



XVIII Congreso Peruano de Geología

ANÁLISIS MULTICANAL DE LAS ONDAS SUPERFICIALES EN INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS UTILIZANDO EL MÉTODO CROSS-CORRELACIÓN DEL PUNTO MEDIO COMÚN

Julio André Medina Díaz¹, Freddy Javier Ccallo Huaquisto²

¹ Ingeniero Geofísico, Av. Arequipa 5103, Lima, Perú (andremolina@geoinstrumentsac.com)

² Ingeniero Geofísico, Av. Arequipa 5103, Lima, Perú (freddyccallo@geoinstrumentsac.com)

1. Introducción

La determinación de la velocidad de onda de corte (V_s) es muy importante en las investigaciones geotécnicas. Los estudios sísmicos de Refracción Sísmica y Down Hole han sido y son utilizados para ese propósito. Sin embargo la energía limitada de las fuentes sísmicas de la onda de corte y la necesidad de una perforación, generalmente hacen que estos métodos sean inconveniente en las investigaciones geotécnicas. La búsqueda de un método más conveniente para la determinación de la V_s ha sido exigida a los sismólogos.

Se ha demostrado que la dispersión de la velocidad de fase de las ondas superficiales (ondas Rayleigh) está controlada principalmente por el espesor y la V_s de los depósitos de poca profundidad. Es por ello que el análisis de las ondas superficiales para la determinación de la V_s cerca a la superficie ha sido objeto de muchos estudios en las últimas dos décadas. Nazarian et al. (1983) utilizó el Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW) para la determinación de estructuras de la velocidad de onda corte en 1D para los primeros 100 m del subsuelo.

La mayoría de las técnicas basadas en las ondas superficiales han calculado las diferencias de fase entre dos receptores que utilizan un simple método de Cross-Correlación.

El Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) fue propuesto por Park et al. (1999a, 1999b). En su método las velocidades de fase se determinan directamente a partir de datos multicanal de ondas superficiales después es aplicado una transformación a los datos sísmicos del dominio del tiempo (tiempo-distancia) para luego obtener una imagen de velocidad de fase versus frecuencia (c-f). En el método MASW se puede distinguir

mucho mejor el modo fundamental de la dispersión de ondas Rayleigh de otros modos y de las ondas de cuerpo. Esta es la ventaja del método MASW en comparación del método SASW.

Miller et al. (1999) y Xia et al. (1999) aplicaron el método de MASW 2D convencional con registros sísmicos, y determinaron estructuras de velocidad de onda de corte en 2D de las capas superficiales.

De acuerdo con Park et al. (1999a) para el método MASW es preferible utilizar siempre un conjunto de receptores con el fin de determinar velocidades de fase con precisión en las frecuencias bajas. No obstante, un arreglo de receptores más largo podría disminuir la resolución lateral de la investigación, ya que el método convencional MASW proporciona un modelo de velocidad promediada sobre la longitud total del arreglo. Un arreglo más pequeño es mejor para incrementar la resolución lateral. La mejora de la resolución lateral se consigue a partir de la precisión de la velocidad de fase.

El análisis de Cross-Correlación Del Punto Medio Común de datos multicanal de ondas superficiales fue demostrado por Hayashi y Suzuki (2004) con el fin de superar esta disyuntiva.

Para mejorar la resolución lateral, se tuvo como objetivo utilizar las Cross-Correlaciones de los pares de trazas que tienen los mismos lugares de puntos medios comunes. Esto ha requerido el uso de un método de múltiple registro y desplazando los receptores y puntos de disparo, como en el método sísmico de reflexión 2D. En este estudio se desarrolló el procedimiento automático para realizar Cross-Correlaciones de cada par de trazas y atribuirlos al punto medio apropiado, entonces la Cross-Correlación del punto medio (grupos CMPCC) es obtenida fácilmente.

2. Cross-Correlación Del Punto Medio Común (CMP)

La Figura 1 muestra un ejemplo de datos de ondas superficiales de múltiples canales obtenidos utilizando una fuente impulsiva. La Figura 1b muestra una imagen velocidad de fase versus frecuencia (c-f) calculada por el método MASW. Esa imagen de la dispersión, se dividió en dos o tres curvas, demostrando que no hay velocidad de fase única. La apariencia de la imagen de dispersión es similar a la producida a partir de un modelo numérico de diferencias finitas que tienen un cambio lateral de velocidad (Hayashi, 2001).

