profundidad en roca, se pudo obtener la respuesta espectral en superficie del suelo (a partir de la convolución de éste con el perfil de velocidades  $V_s$  calculadas) y compararla con el espectro de respuesta adquirido por el mismo observatorio acelerográfico en la superficie mostrando un buen ajuste entre las formas espectrales obtenidas.

**Palabras clave:** Respuesta espectral, modelo sísmico, geofísica, microzonificación sísmica, ReMi, Barquisimeto

## CALIBRATION OF THE GEOLOGICAL/GEOPHYSICAL SUBSURFACE MODEL FOR BARQUISIMETO AND CABUDARE USING SEISMIC METHODS AND SURFACE RESPONSE SPECTRA

### ABSTRACT

In the frame of Barquisimeto and Cabudare seismic microzoning project, we have carried out the revision of geological, geophysical and geotechnical data, with the purpose to obtain the characteristics of shallow and deep sediments of both Barquisimeto alluvial terrace and the Cabudare pull-a part basin. For this study, we have used data from seven refraction seismic profiles acquired previously in the area. A reinterpretation applying refraction microtremor (ReMi) method was done in Barquisimeto, which helped to define the shear wave velocity profile. In order to define a geological/geophysical model, these results were integrated with available geological and geotechnical information. The geological/geophysical model was used to calculate the surface response spectrum, useful in engineering design, taking into account the soil depth influence and its characteristics. With this information, the surface spectral response at Barquisimeto and Cabudare was calculated according to the sites conditions. On the other hand, with the acquisition of real earthquake data (Tucacas  $M_w = 6.4$  - September 29, 2009), acquired through an accelerograph observatory installed in the frame of the microzonig project, it was possible to perform a calibration of the soil profile and spectra. Using the accelerograms from the observatory at bedrock, we calculated the spectral response at the soil surface by dynamic modeling, and the result was compared with the response spectrum acquired by the observatory at the surface, from the same earthquake, showing a good fit between both spectra form.

**Keywords:** spectral response, seismic modeling, earthquake engennering, sismic microzoning, ReMi, Barquisimeto

<sup>1</sup> Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, cmorales@funvisis.gob.ve

<sup>2</sup> Optim Software – Reno - Nv, E.E.U.U., satish@optimsoftware.com

## INTRODUCCIÓN

Entre los años 2005 y 2009 se ejecutó el “Proyecto de Microzonificación Sísmica en las Ciudades Caracas y Barquisimeto” cuyo objetivo era la evaluación detallada de la amenaza y respuesta sísmica del suelo en ambas ciudades, basándose tanto en información existente, como en el análisis de información geológica, geomorfológica, geotécnica y geofísica nueva (Hernández *et al.*, 2006; Schmitz *et al.*, 2009; Schmitz *et al.*, 2011). La recomendación de espectros de respuesta elásticos de diseño en superficie que sean útiles en el diseño ingenieril, es uno de los principales objetivos dentro del mencionado proyecto (Hernández *et al.*, 2009), espectros que tomen en cuenta la influencia de los espesores de sedimentos presentes en el área. Esto ha sido motivado principalmente, por la necesidad de complementar los espectros de diseño de la Norma de Edificaciones Sismorresistentes (COVENIN, 2001), en donde el área metropolitana de Barquisimeto se ubica en la Macrozona Sísmica N° 5 con un “Elevado Peligro Sísmico” y con un coeficiente de aceleración máxima horizontal en roca  $A_0 = 0,30$  g, que no toma en cuenta las condiciones locales de los depósitos de sedimentos profundos (mayores a 50 m).

La ciudad de Barquisimeto se encuentra ubicada sobre una terraza aluvial de edad cuaternaria (Pleistoceno Q2 o Q1) con morfología casi plana e inclinación leve al este, producto de una compleja historia geológica que involucra a la Falla de Boconó como el accidente tectónico principal. Por su parte Cabudare, se encuentra emplazada en los sedimentos de edad Holoceno (Q0), descritos como una planicie aluvial de inundación que recubren la cuenca de tracción de Cabudare (FIGURA 1), la cual a su vez es asociada directamente a la transcurrencia dextral del sistema de fallas de Boconó (Giraldo y Audemard, 1997; Rodríguez, 2008).

El sistema de fallas de Boconó, ubicado en el occidente venezolano, es considerado como una zona de fallas sismogénicas activas, con movimiento transcurrente dextral (Stephan, 1982; Schubert, 1984; Giraldo, 1985; entre otros), la cual se extiende desde la depresión del Táchira al SO hasta el poblado de Morón al NE con una longitud aproximada de 500 km. Esta complejidad tectónica puede ser evidenciada por su actividad sísmica pre- instrumental e instrumental, la cual ha sido responsable de terremotos destructores, como lo fueron los de Barquisimeto 1812 y el Tocuyo 1950, en donde ambas ciudades quedaron completamente devastadas.

