

JIFI2018
JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
ENCUENTRO ACADÉMICO INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA UCV

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE LAS CIUDADES DE BARQUISIMETO Y CABUDARE MEDIANTE EL USO DE LA ELIPTICIDAD DE LA ONDA RAYLEIGH

Magdeling Ojeda¹, Javier Sánchez-Rojas^{2*}, Víctor Rocabado^{1,2}, Michael Schmitz²

¹ Universidad Simón Bolívar, Venezuela

² FUNVISIS – Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela.

*sanchjav7@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de un estudio de la velocidad de onda de corte (V_s) en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare mediante el procesamiento, interpretación e inversión de datos de ruido sísmico ambiental. Se generaron perfiles pseudo-bidimensionales a partir de modelos unidimensional estimados a partir de la inversión de curvas de elipticidad de la onda Rayleigh. Las curvas de elipticidad fueron estimadas mediante la técnica de reducción aleatoria. La inversión fue restringida mediante modelos geológicos iniciales, los cuales fueron elaborados a partir de información de trabajos previos considerando estimaciones de espesores sedimentarios, densidades y velocidades de onda P y S. De igual manera, se realizó un análisis direccional del campo de ondas, con la finalidad de revelar potenciales asimetrías en la distribución de la fuente o heterogeneidades en la estructura del suelo. Los resultados muestran que existe una fuerte influencia 3D en los valores estimados de periodos fundamentales de vibración del suelo. Los cuales son dominados por la presencia de la falla de Boconó y la ubicación de los mayores espesores de sedimentos. Los modelos pseudo-bidimensionales mostraron que las rocas precuaternarias poseen una V_s mayor a 1300 m/s en Barquisimeto y 1500 m/s en Cabudare.

Palabras Clave: Espesor de sedimentos, Inversión, Elipticidad, Onda Rayleigh, Campo difuso

ABSTRACT

This paper presents the results of a study of shear wave velocity (V_s) in the cities of Barquisimeto and Cabudare through the processing, interpretation and inversion of environmental seismic noise data. Pseudo two-dimensional profiles were generated from the one-dimensional models estimated by means of inversion of ellipticity curves of the Rayleigh. Ellipticity curves wave were estimated using the random reduction technique. Inversion procedure was constrained by initial geological models, which were estimated from published results, referring to sediments thickness, densities and wave velocities P and S. In the same way, a directional analysis of the field of waves was carried out, in order to reveal asymmetries in the distribution of the source or heterogeneities in the structure of the soil. The results show that there is a strong 3D influence on the estimated values of fundamental periods of soil vibration. Which are dominated by the presence of the Boconó fault and the location of the largest sediment thicknesses. The pseudo two-dimensional models showed that the pre-Quaternary rocks have a V_s of at least of 1300 m/s in Barquisimeto and 1500 m/s in Cabudare.

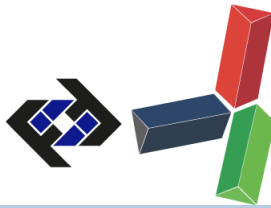
Keywords: Sediment thickness, Inversion, Ellipticity, Rayleigh wave, Diffuse field.

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación. Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Tel.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>



INTRODUCCIÓN

La ciudad de Barquisimeto se encuentra ubicada sobre una terraza aluvial de edad cuaternaria, mientras que Cabudare se localiza sobre sedimentos de edad Holoceno, descritos como una planicie aluvial de inundación que recubren la cuenca de tracción de Cabudare, la cual a su vez está asociada directamente a la transurrencia dextral del sistema de fallas de Boconó [1]. Se planteó realizar una investigación con el objetivo de determinar la estructura del suelo, a partir de perfiles bidimensionales de velocidades de onda S y estimar los espesores sedimentarios, mediante la inversión de la curva de elipticidad de la onda Rayleigh, obtenida de datos de ruido sísmico ambiental [2].