El método MASW puede ser considerado como una suma de las Cross-Correlaciones de todas las trazas de onda. Las relaciones de dispersión son obtenidas usando un par de puntos de observación. Las estructuras se estiman en los puntos medios de toda la longitud del arreglo. La figura 2a ilustra una relación entre la ubicación de los puntos de observación y estructura de velocidad estimada. La ubicación horizontal donde la estructura de velocidad se estima corresponde al punto medio de toda la longitud del arreglo. Si deseamos mejorar la resolución de velocidad de fase, debemos usar muchos pares de receptores. No obstante, el aumento de la distancia de correlación degrada la resolución lateral. Por lo tanto, hay una compensación entre el número de pares de correlación y la distancia de correlación, cuando aumenta la medición de velocidad de fase.

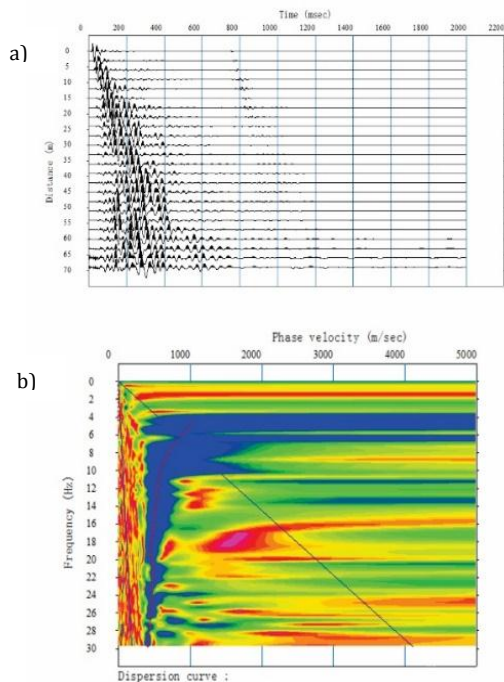


Figura N° 01: (a) Un ejemplo de un registro sísmico. (b) La imagen c-f (Velocidad de fase versus Frecuencia) de la figura 1a. Lo azul indica mayor amplitud. Fuente: Propia.

Para mejorar la resolución lateral, debemos utilizar las Cross-Correlaciones que tienen las mismas ubicaciones de punto medio común, como se muestra en la Figura 2b. A partir de ahora, se utiliza el término "CMPCC" para referirse a las Cross-Correlaciones que tienen un punto medio común. Si utilizamos un proceso CMPCC en un solo

registro sísmico, las Cross-Correlaciones que tienen diferentes puntos medios son descartadas. Tomando la Figura 2a, por ejemplo. Diez pares pueden ser extraídos de cinco trazas, pero sólo dos trazas se pueden agrupar para el proceso de CMPCC. Para incrementar el número de datos CMPCC, utilizamos un método multidisparo y movemos el arreglo de receptores y puntos de tiro, como en el método de sísmica de reflexión. Después el número de puntos CMPCC puede ser aumentado, como se muestra en la Figura 2d.

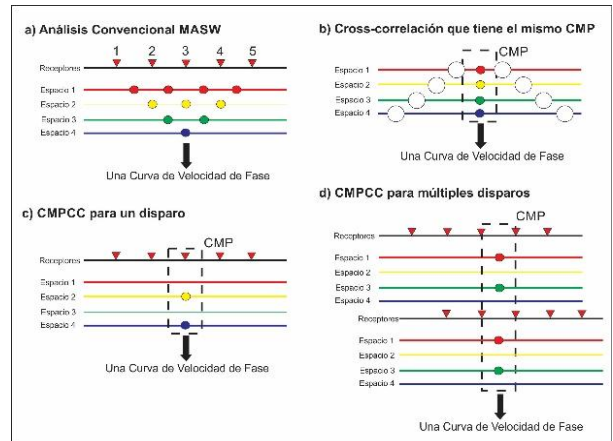


Figura N° 02: El concepto del análisis CMP en el método de ondas superficiales. Fuente: Hayashi, 2008.

La adquisición de datos para el método CMPCC es similar a la adquisición en un estudio de sísmica de reflexión 2D. La geometría fuente-receptor se basa en el arreglo *end-on*, la fuente y receptores se mueven a lo largo de la línea de estudio. Los receptores pueden ser fijos en su posición hasta el final de la línea de estudio (Figura 3). Idealmente, el intervalo de la fuente y receptores deben ser idénticos. No obstante, teniendo en cuenta la resolución de las ondas superficiales y la eficiencia de la adquisición de datos, es mejor que el intervalo de la fuente sea más largo que el intervalo de los receptores.

