

XIII JORNADAS GEOTÉCNICAS DE LA INGENIERÍA COLOMBIANA Y VI FORO SOBRE LA GEOTÉCNICA DE LA SABANA DE BOGOTÁ

DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE VELOCIDADES DE ONDAS DE CORTE MEDIANTE ARREGLOS DE MICROTEMBLORES DE LARGO PERIODO

Andrés José Alfaro Castillo

y

Toshiaki Yokoi

International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, IISEE

RESUMEN

La evaluación de los efectos locales es una de las labores más importantes en la ingeniería sísmológica. Con el fin de realizar dicha evaluación es necesario determinar la estructura de velocidades de ondas de corte del sitio. Adicionalmente, en algunas cuencas sedimentarias, es importante conocer la estructura de los sedimentos profundos, debido a la amplificación de ondas de largo periodo. Existen varias técnicas para lograr este propósito, probablemente la menos costosa es utilizando la componente vertical de los microtemblores mediante un arreglo de sismógrafos. Mediante la utilización de varias técnicas de optimización es posible la inversión de las velocidades de fase de las ondas Rayleigh y se puede obtener el perfil de las ondas de corte (V_s). En la mayoría de los casos se utiliza el método de los mínimos cuadrados para realizar la inversión. Recientemente, los métodos heurísticos se están utilizando para invertir las velocidades de fase en la exploración con microtemblores.

En este estudio se realizaron siete arreglos de microtemblores en la ciudad de Tsukuba (Japón), ubicada en la parte Nororiental de la cuenca sedimentaria de Kanto, con el fin de determinar la estructura de velocidades. Para determinar las curvas de dispersión de las velocidades de fase se utilizó el método de la autocorrelación espacial SPAC en un rango de frecuencias de 0.3 a 5.0 Hz. La determinación de los perfiles alcanzó una profundidad de 750m. La comparación de los resultados con una perforación en el centro del arreglo mostró la efectividad del método. La obtención de los perfiles de V_s , la posibilidad de alcanzar importantes profundidades en áreas urbanas y su bajo costo, comparado con los métodos convencionales de prospección geofísica, hacen del Método de Exploración con arreglos de microtemblores, una herramienta atractiva y útil para estudios de microzonificación en países en vías de desarrollo.

Palabras clave: Microtemblores, Medición mediante arreglos, Cuenca del Kanto, Tsukuba, SPAC, Velocidad de ondas de corte, Microzonificación Sísmica.

1. Introducción

La geometría de la estructura del subsuelo, los tipos de suelo y la variación de sus propiedades con la profundidad, las discontinuidades laterales y la topografía del terreno pueden producir grandes amplificaciones de la señal sísmica e incrementar el daño durante terremotos destructivos. Por esta razón, cuando se realizan estudios de microzonificación sísmica es muy importante conocer en forma detallada la geometría y la estructura de velocidades de ondas de corte V_s en depósitos aluviales y diluviales, y saber la ubicación del basamento rocoso.

Usualmente la V_s se determina en el terreno mediante la utilización de técnicas convencionales de prospección sísmica (reflexión, refracción, perforaciones: *down-hole*, *up-hole* y *cross-hole*) o en el laboratorio, mediante ensayos dinámicos en muestras de suelo. El uso de los métodos convencionales de exploración presenta algunas dificultades cuando se requiere determinar la estructura profunda de los sedimentos. Por ejemplo, en campañas de reflexión o refracción, se necesitan fuentes externas como explosivos o equipos vibratorios, lo cual algunas veces no es fácil de realizar en zonas urbanas. Adicionalmente, las dimensiones de los arreglos que se requieren dependen de la profundidad de interés y en zonas urbanas puede ser difícil su despliegue. A lo que hay que sumar que el costo de la prospección geofísica a profundidad es costoso, por lo tanto, en la mayoría de los casos en los estudios de microzonificación sísmica, se limita la profundidad a las capas con velocidades menores a 400 m/s (Basamento rocoso en Ingeniería) y no el verdadero reflector profundo de las ondas incidentes, que tiene velocidades mayores a 3.000 m/s (Basamento Rcoso sísmico). Por otra parte, el costo de realizar perforaciones profundas es elevado y los resultados son válidos para un único sitio.

Las técnicas que utilizan microtemblores se han venido consolidando en las últimas décadas como buenas herramientas para el reconocimiento y la investigación de estructuras superficiales y profundas del suelo (Alfaro 2005a, 2005b). Hay varias técnicas que utilizan los microtemblores, durante los últimos años la relación espectral Horizontal Vertical (HVSr) se ha utilizado en todo el mundo principalmente debido al artículo de Nakamura (1989) con el fin de determinar los periodos predominantes para clasificación del tipo de suelo (Alfaro *et al.*, 2001; Bhattarai, 2005). La HVSr generó toda una serie de debates debido a la falta de robustez en la teoría (Horike *et al.*, 2001), sin embargo, Arai y Tokimatsu (2000, 2004) desarrollaron una técnica que permite la determinación de la estructura de V_s mediante la inversión de la relación H/V. Ellos desarrollaron una formulación completa ensamblando las ondas superficiales con el fin de realizar la inversión.

En esta investigación se utilizó la técnica de arreglos de microtemblores, debido a que es una teoría robusta y ha sido usada en diferentes partes del mundo, principalmente en Japón, adicionalmente con el fin de utilizar el método propuesto por Morikawa *et al.* (2004), método de Autocorrelación Espacial de dos estaciones 2sSPAC, el cual genera resultados con similar calidad utilizando únicamente dos estaciones, en lugar de 4, 7 o 10 estaciones, que requiere el método convencional de la Autocorrelación Espacial SPAC.

El análisis se realizó mediante el método de la autocorrelación espacial creado por Aki (1957, 1965) y utilizado por Okada (2003). Es importante mencionar otra técnica, el método del espectro Frecuencia-Número de Onda (F-K) desarrollada por Capon (1969) y aplicada a microtemblores por Horike (1985) y Okada (2003). El método F-K se utiliza para estimar la curva de dispersión de las ondas Rayleigh y la estructura de velocidades. El punto débil del método F-K es la necesidad de mediciones simultáneas con varias estaciones.