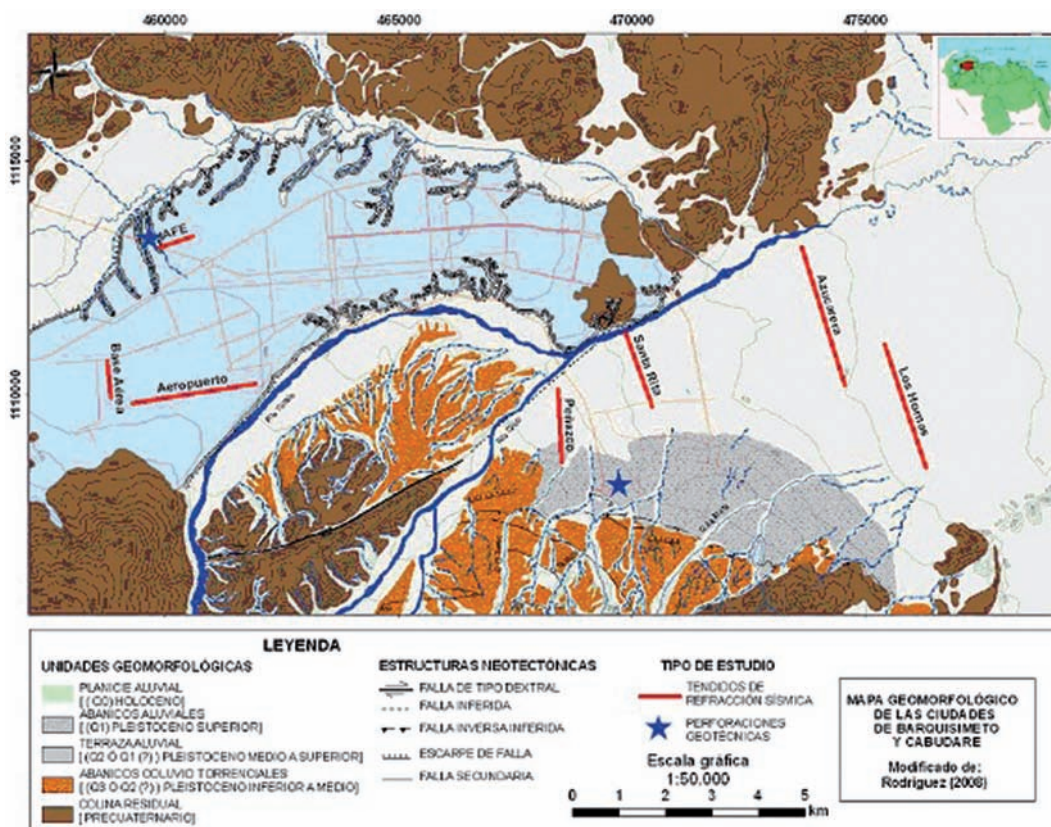


FIGURA 1. Mapa geomorfológico y ubicación del área de estudio. Se señalan los sitios de adquisición de perfiles sísmicos y ubicación de los observatorios acelerográficos (con estrellas).

En Venezuela, eventos de este tipo han sido determinantes para la ingeniería sísmica nacional e internacional en cuanto a la toma de conciencia sobre la importancia de los efectos de sitio, en particular del espesor de los sedimentos, sobre la respuesta sísmica superficial (Papageorgiu and Kim, 1991) y hacen imperiosa la necesidad de conocer el movimiento del terreno ante un evento sísmico a manera de mitigar el riesgo asociado al que está expuesta la población. Para lograr conocer el comportamiento de los depósitos de suelos ante eventos sísmicos, existen diversos métodos para evaluar el efecto de las condiciones locales del suelo, todos basados en la misma suposición, “la respuesta principal en un depósito de suelo es causado por la propagación de las ondas de corte desde el basamento a la superficie” (Schnabel *et al.*, 1972).

En el presente trabajo se presenta una evaluación de los modelos geológicos/geofísicos del subsuelo obtenidos desde el tope del basamento rocoso a la superficie, tanto en Barquisimeto como en Cabudare, y calibrados a su vez utilizando la respuesta espectral en superficie y en roca del sismo de Tucacas de 2009, adquirido en una estación acelerográfica ubicada en la sede del núcleo de ingeniería civil de UCLA en Barquisimeto. Estos modelos del subsuelo sentarán las bases para el posterior modelado dinámico de la respuesta espectral en superficie 1D, tanto en Barquisimeto como en Cabudare, lo que representa a su vez el principal insumo en la obtención de espectros elásticos de diseño que puedan ser recomendados en zonas con similar respuesta sísmica o microzonas sísmicas (Hernández *et al.*, 2009).

## METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO

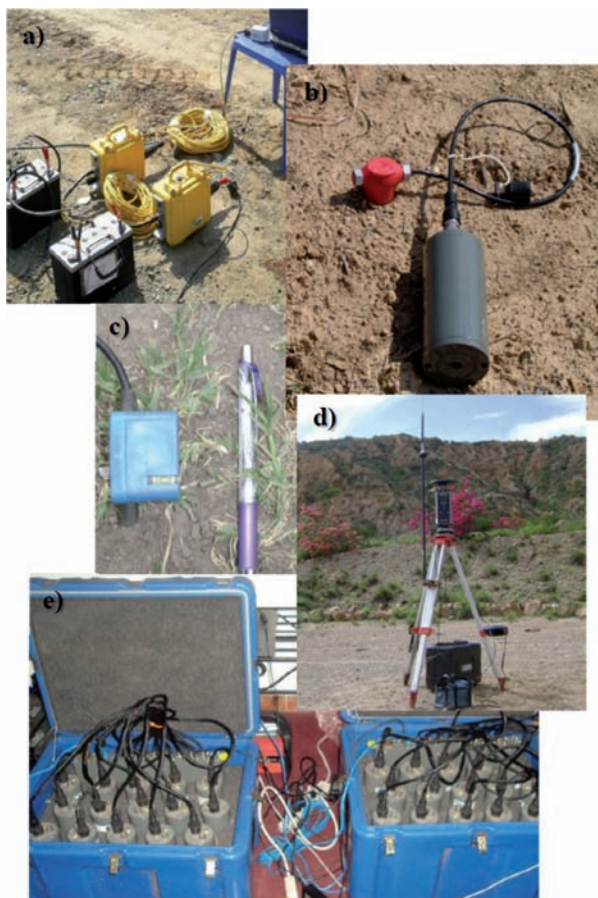
A la fecha de ejecución de este trabajo se contaba con datos de siete perfiles de refracción sísmica, tres de ellos adquiridos en la terraza aluvial de Barquisimeto y cuatro en la cuenca de Cabudare (Morales *et al.*, 2008; ver FIGURA 1). Para este trabajo se tomaron, como caso piloto, los datos de un perfil de refracción sísmica, adquirido en un terreno perteneciente al antiguo IAFE (ahora IFE), en las cercanías al núcleo de Ingeniería Civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado en Barquisimeto. Utilizando los registros originales de la refracción sísmica, para esta investigación se logró obtener una interpretación adicional utilizando la metodología de refracción de microtemores ReMi (Louie, 2001), la cual utiliza registros de ruido sísmico ambiental para obtener

