

## **ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE ONDAS SUPERFICIALES (RAYLEIGH Y LOVE) PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE MÉRIDA, VENEZUELA.**

*Ramsis Guerrero\*, José Choy, Stefhanie Klarica Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Grupo de Laboratorio de Geofísica (LGULA), Mérida-Venezuela. \**

[ramsisccgs@ula.ve](mailto:ramsisccgs@ula.ve)

### **Resumen**

Este trabajo presenta la adquisición de curvas de dispersión de ondas superficiales por medio de dos técnicas: F-K (programa Geopsy) y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (software Geometrics). El análisis de dichas curvas permitió generar modelos de velocidad de ondas S en varias zonas de la ciudad de Mérida (Venezuela). Los resultados se compararon con los obtenidos por medio de estudios de sismica de refracción previamente realizados y se adquirió la experiencia necesaria para aplicar esta metodología en otras ciudades de los Andes Venezolanos. Los datos se obtuvieron de los registros de cuatro líneas de refracción, por lo que no hubo necesidad de repetir el trabajo de campo. En cada una de ellas se usaron arreglos de 48 geófonos y como fuente de energía sísmica de impacto se utilizó una mandarina. Para cada línea, las curvas obtenidas con ambos métodos fueron prácticamente idénticas, y los modelos de velocidad obtenidos por medio de la inversión de dichas curvas con el método de mínimos cuadrados (Geometrics) fueron consistentes con los obtenidos con el algoritmo de Neighborhood (Geopsy). A su vez, estos resultados fueron consistentes con los de la sismica de refracción. La información obtenida a partir de las ondas superficiales permitió refinar los modelos de velocidad para las ondas S, ayudó a disminuir la no unicidad de los resultados y se destacó la importancia de validar dos softwares, entre ellos, uno de uso libre.

**Palabras claves:** Mérida, dispersión, curvas de dispersión, modelos de velocidad, fuente activa.

### **Abstract**

This paper presents the acquisition of dispersion curves of surface waves using two techniques: F-K (Geopsy program) and Multichannel Analysis of Surface Waves (Geometrics software). The analysis of these curves allowed to generate models of S-wave velocities in various parts of the city of Mérida (Venezuela). The results were compare with those obtained by seismic refraction studies previously made. This experience was useful to acquired the expertise needed to apply this methodology in other cities in the Venezuelan Andes. The data were obtained from recordings of four refractions lines, so there was not necessary to repeat the fieldwork. In each of the lines were used arrangements of 48 geophones and as seismic impact energy source was used a sledgehammer. For each line, the curves obtained with both methods were almost identical, and the velocity models obtained through the inversion of these curves with the method of least squares (Geometrics) were consistent with those obtained by the algorithm Neighborhood (Geopsy). These results were consistent with the seismic refraction. The information obtained from surface waves allowed to refine the model for the S-wave velocity, help to reduce non-uniqueness of results and emphasize the importance of validating two software, including one free to use.

**Keywords:** Merida, dispersion curves, dispersion models velocity, active source.

## Introducción

Debido a las grandes tragedias ocurridas en el Territorio Venezolano, se hace necesario el planteamiento de actuaciones adecuadas, con fines de planificación urbana para caracterizar las zonas de mayor amenaza sísmica.

La ciudad de Mérida ubicada en los Andes Centrales Venezolanos está asentada sobre el sistema de Fallas de Boconó, y constituye un buen ejemplo de área sometida a riesgo sísmico al ser sacudida y parcialmente destruida, al menos, durante tres terremotos, el 13 de febrero de 1610, el 26 de Marzo de 1812 y el último de ellos el de 28 de Abril de 1894 (<http://sismicidad.hacer.ula.ve/>). Es por esto que el Grupo de Geofísica de la Universidad de Los Andes creó un proyecto denominado “Fortalecimiento a Centro de Investigación del Grupo de Geofísica (LGULA)” dirigido por la Dra. Stephanie Klarica desde el año 2006 hasta el 2007, en el cual se realizaron levantamiento y análisis del ruido ambiental de distintas zonas de la ciudad de Mérida (Monsalve y Torres 2006, Mazuera 2007) así como también levantamientos de sísmica de refracción (Guerra G. y Palacios L., 2007; Cerrada M. y Mora. K., 2007; Araque M. y Contreras Y., 2007; Molina K. y Trimarchi Y., 2008), con el propósito de caracterizar los suelos de las diferentes zonas urbanas de la ciudad de Mérida.