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo fue necesario compilar información geofísica y geológica disponible de la zona de estudio, con el fin de restringir el modelo propuesto con los resultados de investigaciones independientes. Los datos utilizados fueron adquiridos por la Fundación de Investigaciones Sismológicas venezolana (FUNVISIS), donde en el área de estudio se tomaron aproximadamente 1200 datos de ruido ambiental medidos entre los años 2005 y 2006.

Procesamiento para obtener el espectro H/V: se realizó con el programa Geopsy [11], el cual permitió se realizar el siguiente procesamiento:

- Se usó el comando *Subtract mean value*, el cual elimina las señales retrasadas del archivo. Posteriormente, se utilizó un filtro Pasa banda Butterworth de orden 2, en el rango de frecuencias de 0,3 a 15 Hz.
- Se aplico un control automático de ganancia (AGC) de ancho 3.
- Para calcular el espectro H/V, se usaron ventanas de tiempo 40 s, con una superposición (*overlap*) de las ventanas del 50 %.
- La curva de elipticidad obtenida se le aplico un suavizado Konno-Ohmachi [3], con un ancho de banda (b) de 40% y un cosine tape de 5 % para suavizar los efectos de borde.

Procesamiento para obtener el espectro H/V direccional: El análisis direccional de las características del campo de onda es por lo general utilizado para revelar las potenciales asimetrías en la distribución de la fuente alrededor del lugar de medición o la influencia de heterogeneidades en la estructura del suelo, tales como geometrías 2D/3D o efectos observados en irregularidades del terreno [4]. El procesamiento es similar al realizado para generar el espectro H/V, y solo difiere que en este caso se utiliza la herramienta H/V Rotate.

Cálculo de la elipticidad de la onda Rayleigh: Se utilizó la rutina Matlab *Raydec* desarrollada por Hobiger [2], para extraer la elipticidad de la onda de Rayleigh, este código usa la técnica de reducción aleatoria para eliminar todo tipo de ondas exceptuando las ondas Rayleigh.

Inversión: De investigaciones previas en al área de estudio, se procedió a elaborar una serie de modelos preliminares para las inversiones, en donde se estableció aumentar la complejidad del modelo de acuerdo a su ubicación, comenzando con un modelo básico de 3 capas, en las zonas con menores espesores, hasta llegar a un modelo de 6 capas en los lugares que presenten los mayores

espesores sedimentarios. Como información preliminar en cada estación, se utilizó los mapas propuestos de espesores de sedimentarios [5] [6] y los valores iniciales de las velocidades de ondas P y S, así como las profundidades de cada capa, fueron obtenidas a partir de estudios de ReMi [7], pozos geotécnicos [8], refracción sísmica [9] y Vs30 [10]. Para la inversión de las curvas de elipticidad obtenidas se utilizó el programa Dinver 2.9.0, el cual es un módulo del programa Geopsy [11], que usa el algoritmo del vecino más cercano, para resolver problemas de inversión a partir de un modelo geológico inicial basado en capas horizontales con variaciones de acuerdo a la profundidad. Finalmente, los perfiles 1D fueron interpolados para generar pseudo perfiles 2D. Para la generación de los perfiles 2D se utilizó software Surfer 13.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis direccional H/V

Se realizó un análisis de las características direccionales del campo de onda, donde se seleccionaron seis zonas ([Figura 1](#)) para realizar un análisis de la distribución de la energía.

Zona 1: En la zona 1 se destacó el hecho de que las curvas obtenidas de las grabaciones realizadas en ese lugar presentaban dos picos definidos en rangos de frecuencias distintos. Uno de los picos se ubicó en frecuencias altas que correspondió de buena forma con lo esperado a la geología, sin embargo, a frecuencias menores se encontró otro pico definido de mayor amplitud que correspondería a espesores mayores. Del análisis obtenido del espectro *HV Rotate*, y de investigaciones [12], se infirió que la energía no incide perpendicularmente en las estaciones. Se observó que la energía provino de la dirección NO-SE, indicando que la fuente de la misma podría estar ubicada en la ciudad de Cabudare y por lo tanto el segundo pico que muestran las curvas H/V (el de más baja frecuencia), en la zona 1, pudiese corresponder al reflejo de los grandes espesores que se encuentran en esa área.