el perfil de velocidades Vs. A continuación se describen las principales características de ambas metodologías.

### Refracción sísmica

**Adquisición de datos:** para la adquisición de los datos de refracción sísmica, que se utilizaron en este trabajo, se generaron frentes de ondas elásticas utilizando como energía fuentes explosivas (mezclas de cargas explosivas de pentolita y anfo) detonadas a un instante de tiempo conocido. Morales *et al.* (2008), además de presentar una recopilación de los resultados obtenidos a partir de las secciones sísmicas, describen una metodología que se siguió en campo para la adquisición de los datos. Esta metodología se resume a continuación:

- 1.- Para la detonación de las cargas explosivas fueron perforados previamente pozos con profundidades de entre 6 y 10 m de profundidad (FIGURA 2a).
- 2.- Las cargas explosivas, mezclas entre 6 y 24 kg de anfo y pentolita, fueron detonadas en el fondo de los pozos previamente perforados (FIGURA 2a).
- 3.- Los perfiles sísmicos fueron del tipo en línea (*in line*) y propagación dividida (*split spread*) con detonaciones en los extremos de los perfiles y dentro del arreglo lineal, respectivamente.
- 4.- Las longitudes de los tendidos variaban desde los 500 hasta los 2500 m.
- 5.- Se utilizó la combinación de sismógrafos y sismómetros independientes de manera de obtener una mejor resolución horizontal en los perfiles (FIGURA 2b y 2c).
- 6.- Se utilizaron combinaciones de geófonos de componente vertical y horizontal para la adquisición de las ondas P y S, respectivamente (FIGURA 2c y 2d).
- 7.- Los sismómetros digitales se sincronizaban siempre un día antes de la adquisición y los datos adquiridos se descargaban el mismo día de la adquisición (FIGURA 2f). La deriva de tiempo estaba en el orden de 5 ms/día.
- 8.- La separación entre los sensores (geófonos) era variable dependiendo de la longitud total del perfil sísmico, entre 10 y 20 m.
- 9.- La posición exacta y la distancia de separación final en campo entre sensores, era determinada mediante el uso del GPS diferencial Thales ZMAX (FIGURA 2e).
- 10.- Para el tiempo cero de disparo se utilizaba una conexión de cable directa desde el detonador dentro del pozo al sismógrafo.



**FIGURA 2.** a) Carga de explosivos en pozos y detonación. b) Sismógrafo digital Geometrics GEODE de 48 canales (24 + 24). c) Geófono de componente vertical. d) Sismómetro digital de un canal marca RefTek 125a (Texan) y geófono de componente vertical. e) Sistema GPS diferencial marca Thales ZMAX. f) Sistema de interconexión y configuración de los equipos RefTek Texan 125a.

**Procesamiento e Interpretación:** el procesamiento de los datos adquiridos mediante la técnica de refracción sísmica, tanto con los 125a RefTek Texan como con el sismógrafo Geometrics GEODE, se realizó completamente bajo ambiente Windows, siguiendo los siguientes pasos:

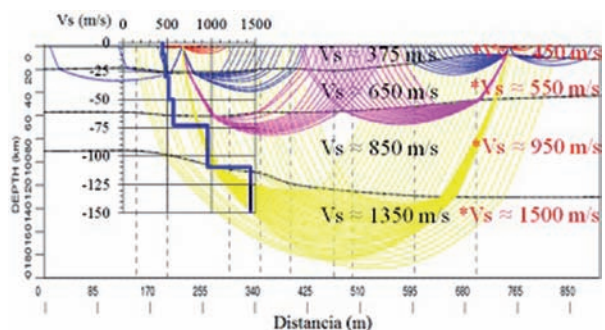
1.- *Conversión de formatos:* se realizó a los datos extraídos de los 125a Texan, ya que es necesario tener los datos de ambos equipos bajo el mismo formato para la interpretación (.seg), el cual es el formato con el se extraen directamente los datos del GEODE). Para ello se utilizaron rutinas o líneas de comando en MSDOS proporcionadas por RefTek para el tratamiento de los datos, el comando *125\_pas* que permite la conversión de los archivos a .DAT que a su vez son escritos utilizando el comando *arcwrite*. La rutina *arcfecht* se utiliza para

extraer del registro continuo de los datos adquiridos en los 125a el tiempo UTC en que se hicieron las detonaciones, lo cual genera archivos con formato .RT. Finalmente se utiliza el comando *rt2seg* para convertir los datos finales al formato deseado.