El método SPAC se basa en la teoría de las funciones aleatorias estacionarias, de tal forma que los microtemblores se consideran como un proceso estacionario en el tiempo y en el espacio. Las mediciones se realizaron en una zona representativa de la geología de la ciudad de Tsukuba y se cuenta con la información de una perforación profunda de 1300 metros (Hayashi, 2005; Hayashi *et al.*, 2005). El objetivo de este estudio es estimar el perfil de velocidades, especialmente para profundidades mayores a 500 m, alcanzando el basamento rocoso.

Aspectos Teóricos del Método de Autocorrelación Espacial SPAC

Aki(1957,1965) presentó los fundamentos teóricos para estimar las velocidades de fase por medio del método SPAC. En esta sección se resumen los aspectos del método SPAC convencional a partir de Aki(1957), Okada(2003) y Morikawa *et al.* (2004).

Se considera un arreglo circular con radio r para la observación de microtemblores; las ondas armónicas con una frecuencia angular ω de la componente vertical de los microtemblores se representan como $u(t; \omega, 0, 0)$ y $u(t; \omega, r, \theta)$, las cuales son observadas en el centro del arreglo $C(0,0)$ y en un sitio $X(r, \theta)$ del círculo, respectivamente (Figura 1). Se asume que la componente vertical de los microtemblores consiste principalmente de ondas Rayleigh con un modo fundamental.

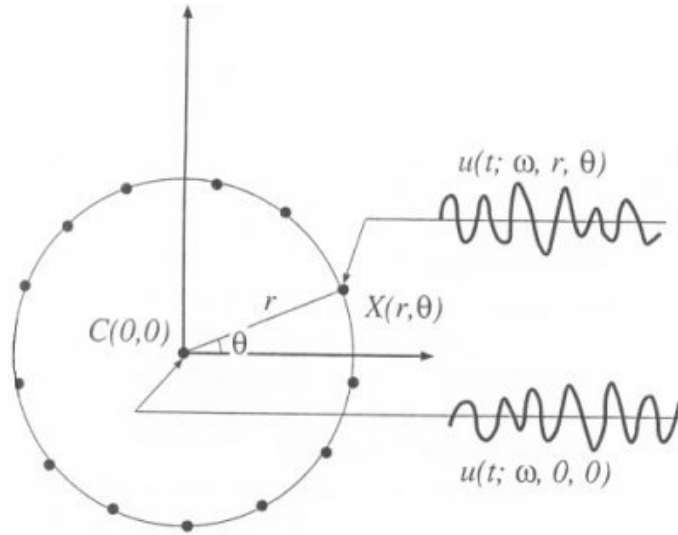


Figura 1. Descripción esquemática de los sitios de observación y de la componente vertical de los microtemblores. $u(t; \omega, 0, 0)$ y $u(t; \omega, r, \theta)$ denotan las ondas armónicas con una frecuencia angular ω , las cuales se obtienen en el centro del arreglo y en los diferentes puntos (Morikawa *et al.*, 2004).

La función de autocorrelación espacial se define en la Ecuación 1.

$$\phi(\omega; r, \theta) = \langle u(t; \omega, 0, 0) \cdot u(t; \omega, r, \theta) \rangle \quad \text{Ecuación 1.}$$

Los coeficientes de la autocorrelación espacial están definidos como el promedio de las funciones SPAC evaluadas en todos los puntos de observación del arreglo circular, como se muestra en la ecuación 2.

$$\rho(\omega, r) = \frac{1}{2\pi \cdot \phi(\omega, 0, 0)} \int_0^{2\pi} \phi(\omega, r, \theta) d\theta \quad \text{Ecuación 2.}$$

En la Ecuación 2 $\phi(\omega; 0, 0)$ es la función de autocorrelación en el centro $C(0,0)$. Después de una simplificación matemática, la integral de la ecuación 2 se puede describir como se muestra en la Ecuación 3.

$$\rho(\omega, r) = J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde J_0 es la función *Bessel* de tipo uno, de orden cero y $c(\omega)$ es la velocidad de fase a la frecuencia ω de las ondas Rayleigh con el modo fundamental.

Los coeficientes SPAC de la ecuación 2 pueden calcularse directamente en el dominio de la frecuencia utilizando la Transformada de Fourier de los microtemblores como se muestra en la ecuación 4.

$$\rho(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\text{real}[S_{CX}(\omega, r, \theta)]}{\sqrt{S_C(\omega, 0, 0) \cdot S_X(\omega, r, \theta)}} d\theta \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde *real* [] denota la parte real del número complejo, $S_C(\omega, 0, 0)$ y $S_X(\omega, r, \theta)$ son los espectros de potencia de los microtemblores en los sitios, $C(0, 0)$ y $X(r, \theta)$ respectivamente. $S_{CX}(\omega, r, \theta)$ es el espectro cruzado entre $S_C(\omega, 0, 0)$ y $S_X(\omega, r, \theta)$.

Se puede observar en las ecuaciones 2 y 4 que los coeficientes SPAC se obtienen promediando las funciones de coherencia de acuerdo con la localización θ , donde las funciones de coherencia se definen como la parte real del espectro cruzado $S_{CX}(\omega, r, \theta)$ normalizado por el espectro de potencia en $C(0, 0)$.

Los coeficientes SPAC $\rho(\omega, r)$ pueden ser calculados directamente a partir de los datos observados utilizando la ecuación (4). Lo cual es fácil de realizar aplicando alguna técnica numérica tal como la transformada rápida de Fourier (FFT). Adicionalmente, la velocidad de fase a una frecuencia ω puede obtenerse del argumento de la función Bessel en la ecuación (3). En este estudio se utilizó el software *b_fit* desarrollado por Yokoi (2005) con el fin de obtener el valor óptimo de las velocidades de fase. El programa utiliza el método *Levenberg-Marquardt* y algunas subrutinas de Press *et al.* (2002). De otro lado, para realizar la inversión se utilizaron dos programas *disp_sma* (Yokoi, 2005) y *surf96* (Herrmann y Ammon, 2004). *disp_sma* realiza la determinación de la estructura de velocidades óptima utilizando el método *down hill simplex* combinado con *simulated annealing approach*.

Método *Two Sites SPAC* – 2sSPAC

Siguiendo a Morikawa *et al.* (2004) se aplicó el método 2sSPAC, en el cual es posible obtener los coeficientes SPAC mediante la observación simultánea por pares de instrumentos $C(0, 0)$ y $X(r, \theta)$. En vez de observaciones simultáneas en todos los puntos del arreglo. La única modificación en la ecuación (4) es que el integrando está formado separadamente para cada θ . Por lo tanto el método 2sSPAC no requiere de varios instrumentos (4, 7, 10) u operarios, los cuales son indispensables en el método convencional. Sin embargo, se necesita más tiempo para realizar las mediciones.