Zona 2, 3 y 6: En este caso, se observa que la energía no proviene de una dirección preferencial como en la zona 1, sino que está distribuida aleatoriamente no uniforme ([Figura 1](#)). En estas zonas, fue posible ver que las curvas tienden a mostrar forma de meseta amplia y los espectros H/V direccional muestran que la frecuencia de resonancia exhibe una leve variación con el azimut, probablemente debido a efectos 2D/3D relacionados con el buzamiento de la interfaz roca-sedimentos.

Zona 4 y 5: Las zonas 4 y 5, en Cabudare, se estudiaron en conjunto debido a su cercanía a la falla de Boconó. Se observó que el pico de máxima amplitud muestra un máximo entre los 16° y 18°, y un mínimo a los 90°, lo cual implica una polarización longitudinal del campo de onda registrado. Asimismo, se observó ([Figura 1](#)) que la energía, proveniente de la dirección NO-SE, es paralela a la falla de Boconó, por lo cual se infirió que dicha polarización puede estar influenciada por la zona de influencia de la falla o por la complejidad litológica existente en ambos lados de la falla.

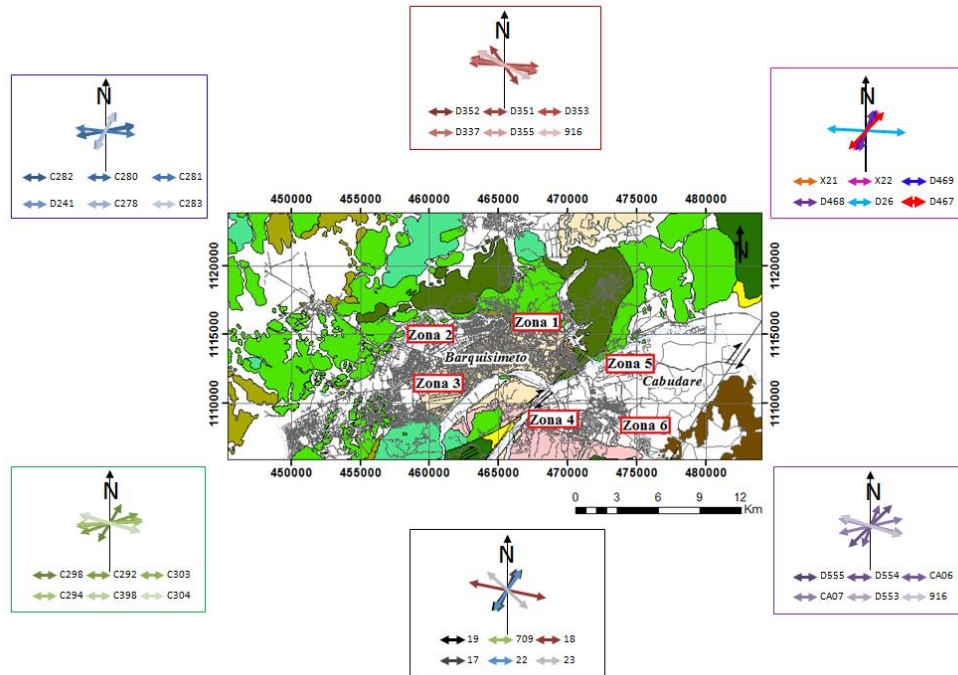


Figura 1. Mapa de ubicación del análisis direccional realizado.

Perfiles de velocidades

Se realizaron 4 perfiles 2D de velocidades de las ondas S y P, los cuales atraviesan las zonas donde se observaron los mayores espesores sedimentarios (Figura 2).