- 2.- *Definición de la geometría:* con la finalidad de construir las secciones sísmicas, en donde se combinen los datos extraídos de los equipos 125a Texan y de los GEODE, con la posición y/o separación exacta, se utilizaron los datos adquiridos con el GPS diferencial Thales ZMAX. Con estos datos se colocaba como punto de referencia o punto cero la ubicación del primer sensor o sitio de detonación, ubicado más al norte o al este del perfil, y se calculaban las distancias de los receptores a cada uno de los sensores.
- 3.- *Edición de las secciones sísmicas:* para la edición final de las secciones sísmicas, se utilizó principalmente el software comercial REFLEXW (Sandmeier, 2000), a través del cual se realizaron las siguientes tareas:

- Solape y combinación final de los datos extraídos con ambos equipos.
- Actualización de las distancias finales entre cada uno de los sensores.
- Edición de trazas, control de ganancias y aplicación de filtros.
- Selección y exportación de los análisis de las primeras llegadas tanto en ondas P como en S.

Para el análisis e interpretación de los tiempos de llegadas de las ondas P y S, se realizaron modelos bidimensionales del subsuelo (2D) por cada tendido sísmico, utilizando el programa libre de trazado de rayos Rayinvr (Zelt y Smith, 1992) en ambiente linux (ejemplo en la FIGURA 3).



**FIGURA 3.** Modelo sísmico 2D de ondas de corte Vs reinterpretado para los antiguos terrenos del "IAFE" en la terraza aluvial de Barquisimeto. Se compara con el modelo 1D obtenido a partir de la refracción de microretomores (ReMi) y se señalan con asterisco las velocidades reportadas en Morales *et al.*, (2008).

## Refracción de Microtremores (ReMi)

**Adquisición de datos:** el método sísmico de refracción de microtremores, o por sus siglas en inglés *ReMi* propuesto por Louie (2001), constituye uno de los más recientes avances entre los métodos sísmicos geofísicos aplicados a la caracterización de sitios y a la evaluación de terrenos para la ingeniería civil. Es un método híbrido que puede combinar fuentes activas y pasivas para realizar un análisis del contenido de microtremores (ruido sísmico natural o de fondo) en secciones sísmicas adquiridas en campo. El método ReMi utiliza como principal fuente de energía el ruido sísmico de fondo generado en entornos urbanos el cual es adquirido de forma fácil y práctica, sin necesidad de grandes mandarrías o fuentes de peso externa, en arreglos lineales de un número determinado de sensores (geófonos) con separación entre ellos conocida.

La técnica ReMi consiste en determinar la distribución de los valores de la velocidad de las ondas de corte o cizalla ( $V_s$ ) a través del terreno, a partir del análisis espectral del ruido sísmico ambiental. Las bases teóricas del método son las mismas que los Análisis Espectrales de Ondas Superficiales *SASW* (Nazarian and Stokoe, 1984); y los Análisis Multicanales de Ondas Superficiales *MASW* (Park *et al.*, 1999). A una colección de secciones sísmicas (entre 10 y 15 registros) adquiridas en campo se le aplica una técnica de análisis de velocidad en el dominio del tiempo, el cual separa de manera efectiva las *Ondas Rayleigh* de otras llegadas, como lo son: las ondas de cuerpo, ondas de aire y otro tipo de ruido coherente. Transformando el resultado de la velocidad en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, es posible realizar una combinación de muchas llegadas sobre un largo período del tiempo y permitir el fácil reconocimiento de la dispersión de las ondas superficiales.

Louie (2001) basa la metodología ReMi en dos ideas fundamentales: La primera, es que el equipo común de registro de refracción sísmica (sismógrafos o arreglos de sismómetros), se coloca en forma idéntica a las mediciones de refracción de ondas elásticas, para grabar efectivamente ondas superficiales (microtremores) en frecuencias de 2 Hz a 25 Hz. La segunda idea es que una simple transformada en 2D de lentitud - frecuencia ( $p$ - $f$ ) de un registro de microtremores, puede separar ondas Rayleigh de otras llegadas sísmicas, y permitir el reconocimiento de la velocidad de fase verdadera de las velocidades aparentes. Para aplicar este método se deben realizar los siguientes cuatro (4) pasos: 1) adquisición en campo de ventanas de tiempos de microtremores, 2) el análisis espectral de velocidades, 3) la selección de la

dispersión fase - velocidad de la onda Rayleigh y 4) el modelado de la velocidad de onda S.

**Procesamiento e interpretación:** el procesamiento e interpretación bajo esta metodología se pudo realizar sólo en el perfil sísmico adquirido al frente del núcleo de ingeniería civil de la Universidad Lisandro Alvarado (UCLA) en Barquisimeto (ver FIGURA 3) debido a que la geometría de adquisición empleada en este perfil se ajustó a la requerida por la metodología ReMi (geófonos separados equidistantemente en arreglos lineales). Básicamente se utilizaron sólo los datos adquiridos a partir del arreglo lineal realizado con los 125a Texan y se obtuvieron los archivos en formato .SEGY siguiendo la línea de comandos previamente descritos en el primer paso para la conversión de formatos en la refracción sísmica. Una vez convertidos los datos de ruido sísmico ambiental en formato .SEGY se utilizaron dos programas especializados de la casa Optim Software, el SeisOpt® (Louie, 2001) para importar y preprocesar los datos, así como para la definición de la curva de dispersión, la cual es utilizada en el Disper® para la inversión de las velocidades de fase a velocidades de ondas de corte y la obtención de los modelos 1D.