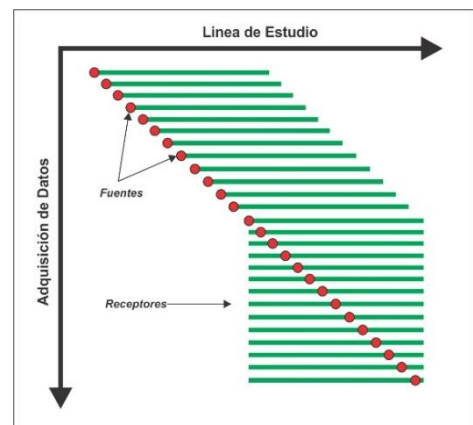


Figura N° 03: Un arreglo de adquisición de datos de ondas superficiales para el análisis del CMP. Fuente: Hayashi, 2008.

3. Análisis CMPCC

El procesamiento de datos en este estudio se puede describir con los siguientes pasos:

1. En primer lugar se calculan los agrupamientos de las Cross-Correlaciones de cada punto medio común.

2. Luego, la velocidad de fase versus la frecuencia es obtenida a partir de todos los agrupamientos de CMPCC.

3. Finalmente, el perfil 1D de velocidad de onda de corte (V_s) es reconstruida a partir de la curva de dispersión de la velocidad de fase usando cada agrupamiento de CMPCC.

4. El perfil 2D de la V_s se puede obtener por interpolación de perfiles 1D de velocidad de onda de corte.

Después de la preparación preliminar de los datos, los siguientes pasos se aplican con el fin de realizar el paso (1):

- En cada registro sísmico, cada par de trazas es Cross-Correlacionada. En total 276 Cross-Correlaciones se llevan a cabo.
- Las trazas Cross-Correlacionadas que tienen un punto medio común son agrupadas.
- En cada punto medio común, las trazas correlacionadas que tienen una separación igual se apilan en el dominio del tiempo.
- Las trazas se ordenan con respecto a su separación, en cada punto medio común.

4. Adquisición De Datos

El área de estudio está localizada al norte de Perú, en la provincia y departamento de Cajamarca (Figura N°04). Se llevó a cabo dos líneas sísmicas MASW 2D de 220m y 275m. En este estudio se utilizó para la recolección de datos el arreglo *fijo continuo*, un sismógrafo Geode de 24 canales, como fuente un martillo de 25 Lb., geófonos de 4.5 Hz., la separación entre geófonos fue 3m. La figura N°05 muestra un ejemplo de algunos registros sísmicos. Los disparos fueron realizados entre los receptores y en los extremos de la línea; los registros fueron de 1000 ms de largo con 0.5 ms intervalo de muestreo.



Figura N° 04: Ubicación de la Zona de Estudio (Rectángulo Rojo). Fuente: Google Earth.

La geología de la zona de estudio está constituido por un basamento rocoso de arenisca silfíca masiva y granular en afloramiento, de color gris claro, ligero y moderadamente meteorizada, resistencia media a alta, oxidada y fracturada, correspondientes a la formación Chimú. Sobreyaciendo a este basamento se ubica las tobas andesitas de grano medio a grueso, gris claro, ligera moderadamente meteorizada, resistencia baja a media, fracturada a muy fracturada perteneciente a la Formación Huambos.

Los materiales cuaternarios están representados generalmente por depósitos antropogénicos: corresponde a las estructuras como pads, botaderos, pozas, accesos,

campamentos; depósitos hidromórficos: material orgánico (turberas, limos y arcillas) húmedo a saturado; depósitos fluvio-glaciares: arcilla arenosa y grava arcillosa, plasticidad media a alta, medianamente densa a densa, humedad media a alta, de color anaranjado a marrón claro; suelo residual: arena arcillosa con algo de grava, plasticidad media a alta, consistencia rígida a dura, húmedo, anaranjado y gris en profundidad. Los suelos residuales de color gris corresponden a tobas argilizadas muy meteorizadas con presencia de pirita y son potencialmente generadores de drenaje ácido. En la Figura N° 06 se muestra la geología local.