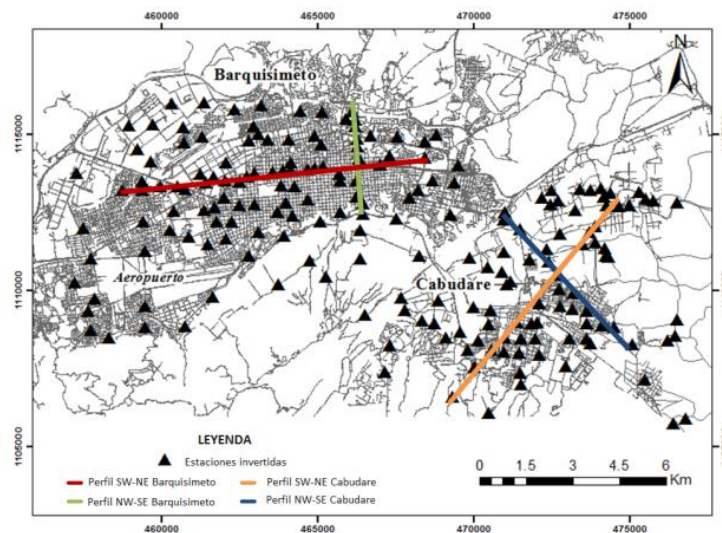


Figura 2. Ubicación de perfiles bidimensionales de velocidades.

Perfil SW-NE Barquisimeto

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación. Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.
 Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053
 Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

En la **Figura 3** se observa que ocurre un acúñamiento de las primeras capas en la parte central del perfil y que el espesor sedimentario aumenta hacia esta zona. Asimismo, la imagen revela un conjunto de capas con velocidades que varían lateralmente y profundidades gradualmente incrementando hacia el centro de la cuenca. Se observan dos ligeras elevaciones en la parte central del perfil que coinciden con dos elevaciones del basamento rocoso, que pueden atribuirse a la complejidad estructural generada por el conjunto de corrimientos presentes en la región denominados en la bibliografía como “Napas de Lara”.

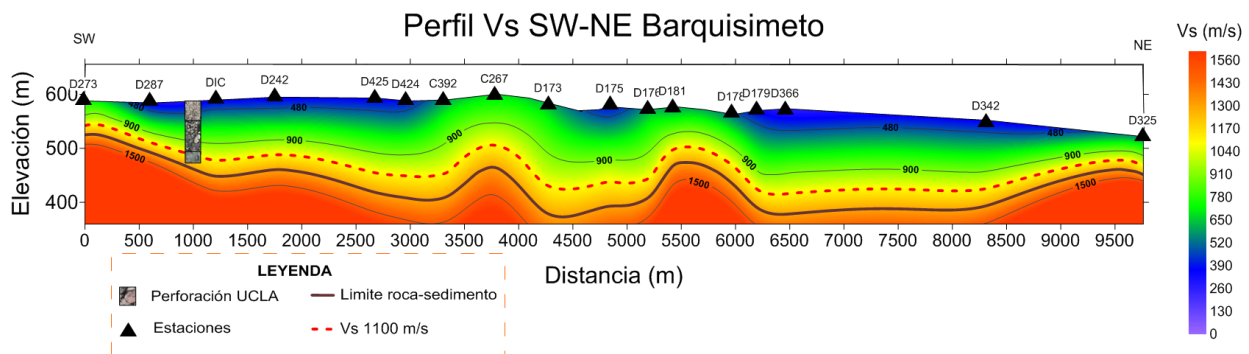


Figura 3. Perfil de velocidad de onda de corte SW-NE en la ciudad de Barquisimeto.

Por otro lado, en la parte más superficial del perfil se presentan velocidades de onda S inferiores a los 400 m/s que puede estar relacionado con una capa de poco espesor compuesta por arena limosa poco consolidada o por materiales de relleno utilizados para nivelar la topografía de acuerdo a ensayos SPT realizados en la zona. Las velocidades van aumentando progresivamente a medida que se va pasando por las diferentes litologías hasta llegar a la interfaz roca-sedimento enfatizada en el perfil, con una curva de color marrón, la cual presenta una velocidad de onda S de aproximadamente 1300 m/s y alcanza su mayor profundidad en el centro del perfil disminuyendo hacia los extremos suroeste y noreste. Adicionalmente, en la **Figura 3**, se resalta mediante una curva roja segmentada la velocidad de onda S que correspondería, de acuerdo a la interpolación, a la velocidad de la roca encontrada en el pozo que de acuerdo a [8], se atribuye a la formación Bobare y que en este caso presentaría una velocidad de corte de 1100 m/s.