El procedimiento para el procesamiento e interpretación de los resultados se detalla a continuación:

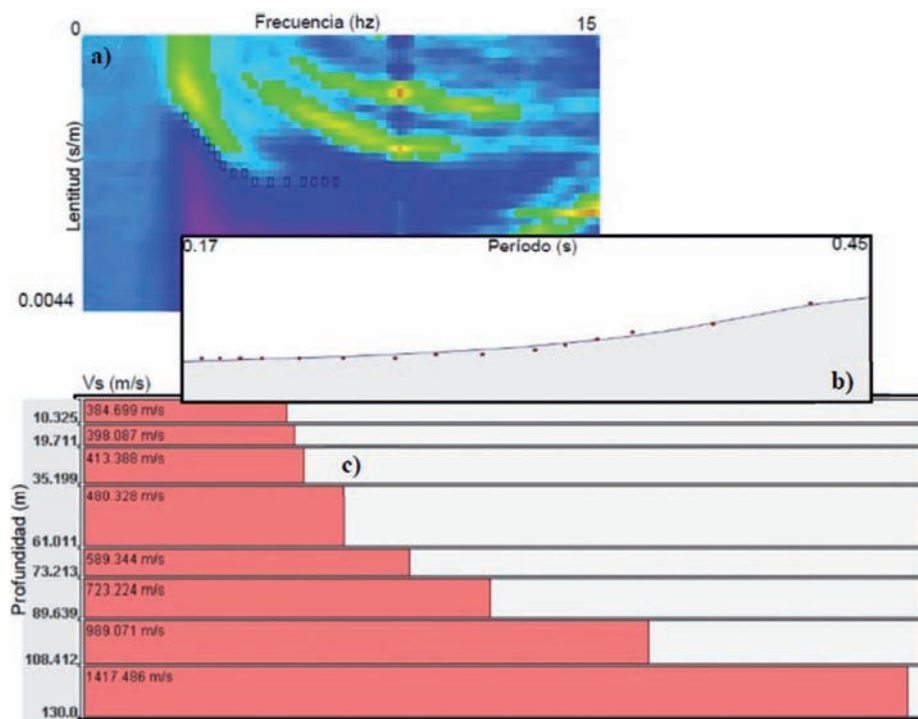
- 1.- *Apertura de datos y visualización de los datos de campo:* es posible seleccionar cualquier cantidad de datos para visualizar. Existe la opción de importar datos en formato .SEGY y/o .SEG2.
- 2.- *Pre-procesamiento:* se utiliza para normalizar la ganancia en cada una de las trazas de los registros sísmicos y promediar las desviaciones de los picos en cada traza para centrarla.
- 3.- *Eliminar o aplicar geometría de adquisición:* en este paso se puede borrar o aplicar una geometría presente en el encabezado de los datos de microtremores. Generalmente, si la distancia entre los sensores fue equidistante entre sí, la geometría contenida en el encabezado de los datos en la sección sísmica se borra, ya que en un paso subsiguiente es posible introducir la separación entre los sensores.
- 4.- *Cálculo del espectro de velocidad por cada registro:* transformación lentitud-frecuencia. Se calcula el espectro de velocidad de cada registro cuyo proceso involucra la razón de la dispersión de la velocidad de fase y la transformación de Fourier en todos los vectores (Louie, 2001). El resultado final es una imagen en el dominio  $p$ - $\tau$  (lentitud - frecuencia).
- 5.- *Combinación de imágenes  $p$ - $\tau$  por registro:* el programa ofrece la posibilidad de combinar las imágenes  $p$ - $\tau$  resultantes de cada uno de los

registros individuales en una sola promedio. Sobre la imagen final se podrán escoger los puntos (*piks*) que conforman la curva de dispersión.

- 6.- *Salvar y exportar la curva de dispersión seleccionada:* una vez realizada la escogencia de los puntos que definen la curva de dispersión (*picks*), estos puntos pueden ser guardados para luego ser utilizados en el modulo Disper® a través del cual se realizará el modelado e interpretación.
- 7.- *Modelado e interpretación con el modulo SeisOpDisper®:* el módulo SeisOp Disper® usa

un algoritmo interactivo de modelado de dispersión basado en el método descrito en Saito (1979), a través del cual es posible realizar la inversión de la curva de dispersión (previamente seleccionada en el paso anterior) para así obtener (manualmente) el número de capas y espesor de cada una de ellas, así como la velocidad de onda de corte  $V_s$ .

En la FIGURA 4 se muestra una gráfica que esquematiza los pasos desde la adquisición, procesamiento e interpretación bajo la metodología ReMi.



**FIGURA 4.** Ejemplo de procesamiento de datos ReMi. **a)** Espectro de la gráfica de dispersión y selección de curva. **b)** Ajuste e inversión de la curva de dispersión. **c)** Modelo 1D obtenido de la inversión.

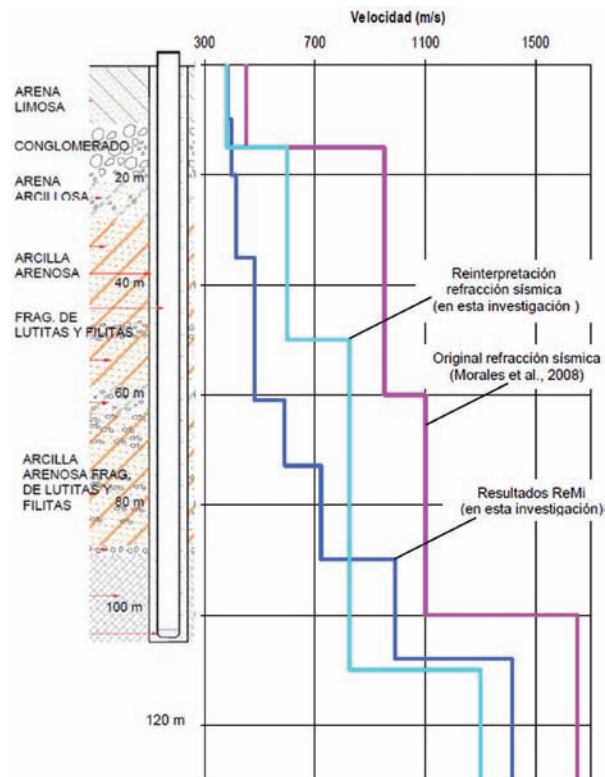
## RESULTADOS

En la FIGURA 5 se observan los modelos 1D del subsuelo, con la integración de los resultados obtenidos a partir de los métodos sísmicos adquiridos (Refracción sísmica y ReMi) en la terraza aluvial de Barquisimeto y la columna estratigráfica proveniente del pozo perforado hasta la profundidad del basamento ( $\approx 92$  m) para el observatorio acelerográfico, ubicado a unos 100 m de distancia en la sede del núcleo de ingeniería civil UCLA – Barquisimeto.