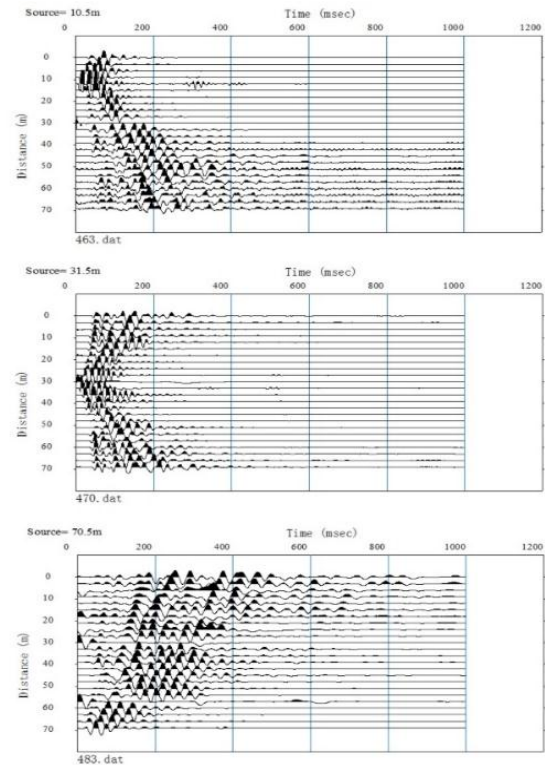


Figura N°05: Registros sísmicos obtenidos en la etapa de adquisición de campo. Fuente: Propia.



Figura N° 06: Geología local de la zona de estudio. Fuente: Propia.

5. Aplicación

El método se aplicó a datos de ondas superficiales recogidas en campo. Se realizó el cálculo de las Cross-Correlaciones de los agrupamientos de CMP a partir de todos los registros obtenidos (Ver Figura N°07), a partir del agrupamiento de los CMPCC obtenidos se realiza el cálculo de la velocidad de fase, obteniendo la variación de la curva de dispersión en un gráfico de Velocidad de Fase vs Frecuencia ($c - f$) ver Figura N° 08. Los diferentes colores de las curvas de dispersion indican las diferentes ubicaciones de los CMPCC. Las curvas de color rojo a amarillo se ubican al inicio de la línea de estudio y las de color verde a azul se encuentran al final de la línea de estudio. Por tanto; se debe tener en claro que la velocidad de fase de las curvas de dispersión aumenta con las ubicaciones de los CMPCC. Esto implica que la estructura de velocidades de onda de corte del sitio no es homogénea lateralmente y la velocidad de la onda de corte (V_s) del terreno aumenta con la distancia desde el origen del estudio.

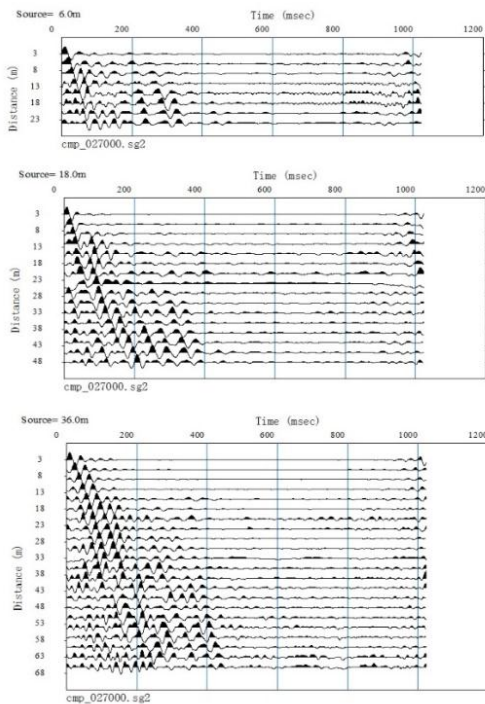


Figura N° 07: Agrupamiento de las CMPCC obtenidos para la construcción de las curvas de dispersión. Fuente: Propia.

A partir de la velocidad aparente determinada en la curva de dispersión de los agrupamientos CMPCC son obtenidas las variaciones de velocidad de onda de corte en profundidad (Ver Figura N°09). Para un punto en la línea de investigaciones, se realiza la inversión de datos mediante el método no lineal de mínimos cuadrados (Xia et al. 1999) aplicado a cada curva de dispersión para la reconstrucción de perfiles 1D de la V_s .

Una vez obtenido el modelo inicial de los perfiles de velocidad de onda de corte, se efectúa la reconstrucción del perfil 2D de V_s . (Figura N° 10). En las secciones 2D de V_s definido por el método de las ondas superficiales, se puede definir la estratigrafía y las propiedades ingenieriles de

cada estrato diferenciado. Basándose en la interpretación de la estructura de las V_s obtenido utilizando el método de ondas superficiales, junto con los registros de calicatas y perforaciones, podemos concluir que hay una aceptable correlación geológica-geotécnica.