Perfil SW-NE Cabudare

Es posible observar una capa que presenta velocidades de onda S menores a los 500 m/s (**Figura 4**) y espesores que varían de 5 a 40 m en dirección noreste, indicando la presencia de sedimentos poco consolidados, que podrían estar asociados con las gravas en matriz arenosa con arcilla, correspondientes a la unidad cuaternaria Q1. Mientras que una segunda capa reporto valores de velocidad Vs entre los 480 y 650 m/s con un espesor sedimentario que alcanza hasta 95 m. Un tercer estrato presenta un aumento de su espesor en la parte central del perfil, disminuyendo hacia el noreste con una velocidad de onda S de 600 a 800 m/s. Para el cuarto estrato se encontró que las velocidades de onda S oscilan entre los 800 y 1000 m/s presentando espesores entre 10 y 100 m aproximadamente, donde se sospecha que podría corresponder a sedimentos más consolidados relacionados con la unidad Q2 y Q3, compuestas por grava en matriz arenosa, de acuerdo a la

columna descriptiva de [8] y al análisis químico-radiométrico realizado por [13]. Asimismo, basados en las velocidades de onda S y a su ubicación en profundidad, podemos concluir que este estrato corresponde a la formación Guamacire. Luego se encontró una capa, la cual se infiere que corresponde a roca meteorizada por la Vs que presenta (de 1100 a 1300 m/s). Este estrato arrojó un espesor relativamente pequeño en comparación con las tres capas suprayacentes, alcanzando un valor máximo de 50 m en la parte central del perfil. Finalmente, el último estrato mostro una Vs que va desde los 1400 a 1800 m/s, indicando la presencia de la roca dura, que en este caso correspondería con las rocas de la formación Mamey.

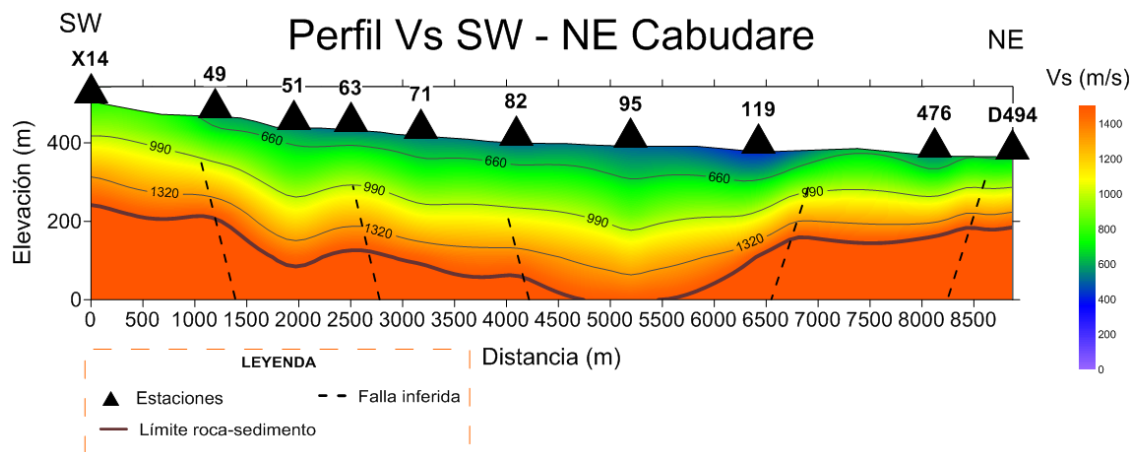


Figura 4. Velocidad de ondas de corte del Perfil SW-NE Cabudare.