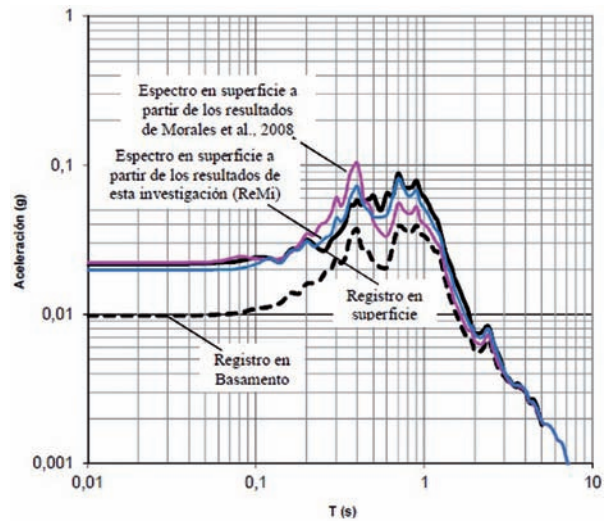
Como evidencia la figura anterior (FIGURA 5), las velocidades de ondas de corte que se obtienen a partir de ambos métodos, muestran para un mismo estrato diferentes velocidades, discrepancia que se puede

atribuir al análisis e interpretación de cada método por separado, por lo que se realizaron análisis adicionales para definir el correcto perfil de velocidades  $V_s$ . Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de estos modelos es la obtención de la respuesta espectral del suelo en superficie, resultado que servirá adicionalmente como el principal insumo para la elaboración de espectros elásticos de diseño a zonas con condiciones geológicas/geofísicas similares. Para lograr calibrar el perfil de velocidades  $V_s$  se utilizaron los registros acelerográficos del sismo de Tucacas del 12 de septiembre del 2009 (FUNVISIS, 2009), el cual fue registrado por el observatorio acelerográfico de UCLA – Barquisimeto, con una magnitud  $M_w=6.4$  y cuyo epicentro se ubicó en la zona centro – norte costera venezolana (norte de Tucacas, Edo. Falcón) a

unos 150 km de distancia aproximadamente. Ambos modelos 1D fueron reconstruidos en el software ProShake® (Schnabel *et al.*, 1972), y haciendo uso del registro acelerográfico adquirido por el observatorio a la profundidad del basamento rocoso, el cual fue introducido como excitación sísmica a la profundidad adecuada, se obtuvo la respuesta espectral en superficie de ambos modelos, (convolución de ambos modelos de velocidades  $V_s$ , tanto de Morales *et al.*, 2008 como las del modelo propuesta en este trabajo utilizando la metodología ReMi, con el acelerograma real del sismo de Tucacas de 2009). En la FIGURA 6, se muestran las formas espectrales obtenidas en superficie utilizando los valores de  $V_s$  reportados en cada modelo 1D (refracción sísmica y ReMi) e introduciendo como entrada, a la profundidad del basamento, el acelerograma del sismo registrado por el observatorio acelerográfico a esa profundidad. Ambos resultados se comparan adicionalmente con la forma espectral registradas en superficie, por el mismo observatorio acelerográfico, del sismo de Tucacas de 2009.



**FIGURA 5.** A la izquierda, columna estratigráfica del pozo de 100 m de profundidad en el núcleo de ingeniería civil UCLA – Barquisimeto (Gisca, 2006). A la derecha, Modelos 1D obtenidos a partir de los resultados de sísmica de refracción y refracción de microtemores (ReMi) en Barquisimeto.



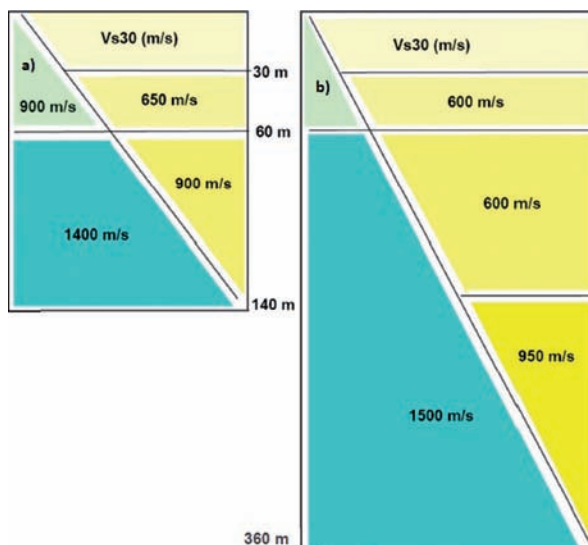
**FIGURA 6.** Comparación de las formas espectrales obtenidas a partir del sismo de Tucacas 2009 (FUNVISIS, 2009). Acelerogramas grabados en la estación acelerográfica del núcleo de Ingeniería Civil de la UCLA Barquisimeto y las obtenidas a partir de los modelos geológicos – geofísicos de Morales *et al.*, (2008) y de esta investigación.