3. -Observación de microtemblores

Los microtemblores se observaron en el extremo noreste de la cuenca sedimentaria de Kanto en la ciudad de Tsukuba, Japón. Donde la profundidad del basamento se encuentra

aproximadamente a 600 m de acuerdo con perforaciones. Las observaciones fueron realizadas el 27 y 28 de Julio de 2005, las cuales incluyeron siete arreglos: uno con radio de 29 m (lado mayor 50 m); dos con 155 m de radio (lado mayor de 200 m); dos con 290 m de radio (lado mayor de 500 m) y dos con 520 m de radio (900 m de lado mayor). La disposición de los arreglos se presenta en la Figura 2, las observaciones se denominaron R y B.

Se realizaron mediciones simultáneas en 7 (Figura 2a) y en 4 sitios (Figura 2b), con sismógrafos de velocidad con componente vertical, con periodos naturales de 1 segundo y 10 segundos respectivamente. Los microtemblores fueron almacenados en grabadoras digitales con resolución de 24 bits con filtro análogo pasa-banda con rango entre 0.1 y 5.0 segundos. Los registros se sincronizaron con el código de tiempo generado por relojes GPS. Se recogieron un conjunto de datos para el arreglo de 50 metros; 3 conjuntos de datos para el arreglo de 200 m, 10 conjuntos para el arreglo de 500 m, (duración total de 2 horas) y 10 conjuntos de datos para el arreglo de 900 m (duración total de 2 horas); debido al hecho que hay arreglos R y B, el número total de conjuntos de datos es 53. Las coordenadas de la ubicación de las estaciones se pueden ver en la Tabla 1.

Es importante tener en cuenta que la calidad de los datos depende, entre otros, de las interferencias debido a fuentes antropogénicas, como pueden ser carros u otro tipo de vehículos; en este caso los arreglos de 500 m presentaron interferencias importantes debido a la ubicación de las estaciones B5 y R5, las cuales estuvieron localizadas en una avenida con trafico intenso de camiones. Un ejemplo de los microtemblores se puede observar en la Figura 3, la cual corresponde a uno de los arreglos de 900 m. También fueron recolectados datos para aplicar la técnica 2sSPAC (Morikawa *et al.*, 2004) en el arreglo de 200 m, la cual fue recolectada en los siguientes pares B1-B2, B1-B3, B1-B4, B1-B5, B2-B6 y B1-B7, lo cual implica que hubo solo dos distancias r (57.7 m y 115.4 m) para el ajuste de las funciones Bessel. Para el arreglo convencional SPAC hubo cinco distancias (57.7, 100.0, 115.4, 173.2 y 200m).

Utilizando la ecuación (4) es posible evaluar los coeficientes SPAC, algunos ejemplos se muestran en la Figura 4; estos son función de la distancia y de la frecuencia, para bajas frecuencias los valores son máximos, los coeficientes SPAC van disminuyendo su valor en la medida en la que aumenta la distancia. Con respecto a la técnica 2sSPAC, la Figura 5 muestra la comparación de los coeficientes SPAC obtenidos para el arreglo B de 200 m entre SPAC convencional y 2sSPAC; hay una correspondencia en forma y tendencia, sin embargo se presentan variaciones en los valores, aun para el SPAC convencional evaluado para diferentes conjuntos de datos. Los coeficientes SPAC del 2sSPAC parecen ser una versión suavizada promedio de los coeficientes SPAC por el método convencional.