En el perfil (Figura 4), se resalta el límite roca-sedimento, el cual disminuye en profundidad hacia los extremos del perfil y presenta una velocidad de onda S alrededor de los 1500 m/s. A su vez se puede observar como las capas son paralelas entre si y algunas muestran una disminución de su espesor hacia los extremos noroeste y sureste, indicando la presencia de un posible régimen extensivo, tal como han revelado varios autores. Además, se observan una serie de bloques deprimidos y rotados, que se podrían atribuir al episodio de apertura de la cuenca de tracción de Cabudare y están asociados a cambios en las velocidades de onda S.

Mapa de espesor sedimentario y mapa de Isoperíodos

A partir de las inversiones fue posible elaborar un mapa de espesores como se muestra en la Figura 5. Para la ciudad de Barquisimeto, se tienen valores de hasta 160 m en la zona donde está ubicado el Aeropuerto “Jacinto Lara”, mientras que en la parte central de la ciudad predominan espesores entre 100 y 120 m, con períodos que van desde los 0.5s a 1.1s. Por otra parte, se puede evidenciar que los espesores disminuyen: Al norte, al este y al noroeste en la medida en que nos aproximamos a las colinas residuales, encontrándose hacia esa zona los menores valores de espesores sedimentarios (< 60 m); mientras que, hacia el sur, los espesores disminuyen hacia las cercanías del cerro Manzano.

En la ciudad de Cabudare, los espesores aumentan, arrojando un máximo de 400 m en el área central, con un período de 3s. Mientras que los valores mínimos se encontraron hacia el suroeste correspondiéndose con los abanicos coluvió-torrenenciales que suprayacen a las rocas cretácicas de la formación Mamey, donde los valores de período disminuyen de 0.7 a 0.3 s en dirección de los

abanicos. En general, se puede observar una correspondencia entre los valores de períodos y los de espesores, pues ambas ciudades mostraron que las zonas que presentaban los mayores espesores también poseían los mayores períodos y viceversa (Figura 5).

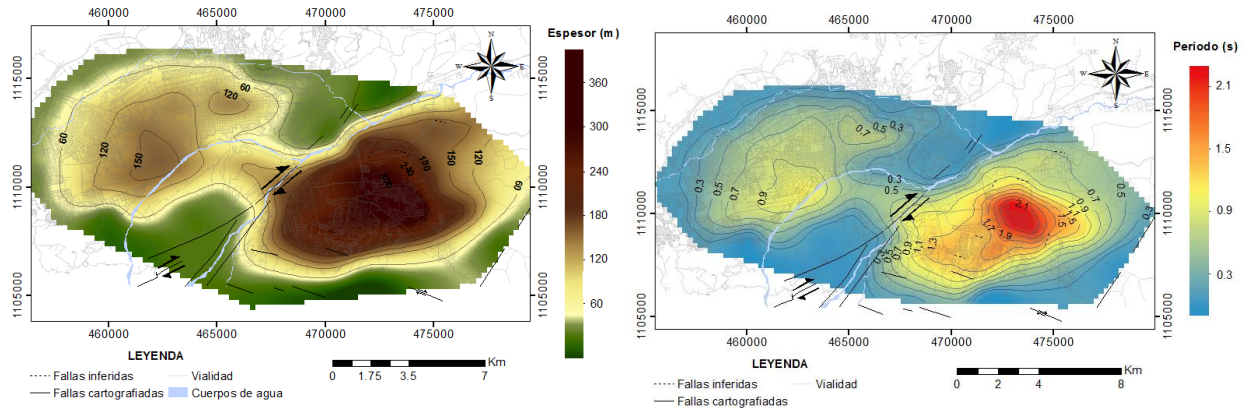


Figura 5. Mapa de espesor sedimentario y mapa de período del área de estudio.