En la FIGURA 6 se observa como la forma espectral del suelo en superficie obtenida a partir de las velocidades  $V_s$  interpretadas por la metodología ReMi, se ajusta muy bien a la forma espectral del registro en superficie del observatorio acelerográfico, lo que sugiere que este perfil de velocidades  $V_s$  es el que más se ajusta a las condiciones de sitio del lugar y nos ayuda a calibrar el modelo de velocidades  $V_s$  propuesto inicialmente por Morales *et al.* (2008).

En la TABLA 1 se observan las velocidades  $V_s$  reportadas originalmente por Morales *et al.* (2008) con las modificaciones pertinentes producto de esta reinterpretación, esencialmente en los perfiles “IAFE” en Barquisimeto y “Santa Rita” en Cabudare. Es válido señalar que las velocidades reportadas en la TABLA 1, además del mapa de distribución de velocidades en los primeros 30 de profundidad ( $V_{s30}$ ) (Morales, 2012) y el mapa de profundidad de basamento o espesor sedimentario (Reinoza *et al.*, 2011), fueron utilizados para obtener los modelos del subsuelo desde la superficie a la profundidad de basamento con sus respectivas variaciones de  $V_s$  (m/s) y espesor de sedimentos (m) que se utilizarán en el modelado dinámico 1D de la respuesta espectral en superficie para Barquisimeto y Cabudare (FIGURA 7a y 7b, respectivamente).

**TABLA 1.** Resumen de las velocidades de ondas sísmicas Vs de Morales *et al.*, (2008) y en este trabajo.

PERFIL	Vp (m/s)	Vs (m/s)	PROF. (m)	INTERPRETACIÓN
<b>IAFE (terrazza aluvial)</b>	1.000	380	7 a 20	Suelo y sedimentos sueltos
	1.650	600	40 a 60	Sedimentos de baja plasticidad de la terraza
	2.200	825	90 a 130	Arenas arcillosas con gravas
	3.150	1.300		Areniscas Formación Bobare
<b>Base Aérea (terrazza aluvial)</b>	600	200	2 a 7	Suelo
	1.250	750?	35 a 40	Sedimentos sueltos
	2.250	950?	90 a 100?	Sedimentos consolidados
	3.750?			Formación Bobare
<b>Aeropuerto (terrazza aluvial)</b>	800	450	5	Suelo
	1.350	900	60	Sedimentos sueltos
	2.200-2.500	1.400	150	Sedimentos consolidados
	3.200	1.900-2.000		Formación Bobare
<b>Santa Rita (planicie aluvial)</b>	700-800	200 - 300	15 a 30	Sedimentos sueltos de la cuenca a sedimentos intermedios
	2.600	750	130 a 190	Sedimentos consolidados
	3.650	1.500		Formación Mamey
<b>Peñuzco (planicie aluvial)</b>	750	350	10 a 40	Sedimentos sueltos de la cuenca
	1.300?	750-950	95	Sedimentos intermedios (Sedimentos intermedios)
	2.150?	1.200	220	Sedimentos consolidados
	3.400-3.500	1.700		Formación Mamey
<b>Los Hornos (cuenca de tracción)</b>	350-250	250-150	5 a 25	Suelo y sedimento suelto
	1.350-1.500?	300-550	40 a 100	Sedimentos sueltos de la cuenca (Sedimentos intermedios)
	2.500?	750-850	150 a 340	Sedimentos consolidados
	3.000-3.500	1.600		Formación Mamey
<b>Azucarera (cuenca de tracción)</b>	700-800	150-300	20 a 35	Suelo y sedimento suelto
	1.500-1.850	400-500	110 a 140	Sedimentos sueltos de la cuenca (Sedimentos intermedios)
	2.600	700-900	250 a 400	Sedimentos consolidados
	3.400	1.250		Formación Mamey



**FIGURA 7.** Modelos geológicos – geofísicos del subsuelo, obtenidos a partir de la interpretación sísmica y la integración de datos geotécnicos, tanto para (a) la terraza aluvial de Barquisimeto como para (b) la cuenca de tracción de Cabudare.

## CONCLUSIONES

A través de la re-interpretación de datos sísmicos (refracción sísmica y ReMi), fue posible determinar un nuevo perfil de velocidades de propagación de las ondas de corte (Vs) desde el basamento rocoso hasta la superficie, tanto en la terraza aluvial de Barquisimeto como en la cuenca de tracción de Cabudare.

Mediante la integración y comparación de resultados geofísicos, geológicos y geotécnicos fue posible la construcción de nuevos modelos geológicos/geofísicos adaptados a las condiciones de sitio tanto en la Terraza Aluvial de Barquisimeto como en la Cuenca de Tracción de Cabudare, que servirán para el cálculo de la respuesta espectral en superficie a través de modelados dinámicos 1D.

El método de refracción de microtremores (ReMi), demostró ser una metodología eficiente para definir el perfil de velocidades de ondas corte (Vs) en ambientes urbanos.

Se logró calibrar el modelo del subsuelo a partir de la información geológica, geofísica, geotécnica y acelerográfica disponible en el área de estudio, logrando comparar formas espectrales adquiridas en superficie a partir del registro acelerográfico del sismo de Tucacas en el 2009 con formas espectrales obtenidas a partir del estudio paramétrico 1D o modelado dinámico de la respuesta espectral en superficie.



De manera de ir realizando mejoras en estos nuevos modelos geológicos – geofísicos presentados en este trabajo, se recomienda realizar calibraciones adicionales, en la medida de lo posible, con datos de sismos reales provenientes de distintas distancias epicentrales y con variadas magnitudes, que pudiesen ser adquiridos por los mismos observatorios acelerográficos dispuestos en Barquisimeto y Cabudare.