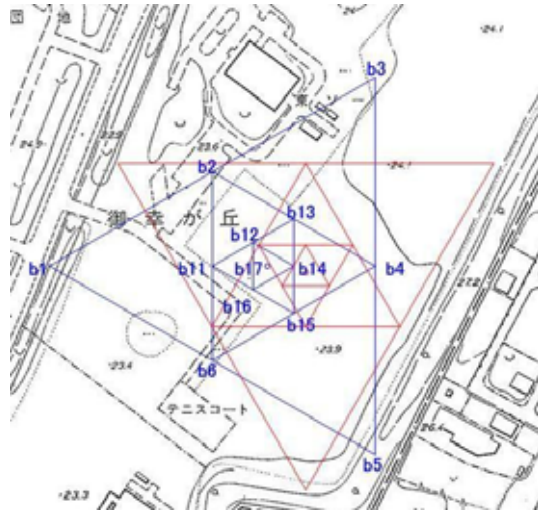


Figura 2a. Arreglos de 100m y 200m de lado mayor

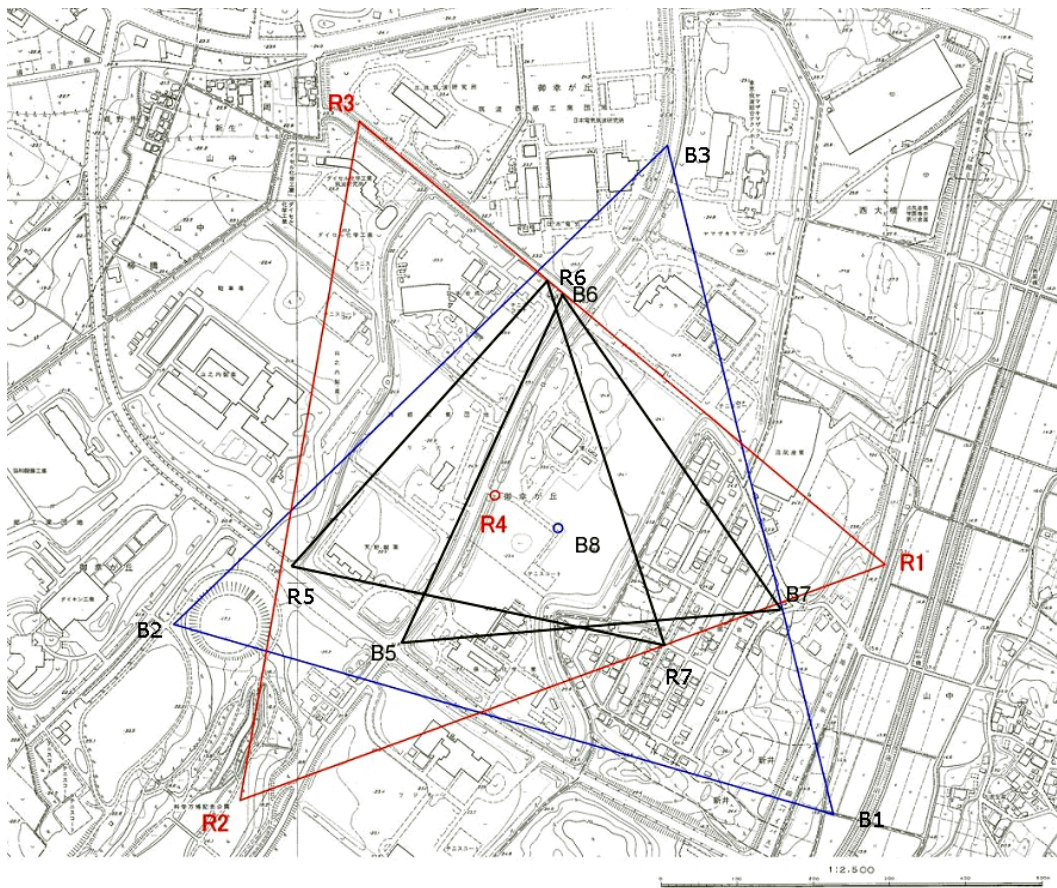


Figura 2b. Ubicación de los sitios de observación. Estos están ubicados en la parte noroccidental de la cuenca del Kanto, en la ciudad de Tsukuba, donde la profundidad del basamento esta a 600 m a partir de perforaciones profundas (Hayashi *et al.*, 2005). B8 es el centro de los arreglos B y R4 es el centro de los arreglos R. la longitud R1-R2 es de 900 metros; B5-B6 es 500 m. las observaciones se realizaron durante días laborales. B5 y R5 están ubicados en una avenida de alto tráfico.

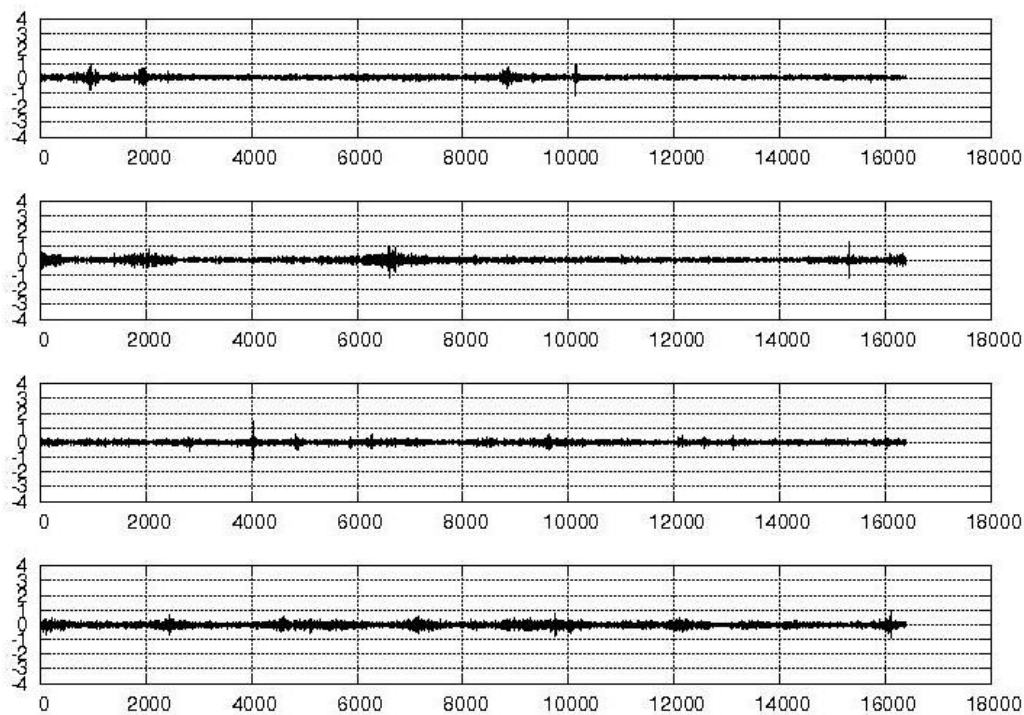


Figura 3. Ejemplo de registros de microtemblores del arreglo de 900m, estaciones R4, R1, R2 y R3 respectivamente. Cada traza indica la velocidad vertical del terreno.

Tabla 1 Coordenadas de las estaciones de los arreglos de 500 m y 900 m en Japanese Geodetic Datum 2000

Arreglo de 900m			Arreglo de 500m		
Estación	X	Y	Estación	X	Y
R1	1538.8	574.8	R5	758.0	572.0
R2	691.8	266.0	R6	1093.3	944.8
R3	848.3	1153.8	R7	1248.8	468.0
R4	1026.3	665.0	R8	1035.0	660.0
B1	1470.8	247.8	B5	902.0	471.8
B2	604.3	496.3	B6	1114.0	926.3
B3	1252.3	1122.0	B7	1402.0	515.8
B4	1109.0	622.0	B8	1141.3	636.3

Distancias

R1-R2	901.52m	R6-R7	501.33m
R1-R4	520.39m	R5-R6	290.64m
B1-B2	901.43m	B6-B7	501.51m
B1-B4	520.51m	B5-B6	290.35m