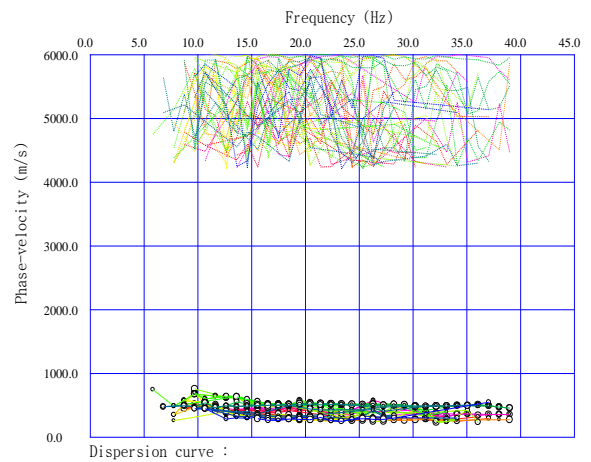


Figura N° 08: Todas las curvas de dispersión calculadas a partir de los agrupamientos de las CMPCC. Los diferentes colores indica la diferencia de ubicación de las CMPCC. Las curvas de color rojo a amarillas están situadas al principio de la línea de estudio y las curvas de color verde a azul en el final de la línea de levantamiento. Fuente: Propia.

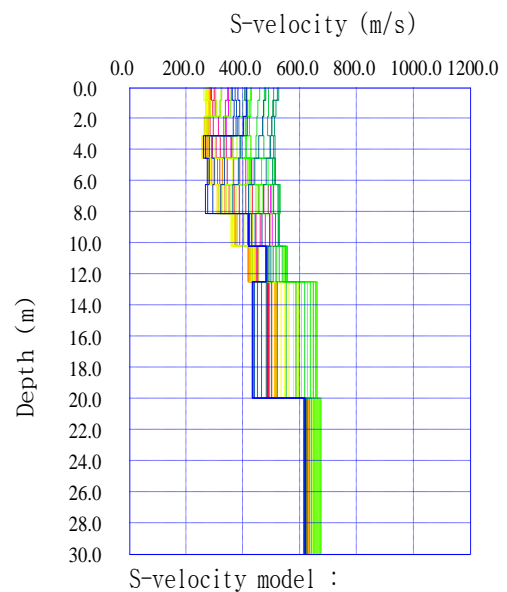


Figura N° 09: Perfiles de onda de corte (V_s) versus profundidad, obtenidos a partir de las velocidades aparentes. Fuente: Propia.

6. Conclusiones

El método MASW puede determinar con precisión las velocidades de fase, utilizando los registros sísmicos completos, mientras que el método SASW no puede determinar velocidades de fase de alta frecuencia a partir de Cross-Correlaciones de grandes espaciamientos debido al "aliasing" espacial. El análisis CMPCC es una extensión adicional del MASW y nos permite determinar velocidades

de fase de datos multidisparo directamente usando el agrupamiento de las CMPCC.

El análisis CMPCC tiene una característica notable, debido a que el método no requiere ninguna sumatoria y promedio de las diferencias de fase. La razón es que el análisis CMPCC procesa datos multicanal y multidisparo de las Cross-Correlaciones en comparación a otros métodos convencionales.

La comparación del método MASW mediante el análisis CMPCC con ensayos in situ (calicatas, perforaciones, etc.), proporciona un modelo aceptable de velocidad de onda de corte (V_s). Por lo que hace que los métodos de ondas superficiales aplicados a investigaciones geotécnicas sean

rápidos, eficientes y la adquisición de datos no sea destructiva.

El método MASW mediante el análisis CMPCC nos permite estimar modelos en dos dimensiones de la velocidad de onda de corte (V_s) hasta profundidades considerables de interés de forma no destructiva. Teniendo en cuenta que la demanda de investigaciones no destructivas para la ingeniería de suelos y la ingeniería sísmica es cada vez mayor, el método MASW 2D mediante el análisis CMPCC desarrollado en este estudio puede jugar un papel muy importante cada vez más en las investigaciones geotécnicas.