Se recomienda obtener formas espectrales en superficie, a partir de un estudio paramétrico 1D detallado, en función de las distintas clases de sitio o las diversas combinaciones de Vs (m/s) y espesor de sedimentos (m) interpretadas para Barquisimeto y Cabudare en los modelos geológicos/geofísicos obtenidos en esta investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Proyecto financiado por FONACIT 200900738 con fondos del convenio BID – FONACIT.

## REFERENCIAS

- COVENIN. 2001. Edificaciones Sismorresistentes. Norma Venezolana COVENIN 1756:2001. Comisión Venezolana de Normas Industriales, FONDONORMA, MCT, MINFRA, FUNVISIS, Caracas, Venezuela.
- FUNVISIS. 2009. The Mw 6.4 Tucacas, Venezuela Quake of September 12, 2009. Learning from earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute (EERI) Newsletter, 43 (11): 6-7.
- Giraldo, C. 1985. Neotectonique et sismotectonique de la region d'El Tocuyo-San Felipe (Vénézuélacentro-occidental). Tesis doctoral. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Languedoc, Francia, 121p.
- Giraldo, C. and Audemard, F. 1997. The traction basin of Cabudare, west-central Venezuela (La Cuenca de Tracción de Cabudare, Venezuela centro-occidental). VIII Congreso Geológico Venezolano, Porlamar, 1: 351-357.
- GISCA, 2006. Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudad de Barquisimeto. Informe Barquisimeto, 45p.
- Hernández, J.J., Schmitz, M., Audemard, F., y Malavé G. 2006. Marco conceptual del Proyecto de Microzonificación de Caracas y Barquisimeto. VIII Congreso Venezolano de Sismología de Ingeniería Sísmica, Valencia, 8p.
- Hernández, J.J., Dominguez, J., y Hernández, A. 2009. Estudio paramétrico de respuestas 1D de sitios. Subcapítulo 4.1, Informe Técnico Final, Vol. 1. Proyecto de microzonificación sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto, Caracas, Venezuela.
- Louie, J. 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America, 91 (2): 347-364.
- Morales, C., Reinoza, C., Sánchez, C., Ávila, J., y Schmitz, M. 2008. Modelado sísmico bidimensional de las cuencas de Barquisimeto y Cabudare en el estado Lara-Venezuela, a través del análisis de perfiles de refracción sísmica: XIV Congreso Venezolano de Geofísica, 8p.
- Morales, C. 2012. Análisis Dinámico de la Respuesta no Lineal del Suelo, Ubicado en La Terraza Aluvial de Barquisimeto y en La Cuenca de Tracción de Cabudare. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Magister en Geofísica de Prospección, Caracas, 188p.
- Nazarian, S., and Stokoe H. 1984, In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves. Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, vol. 8, San Francisco, California.
- Papageorgiou, A.S., and Kim, J. 1991. Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 earthquake: SH waves. Bulletin of the Seismological Society of America, 81: 2214-2233.
- Park, C., Miller, R., and Xia, J. 1999. Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64 (3): 800-808.
- Reinoza, C., Morales, C., Rocabado, V., García, K., Sánchez, C., Sánchez, J., Abreu, R., and Schmitz, M. 2011. Espesores de Sedimentos a partir de la Integración de datos Geofísicos en Barquisimeto y Cabudare, Venezuela. Revista Facultad de Ingeniería, 26 (2): 67-76.
- Rodríguez, L. 2008. Evaluación de geoamenazas con fines de microzonificación sísmica en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare, estado Lara. Trabajo especial de grado, Universidad Simón Bolívar, Magister en Ciencias de la Tierra, Sartenejas, 111p.
- Saito, M. 1979. Computations of reflectivity and surface wave dispersion curves for layered media; I, Sound wave and SH wave. Butsuri-Tankō, 32 (5): 15-26.

Sandmeier Scientific Software. 2000. REFLEXW (2 and 3-dimensional processing and interpretation of reflection, refraction and transmission data), Karlsruhe, Alemania.

Schmitz, M., Hernández J.J., Morales, C., Tagliaferro, M., Vallé, M., Leal, V., y Grupo de Trabajo del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, 2009. Informe Técnico Final, Volumen 2 Barquisimeto, proyecto de Microzonificación Sísmica en las ciudades de Caracas y Barquisimeto, 978p.

Schmitz, M., Hernández J.J., Morales, C., Domínguez, J., Rocabado, V., Vallé, M., Tagliaferro, M., Delavaud, É., Singer, A., Amarís, E., Molina, D., González, J., Leal, V. y muchos más coautores. 2011. Principales Resultados y recomendaciones del Proyecto de Microzonificación Sísmica en Caracas. Revista Facultad de Ingeniería, 26 (2): 113–127.

Schnabel, P., Lysmer, J., and Seed, H. 1972. SHAKE. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthq. Eng. Research Center, Rep. No.UCB/EERC-72/12. University of California, Berkeley.

Schubert, C. 1984. Basin formation along the Boconó – Morón – El Pilar Fault System, Venezuela. Journal of Geophysical Research, 89: 5711 – 5718.

Stephan, J.F. 1982. Evolution géodynamique du domaine Caraïbe Andes et chaîne Caraïbe sur la transversale de Barquisimeto (Vénézuéla). Tesis PhD., University Pierre y Marie Curie, Paris, 512p.

Zelt, C., and Smith, R. 1992. Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure. Geophysical Journal International, 108: 16-34.

---

---

Trabajo recibido: mayo 31 de 2012  
Trabajo aceptado: septiembre 19 de 2014