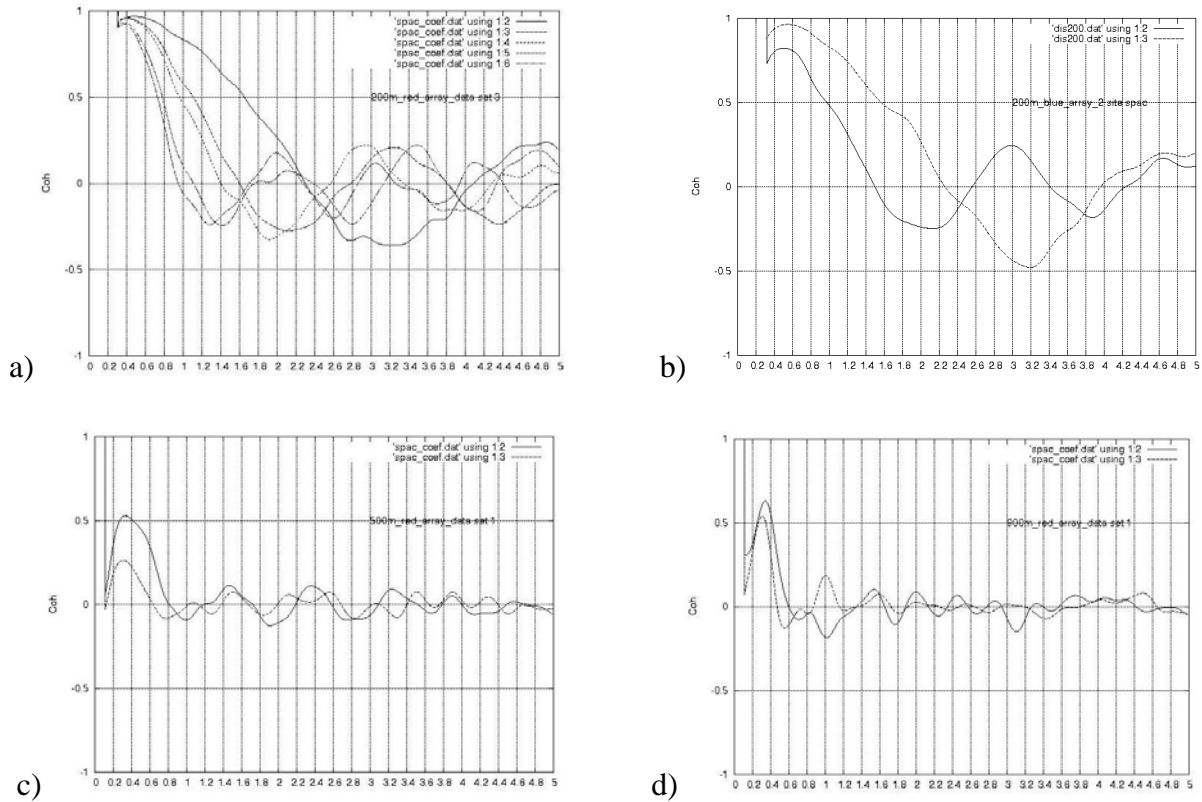


Figura 4. Ejemplos de Coeficientes SPAC, a) arreglo 200 m, b) arreglo 2sSPAC 200m ; c) arreglo 500m y d) arreglo 900m.

El siguiente paso en el análisis es ajustar las funciones Bessel para cada frecuencia de acuerdo con la ecuación (3), es necesario verificar los datos que pueden ser utilizados en el ajuste. La figura 6 muestra ejemplos del ajuste de las funciones Bessel. Para ciertas frecuencias es posible usar información de varias distancias, sin embargo, en el caso de bajas frecuencias solo fue posible utilizar la información del arreglo de 900 m, para ello se utilizó el programa *b_fit* (Yokoi, 2005). Mediante inversión de la ecuación (3) se obtienen las curvas de dispersión, algunos ejemplos se pueden observar en la Figura 7.

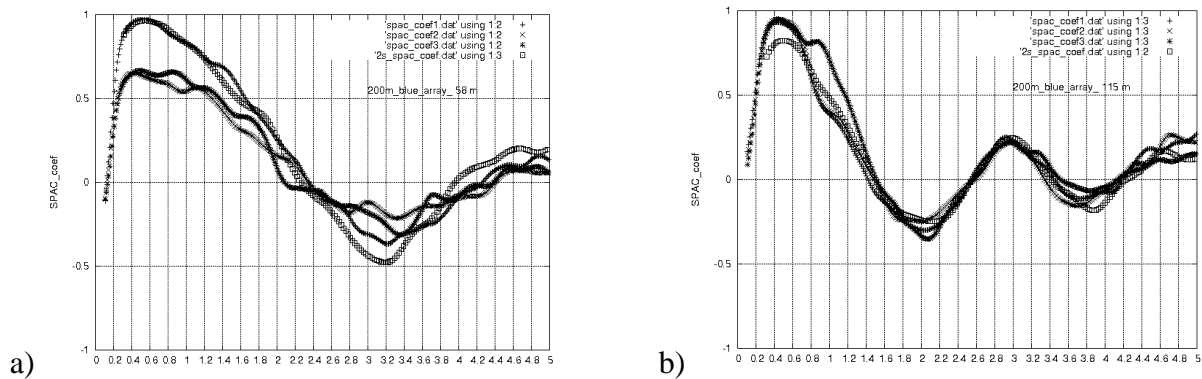


Figura 5. Coeficientes SPAC obtenidos de observaciones simultáneas y utilizando 2sSPAC en el arreglo B200m, a) para $r=58$ m , b) para $r=115$ m. Los cuadrados corresponden a 2sSPAC.

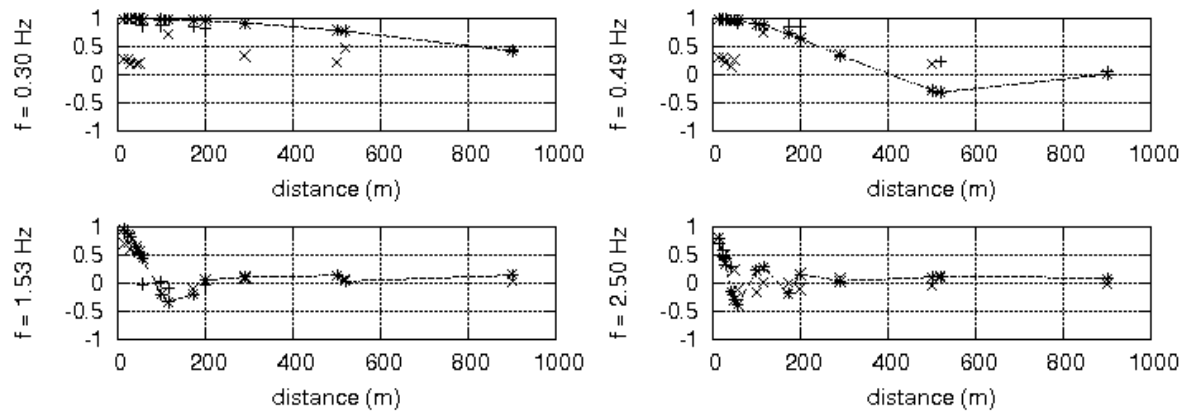


Figura 6. Ejemplos del ajuste de las funciones Bessel de primer tipo y orden cero para varias frecuencias (0.30 Hz, 0.49, 1.53 y 2.50 Hz) 'x' denota los puntos no utilizados para el ajuste de las funciones Bessel.