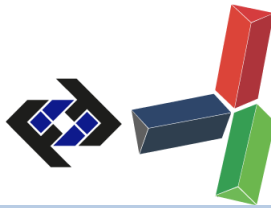
CONCLUSIONES

Se mostró la importancia de realizar análisis para evaluar los efectos direccionales y la polarización de las componentes horizontales del movimiento del suelo, para una correcta selección de la frecuencia fundamental del terreno. Es efectivo para identificar posibles efectos 3D que puedan influir en la respuesta del suelo.

Se comprobó para la ciudad de Barquisimeto que el espesor de sedimentos aumenta desde las colinas residuales (al norte, noroeste y noreste), hacia la parte central de la ciudad, obteniendo un máximo espesor de 160 m hacia el aeropuerto “Jacinto Lara” en la zona suroeste de la misma. De igual manera, se apreciaron algunos levantamientos, que pudiesen estar relacionados con el sistema de corrimientos presentes en la región

En Cabudare se reportan espesores superiores a los 400 m en la parte sureste-central de la ciudad y se pudo observar una serie de bloques deprimidos, los cuales pueden estar asociados al periodo de apertura (subsistencia) de dicha cuenca.

Asimismo, se comprobó que la inversión de la curva de elipticidad permite obtener la profundidad del basamento, delinear las capas sedimentarias y obtener la variación de las velocidades de las ondas P y S, respecto a la profundidad, los cuales, a su vez, son consistentes con estudios gravimétricos, de refracción sísmica, de ruido ambiental, entre otros.



REFERENCIAS

- [1] Audemard, F. and C. Giraldo, *Desplazamientos dextrales a lo largo de la frontera meridional de la placa Caribe, Venezuela septentrional*. Memorias VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geología, 1997. 1: p. 101-108.
- [2] Hobiger, M., et al., *Single station determination of Rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (RayDec)*. Geophysical Research Letters, 2009. 36(14).
- [3] Konno, K. and T. Ohmachi, *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998. 88(1): p. 228-241.
- [4] Poggi, V., et al., *Seismic site-response characterization of high-velocity sites using advanced geophysical techniques: application to the NAGRA-Net*. Geophysical Journal International, 2017. 210(2): p. 645-659.
- [5] Rocabado, V., et al. *Geophysical studies in Barquisimeto metropolitan area, Venezuela, as contribution to a seismic microzoning study*. in *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. 2007. Greece.
- [6] Reinoza, C., et al., *Espesores de sedimentos a partir de la integración de datos geofísicos en Barquisimeto y Cabudare, Venezuela*. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 2011. 26: p. 67-76.
- [7] Morales, C., M. Schmitz, and S. Pullammanappallil, *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., 2015. 37(1): p. 57-66.
- [8] GISCA, *Servicios de consultoría para la realización de estudios de exploración del subsuelo en la ciudad de Barquisimeto, Estado Lara, Informe inédito para el proyecto FONACIT 2004000738*. 2006, FUNVISIS. p. 45.
- [9] Morales, C., et al., *Modelado sísmico bidimensional de las cuencas de Barquisimeto y Cabudare en el Edo. Lara-Venezuela, a través del análisis de perfiles de refracción sísmica*. XIV Congreso Venezolano de Geofísica, 2008: p. 8.
- [10] Schmitz, M., et al., *Proyecto de Microzonificación Sísmica en las ciudades Caracas y Barquisimeto (FONACIT 200400738)*. Informe técnico. FUNVISIS, 2009. Vol. 2 Barquisimeto-Cabudare: p. 432 pp.
- [11] Wathelet, M. (2005). Array recordings of ambient vibrations: surface wave inversion. Ph.D. tesis, Liège University, 161 pages.
- [12] Bravo, A., F. Sánchez-Sesma, and F. Chávez-García, *Ground motion on stratified alluvial deposits for incident SH waves*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988. 78(2): p. 436-450.
- [13] Solórzano, A. and P. Varguillas, *Caracterización geoquímica de muestras de pozos exploratorios en el aluvión de la cuenca de Barquisimeto - Cabudare, estado Lara*. 2008, Universidad Central de Venezuela.