El estudio de la dispersión de las ondas superficiales, implica generar curvas de dispersión e invertirlas con el fin de determinar los modelos de velocidad de onda S, parámetro importante en la caracterización de los suelos. El proceso de crear las curvas de dispersión se realizó por medio de dos métodos: el método F-K (Zywicki, 1999) y el de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales MASW (Park y Miller, 1999), implementados en dos programas interactivos, uno de ellos es un software libre, Geopsy ([www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)) para el método F-K y el otro con un software comercial, SeisImagenSw de Geometrics ([www.geometrics.com](http://www.geometrics.com)) para el método MASW. Para la inversión de las curvas de dispersión se emplearon dos métodos, el método de mínimos cuadrados en el software SeisImagenSw de Geometrics y el algoritmo de “Neighborhood” (Wathelet, 2004) implementado en el módulo Dinver que se encuentra dentro del paquete Geopsy. Con la utilización de estos métodos se podrá comparar la consistencia de los resultados obtenidos por estos dos programas, y así probar que con el Geopsy se puede tener una herramienta útil y gratuita para el estudio de las Ondas Superficiales con el cual se pueden estudiar tanto las ondas Rayleigh como las ondas Love.

## Desarrollo

Para el estudio de la dispersión de las ondas superficiales, se usaron cinco perfiles, obtenidos de las tesis de las estudiantes de Ingeniería Geológica (Ingenieros Cerrada M. y Mora K., 2007; Araque M. y Contreras Y., 2007; Guerra G. y Palacios L., 2007). Estos cinco perfiles están ubicados en tres sectores de la ciudad de Mérida, en el sector los curos (Cancha los curos y Urb. J.J. Osuna), en el sector de la parroquia se estudiaron los perfiles (Cancha colegio Lara, y Liceo Bolivariano Caracciolo Parra) y en el centro de la ciudad se estudió el perfil de la cancha el Gersy. La ubicación de estos perfiles se puede observar en la figura 1.

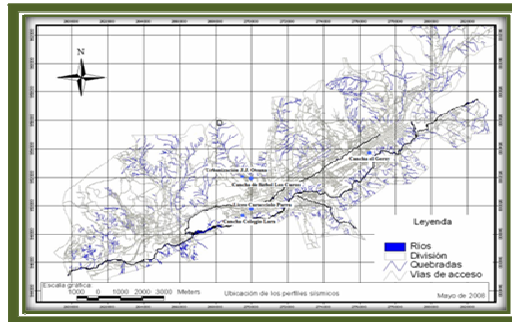


Figura 1 Ubicación de los perfiles

En cada uno de estos perfiles se realizó la inversión de las curvas de dispersión de las ondas Rayleigh y Love, para crear los modelos de velocidad de onda S, dichos procedimientos se muestran a continuación.

Primero se eliminaron las 10 trazas más cercanas a la fuente para reducir el efecto del campo cercano (Yoon Sungsoo, 2005; Park, 1999). En la figuras 2 y 3 se pueden observar tanto el registro horizontal como el vertical del perfil de la Cancha colegio Lara.

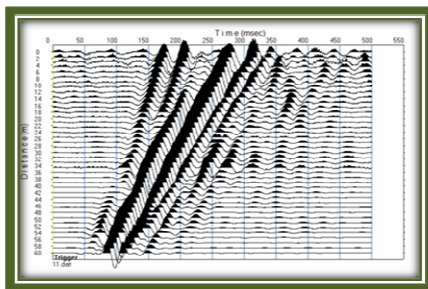


Figura 2 Registro onda P del perfil de la Cancha colegio Lara 5.dat, obtenida de la tesis de grado de Cerrada M. y Mora K., 2007. Punto de disparo 0 m

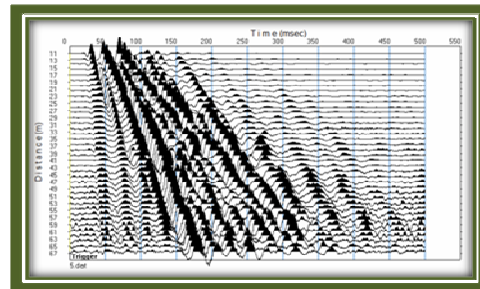


Figura 3 Registro del perfil onda S de la Cancha colegio Lara 11.dat, obtenida de la tesis de grado de Cerrada M. y Mora K., 2007. Punto de disparo 70 m

### Generación de la curva de dispersión:

A partir de estos registros se obtuvieron las curvas de dispersión para cada tipo de onda. Tanto para el programa Geometrics como para el programa Geopsy se limitó la frecuencia máxima a 50Hz, y el rango de velocidad de fase desde los 200m/s hasta los 800m/s.

En la figura 4 se muestra la gráfica velocidad de fase versus frecuencia obtenida con el programa Geometrics. Las regiones de color azul denotan la mayor concentración de la densidad de energía, que corresponde a los modos de propagación de la Onda Rayleigh. En este caso se observó tanto el modo fundamental como el superior, para los cuales el programa generó una serie de puntos, los cuales conforman la curva de dispersión. Algunos de los puntos generados por el programa no quedaron muy bien ubicados, estos se modificaron manualmente, teniendo en cuenta que la curva de dispersión debe ser continua y no poseer saltos (Foti, 2000).