4.- Determinación de la estructura de Velocidades V_s

Se utilizaron dos métodos para invertir las velocidades de fase: el método de los mínimos cuadrados (Herrmann y Ammon, 2004) y la combinación del *Down Hill Simplex Algorithm* con el *Very Fast Simulated Annealing Method* (Ingber, 1989; Yokoi, 2005). De acuerdo con Yamanaka (2005) el *Simulated Annealing Method* se basa en la idea de la termodinámica donde la fusión de los metales se alcanza en el estado de menor energía con la disminución gradual de la temperatura (Metropolis y Rosenbluth, 1953). Por su parte, Kirkpartrick *et al.* (1983) aplicaron la idea a problemas de optimización mediante la analogía entre los dos problemas. El desajuste a ser minimizado corresponde a la energía en termodinámica, y el cambio de parámetros (espesor, V_p , V_s , densidad) pasa a ser el cambio de estado del material. Este cambio de parámetros es controlado por la forma de enfriamiento del sistema con la disminución de la temperatura. Algunos resultados obtenidos utilizando el *Very Fast Simulated Annealing Method* se presentan en la Tabla 2, los cuales muestran concordancia con los datos de la perforación.

De otro lado, la Figura 8 muestra algunos ejemplos de resultados utilizando *surf96* (Herrmann and Ammon, 2004); la Figura 9 presenta la comparación de los resultados con la información de la perforación. Los resultados muestran que ambos métodos son apropiados, sin embargo una ventaja del método propuesto por Yokoi(2005) es que es posible estimar el espesor y la V_s , mientras que en Herrmann and Ammon (2004) es necesario fijar el espesor o la velocidad de cada capa; sin embargo, *surf96* presenta el error estándar [km/s]; residual medio [km/s]; residual promedio[km/s] y porcentaje de ajuste (%).

En relación con el 2sSPAC (Morikawa *et al.*, 2004) se realizaron dos ensayos, el primero con el arreglo B200 m y con los arreglos B900 m y R900 m; en estos dos últimos casos sacando provecho en las dos horas de duración de los registros. Los resultados del arreglo B200m se pueden ver en la figura 7d. El resultado es similar a la del método SPAC convencional, pero en una banda de frecuencias más estrecha (~ 0.6 -5.0Hz.). Sin embargo, no es una comparación justa debido al hecho que sólo se utilizaron dos distancias en 2sSPAC para el ajuste de las funciones Bessel, en tanto que en el arreglo SPAC convencional se utilizaron cinco. En los arreglos de 900 m los resultados no fueron satisfactorios, por lo tanto se requiere más investigación.

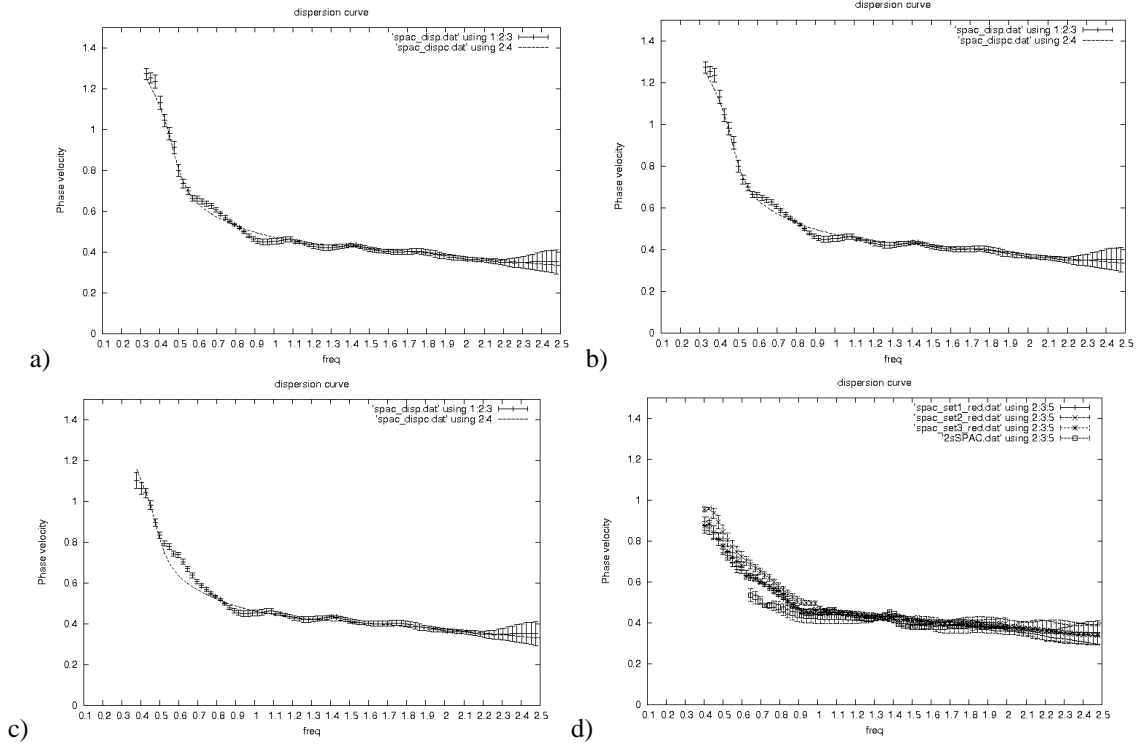


Figura 7. Velocidades de Fase de ondas Rayleigh de la componente vertical de microtemblores. La línea continua muestra el mejor ajuste de la curva de dispersión. a) Primer conjunto de datos de R200m mas un conjunto de datos de R900m; b) segundo conjunto de datos de R200m más un conjunto de datos de R900m; c) tercer conjunto de datos de R200m más un conjunto de datos de R900m; d) Comparación de tres conjuntos de datos R200m con 2sSPAC para B200m.