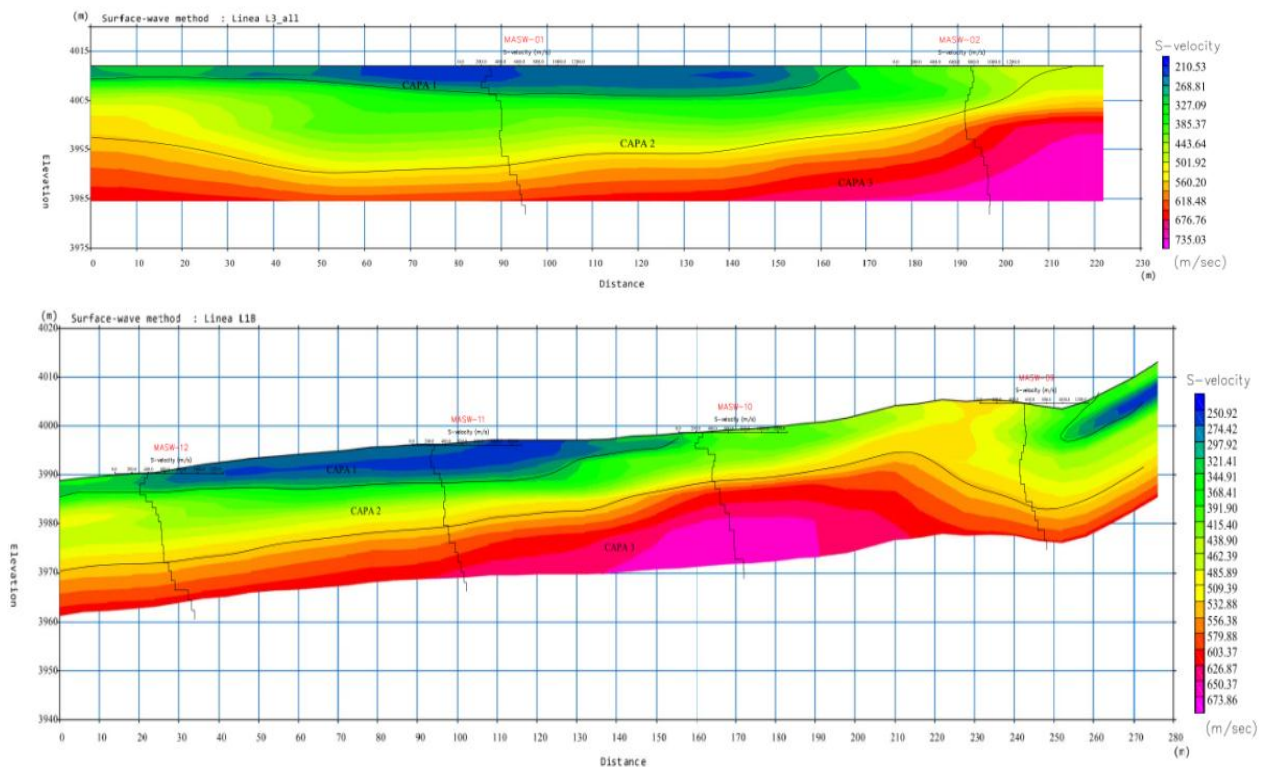


Figura N° 10: Secciones 2D de la velocidad de onda de corte (V_s) obtenidas mediante el método CMPCC. Fuente: Propia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Geoinstruments International SAC por su apoyo y permiso para la publicación de los datos.

Referencias

- Hayashi K., Suzuki H. 2004: CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data. *Exploration Geophysics*. 35: 07-13.
- Mahdavi M., Siahkoohi H.R. 2009: Multi-channel analysis of surface waves using Common Midpoint Cross Correlation method. Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran. Pg. 1-6.
- Miller R.D., Xia J., Park C.B., Ivanov J.M. 1999: Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*. 18: 1392-1396.

- Nazarian S., Stokoe K.H., Hudson W.R. 1983: Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thickness of pavement system. *Transport. Res. Record*. 930: 38-45.
- Oppenheim A.V., Willsky A.S., Nawab, S.H., 1996: *Signals & Systems*. Prentice Hall, USA.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J. 1999a: Multimodal analysis of high frequency surface waves. 12th symposium, Environmental and Engineering Geophysical Society, Proceedings. 115-121.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J. 1999b: Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*. 64: 800-808.
- Siahkoohi H.R., West G.F. 1998: 3-D seismic imaging of complex structures in glacial deposits. *Geophysics*. 63: 1041-1052.
- Xia J., Miller R.D., Park C.B. 1999: Configuration of near surface shear wave velocity by inverting surface wave. 12th symposium, Environmental and Engineering Geophysical Society, Proceedings. 95-104.