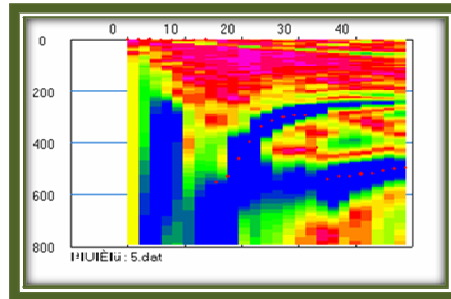


Figura 4 Curva de dispersión onda Rayleigh (Geometrics), para el perfil de la Cancha del Colegio Lara. Eje horizontal Frecuencia (Hz), Eje vertical Velocidad de Fase (m/s).

Las figuras 5 y 6 corresponden a las curvas de dispersión para la onda Rayleigh y Love respectivamente, realizadas con el programa Geopsy. En estas gráficas la región morada es la zona de mayor densidad de energía.

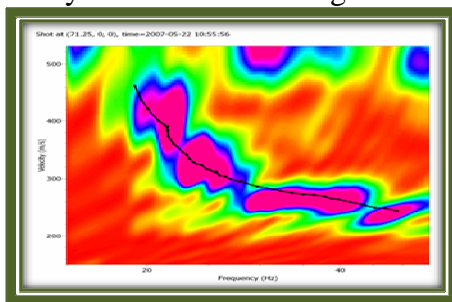


Figura 5 Curva de dispersión Onda Rayleigh

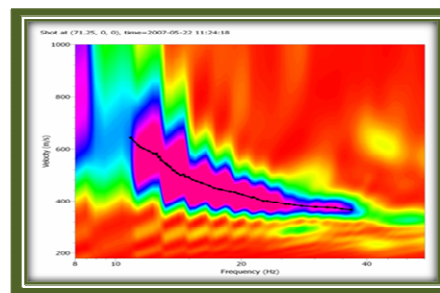


Figura 6 Curva de dispersión Onda Love

Se compararon las curvas de dispersión de la onda Rayleigh obtenidas con los programas Geopsy y Geometrics observándose dos curvas consistentes y acopladas, lo que comprueba que ambos métodos (F-K y MASW) produjeron resultados equivalentes.

### Obtención del modelo de VS

Posteriormente se procedió a la inversión de cada una de las curvas de dispersión realizadas: Para realizar la inversión con el programa Geometrics para la Onda Rayleigh, se le especificó al programa un modelo inicial, en donde se le indicó el número de capas y la suma de los espesores de la primera a la última capa. Se fue variando el número de capas de 1 a 5, capas sobre un semi-espacio observándose que el que mejor se ajustaba era con dos capas sobre un semi-espacio, con una profundidad de penetración de 8 metros que queda indicado en la parte de color gris oscuro del perfil (Figura 7).

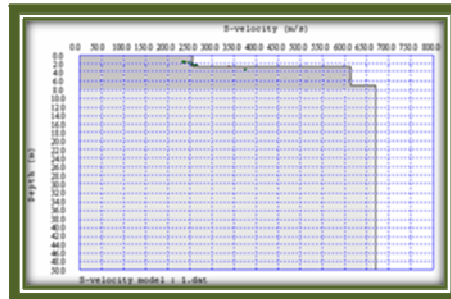


Figura 7 Modelo de velocidad de onda S obtenido de: onda Rayleigh (Geometrics), Cancha del Colegio Lara. Eje horizontal Velocidad de onda S (m/s), Eje vertical Profundidad (m)

- La inversión con el programa Geopsy para la onda Rayleigh y Love, se realizó por medio del algoritmo de Neighborhood. Se le especificó el número de capas, el cual se fue probando de 1 a 5 capas sobre un semi-espacio, obteniéndose siempre dos capas sobre un semi-espacio como se muestran en las figuras 8 y 9, en donde la línea de color rojo es la que posee menor error (misfit).

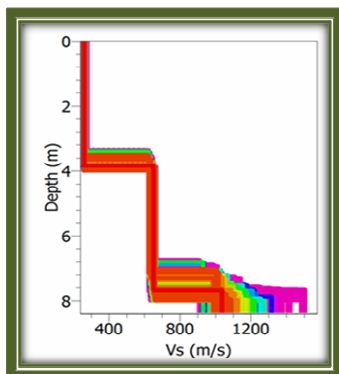


Figura 8 Modelo de velocidad de onda S (Onda Rayleigh).