Tabla 2. Estructura de Velocidades estimada a partir de las Velocidades de Fase y a partir de la perforación

set 1

H (KM)	VP (KM/S)	VS (KM/S)	RHO (GM/CC)
0.060	1.62	0.30	1.82
0.190	1.81	0.46	1.88
0.426	2.04	0.68	1.95
999.000	3.11	1.64	2.23

set 2

H (KM)	VP (KM/S)	VS (KM/S)	RHO (GM/CC)
0.055	1.63	0.30	1.82
0.186	1.79	0.45	1.87
0.433	2.05	0.68	1.95
999.000	3.19	1.71	2.25

set 3

H (KM)	VP (KM/S)	VS (KM/S)	RHO (GM/CC)
0.055	1.61	0.28	1.82
0.189	1.79	0.45	1.88
0.432	2.04	0.67	1.95
999.000	3.32	1.82	2.28

Real - Simplified

H (KM)	VP (KM/S)	VS (KM/S)	RHO (GM/CC)
0.050	1.50	0.25	1.80
0.170	1.60	0.40	1.90
0.430	1.70	0.65	2.00
0.000	4.80	2.50	2.50

Estructura de Velocidades de Ondas de Corte Mediante Arreglos de Microtemblores de Largo Periodo

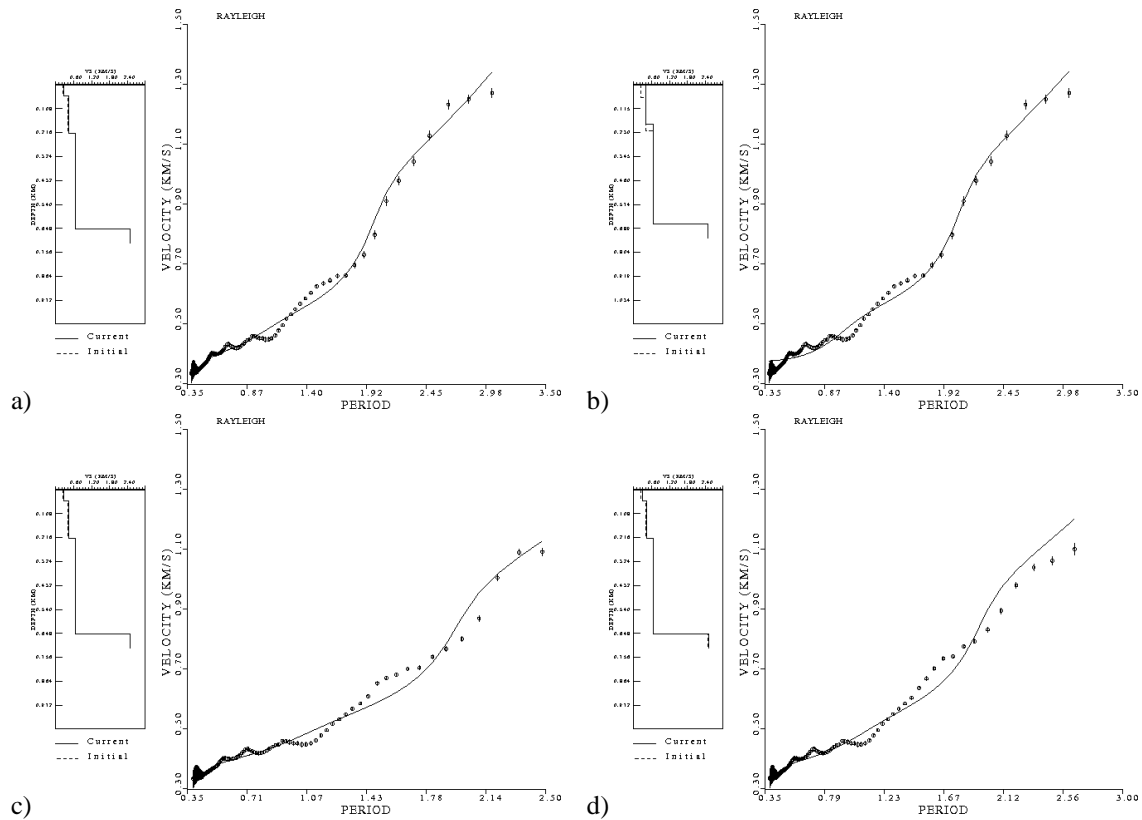


Figura 8. Varias estructuras de V_s utilizando *surf96* (Herrmann and Ammon, 2004) a) y b) con la misma curva de dispersión, a) fijando el espesor de las capas; b) fijando las V_s ; c) y d) resultados utilizando otras curvas de dispersión. Los arreglos de 900 m permiten observar largos periodos tales como 3 segundos.

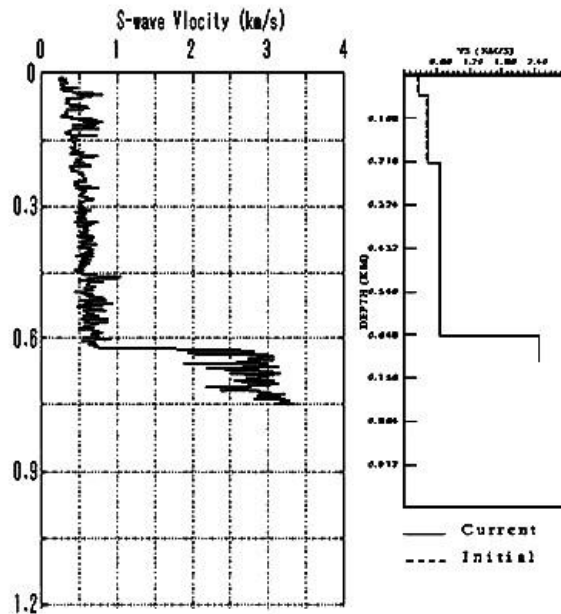


Figura 9. Comparación de la estructura de V_s obtenida con los datos de la perforación.

5. Discusión y Conclusiones

De los diferentes métodos de prospección geofísica, los métodos pasivos tienen la ventaja de no necesitar fuentes artificiales que puedan incomodar a la gente o costosas perforaciones. Las técnicas que utilizan microtemblores se han venido consolidando durante las últimas décadas como una buena herramienta en el reconocimiento y en la investigación de la estructura superficial y profunda del suelo (Alfaro, 2005a, 2005b).