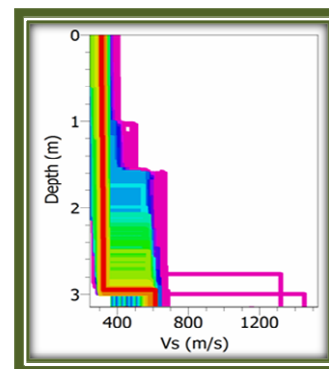


Figura 9 Modelo de velocidad de onda S (Onda Love)

## Conclusiones

- Se compararon las curvas de dispersión de la onda Rayleigh de cada perfil, realizadas por el método F-K (Geopsy) y por el método MASW (Geometrics), obteniéndose dos curvas muy bien acopladas, consistentes y complementarias. Probando que los dos programas generaron resultados equivalentes, esto es importante ya que el Geopsy es un software libre, el cual podrá ser utilizado en trabajos posteriores reduciendo los costos de los mismos.
- En todos los casos estudiados, los modelos obtenidos por los métodos de sismica de refracción, F-K y MASW, resultaron ser consistentes, lo que le da confiabilidad a cada uno de estos métodos y a los modelos obtenidos con sismica de refracción en trabajos anteriores.

- Se observaron diferencias pequeñas entre los modelos de velocidad de onda S utilizado los diferentes métodos (Refracción, Onda Rayleigh método F-K, Onda Rayleigh método MASW y Onda Love método F-K). Esto posiblemente se debe a que la inversión de las curvas de dispersión de ondas superficiales trabaja con el modelo de placas planas paralelas, mientras que con el método de refracción se obtuvieron capas planas con buzamiento. También estas pequeñas diferencias pueden deberse al ruido ambiental presente en cada registro y al rango de incertidumbre que arroja cada método al hacer las inversiones.
- Los modelos de velocidad de onda S obtenidos por medio de la Onda Rayleigh, poseen mayor detalle, que los obtenidos con el método de refracción, ya que se observó una subdivisión de la primera capa obtenida por sísmica de refracción. Esto es de gran importancia para la mejor caracterización del suelo. Esto da una razón adicional para combinar el método de dispersión de ondas superficiales con el método de refracción ya que esto disminuye el efecto de la no unicidad inherente en todos los procesos de inversión de los datos sísmicos.
- En las curvas de dispersión no se observaron los efectos de campo lejano (Debido a que a altas frecuencias los cuerpos de ondas superficiales se atenúan más rápidamente con la distancia debido a los materiales de amortiguación) mostrados en el artículo Park (1999). Esto se verificó dividiendo el registro de 38 trazas en dos partes. Las dos curvas de dispersión resultantes fueron muy similares entre si y similares a la curva de dispersión realizada con el registro completo

## Referencias

Araque M. & Contreras Y. (2007) “Evaluación geofísica mediante el método de sísmica de refracción en los sectores Los Curos – Campo Claro, Mérida Edo. Mérida” Trabajo Final de Grado, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica, pp 195.

Cerrada M. y Mora. K., 2007. Caracterización geofísica mediante la aplicación de sísmica de refracción entre los sectores Zumba – La Parroquia y la Av. Andrés Bello. Edo. Mérida. Trabajo Final de Grado, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Noviembre 2007. pp 142.

Foti Sebastiano., 2000. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. Tesis doctoral del Postgrado de Ingeniería Geotécnica. Politécnico di Torino, Febrero 2000. pp 233.

Guerra G. & Palacios L. (2007) “Evaluación Geofísica a partir de interpretación sísmica de refracción del centro de la ciudad de Mérida Edo. Mérida”. Trabajo Final de Grado, Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Noviembre 2007, Mérida. pp 115.

Mazuera, F. (2007). Determinación de Períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Mérida, a partir de mediciones de Ruido Sísmico Ambiental. Trabajo de Ascenso a la categoría de profesor asistente, Universidad de Los Andes, Mérida.

Monsalve, & Torres M. (2006). Adquisición de datos de ruidos sísmicos del Área Metropolitana de la ciudad de Mérida, Estado Mérida, con énfasis en obtener una

secuencia optima de procesamiento. Trabajo Final de Grado. Universidad de los Andes.

Park y Miller, B., 1999. Seismic Characterization of Geotechnical Sites by Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) Method. Kansas Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA. pp 23 .

Park, 1999. Multichannel analysis of surface waves. Kansas Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA. pp 16.

Wathelet M., 2004. Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. Near Surface Geophysics **2**. pp 211--221.

Xia, J., Miller R. y Park, C., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversión of Rayleigh waves”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering [Volume 22, Issue 3](#). pp 181-190.

Yoon Sungsoo, 2005. Array-Based Measurements of Surface Wave Dispersion and Attenuation using Frequency-Wavenumber Analysis. Tesis doctoral en la Escuela de Ingenieria Civil, Georgia Institute of Technology. pp 235.

Zywicki Daren (1999) “Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves”. PhD Dissertation, The Georgia Institute of Technology, pp 357.