Los resultados obtenidos utilizando SPAC y 2sSPAC son adecuados y pueden reflejar los aspectos más importantes de la estructura V_s del lugar. Los resultados utilizando 2sSPAC para el arreglo de 200 m fueron buenos, sin embargo, en una banda de frecuencias más estrecha, lo cual fue debido a que se utilizaron solo dos distancias para ajustar las funciones Bessel, en lugar de las cinco que se utilizaron en el método SPAC convencional. De otro lado, los resultados para los arreglos de 900 m utilizando 2sSPAC no fueron satisfactorios, por lo tanto se necesita más investigación al respecto.

De acuerdo con las trazas obtenidas, especialmente para las estaciones R5 y B5 en los arreglos de 500 m, es recomendable evitar avenidas o carreteras, porque las trazas pueden tener interferencias y los resultados pueden no ser satisfactorios. También, puede ser recomendable realizar las mediciones durante horas con mínimas interferencias, tales como camiones, o seguir la recomendación de Apostolidis *et al.* (2004) de ubicar las estaciones al menos 50 metros alejadas de avenidas o carreteras.

La ventaja más importante, de la estimación de la estructura de Velocidades de ondas de corte, utilizando microtemblores de largo periodo, es que permite la determinación confiable a profundidades importantes (aprox. 600 m) con una relativamente pequeña apertura del arreglo (900 m). Esto es importante para estudios de microzonificación en grandes ciudades, donde espacios libres para colocar arreglos convencionales es difícil y no pueden utilizarse fácilmente fuentes vibratorias potentes.

Finalmente los arreglos de microtemblores de largo periodo se pueden considerar como una técnica valiosa para determinar la estructura de velocidades y jugar un papel importante en las labores de prevención de desastres.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó siendo Andrés Alfaro becario de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) en el *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering* IISSE, el cual es parte del *Building Research Institute* en Tsukuba (Japón). Se agradece a los Ingenieros Koichi Hayashi y Kunio Aoike de *OYO Corporation* cuya cooperación durante las mediciones fue invaluable. Al Profesor Katsumi Kurita, *Chiba Science University*, al Geólogo Moneer Abdullah Mohammed Almasani, *National Seismological Observatory Center*, Yemen, y al Geólogo Mukunda BHATTARAI, *Seismological Center, Department of Mining and Geology, Nepal*, por su cooperación en el experimento. Los derechos de autor de los programas *b_fit*. (Program for fitting the spatial auto-correlation coefficient determined from observed data to Bessel function and determine the dispersion curve) y *disp_smal* (Program to obtain the optimum underground velocity structure for the given dispersion curve of Rayleigh wave based on the

down hill simplex method combined with the simulated annealing approach), corresponden a Toshiaki Yokoi *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering- Building Research Institute. Japón*. La mayoría de las figuras fueron dibujadas con *gnuplot* (Williams y Kelly, 2004).

Referencias

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-457.
- Aki, K. (1965) A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the Earth's Crust. *Geophysics*, 30, 665-666.
- Alfaro, A. (2005a) Estimation of the Shear Wave Velocity Structures Using Arrays of Long Period Microtremors. *Individual Studies by Participants at the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Building Research Institute. Tsukuba Japan*, Vol. 41, 15-28.
- Alfaro A. (2005b) Aplicación de los Microtemblores en la Ingeniería Sísmica. *XVI Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia*. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá.
- Alfaro, A., L.G. Pujades, X. Goula, T. Susagna, M. Navarro, J. Sánchez and J. A. Canas. (2001). Preliminary Map of Soil's Predominant Periods in Barcelona Using Microtremors. *Pure Appl. Geophys*, 158, 2499-2511.
- Apostolidis P., D. Raptakis, Z. Roumelioti and K. Pitilakis (2004) Determination of S-wave velocity structure using microtremors and SPAC method applied in Thessaloniki (Greece). *Soil Dyn. Earthq. Eng.*(24) 49-67
- Arai H. and K. Tokimatsu (2000) Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra. *Proc. 12th World Conf. Earthq. Eng, paper 2232*, CD-ROM.
- Arai H. and K. Tokimatsu (2004) S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94,1, 53-63.
- Bhattacharai, M. (2005) Seismic Microzonation Using H/V Spectral Ratios with Single Station Microtremor Survey. *Individual Studies by Participants at the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Building Research Institute. Tsukuba, Japan*, Vol. 41.
- Capon, J., (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Procc. IEEE*, 57, 1408-1418.
- Hayashi K. (2005) Active and Passive Surface Waves. *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Lectures Notes*. 45 pp.

- Hayashi K. T. Inazaki and H. Suzuki (2005) Buried Channel delineation Using a Passive Surface Wave method in Urban Area. *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Lectures Notes*. 25 pp.
- Herrmann R.B. and C. J. Ammon (2004) *surf96* from Computers Programs in Seismology, Surface Waves, receiver Functions and Crustal Structure, Version 3.30. Department of Earth and Atmospheric Sciences. Saint Louis University.
- Horike, M. (1985) Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave velocity structure down to the basement in urbanized areas, *J. Phys. Earth*, 33, 59-96.
- Horike, M., B. Zhao nad H. Kawase (2001) Comparison of Site Response Characteristics Inferred from Microtremors and Earthquake Shear Waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91,6, 1526-1536.
- Ingber L. "Very fast simulated reannealing." *Math. Comput. Modeling* 1989; 12: 967-973.
- Kirkpatrick S., C. D. Gelatt and M.P. Vecchi (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*. 1983; 220: 671-680.
- Metropolis N. and A. Rosenbluth (1953). "Equation of state calculations by fast computing machines." *J. Chem.Phys* ; 21: 1087-1092.
- Morikawa H., S. Sawada and J. Akamatsu (2004) A method to Estimate Phase Velocities of Rayleigh Waves Using Microseisms Simultaneously Observed at Two Sites, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 3, 961-976.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI* 30, no. 1, February, 25-33.
- Okada H. (2003) The microtremor survey method. Society of Exploration Geophysicists. Geophysical Monograph Series No. 12. Tulsa. USA. 127 pp.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B. P. Flannery (2002) Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. Code CDROM v 2.11. Cambridge University Press.
- Williams T. and C. Kelley (2004) Gnuplot - An Interactive Plotting Program. Available at www.gnuplot.info
- Yamanaka H. (2004) Application of Heuristic Search Methods to Phase Velocity Inversion in Microtremor Array Exploration. *Proc.13th World Conf. Earthq. Eng.* Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004. Paper No. 1161.
- Yokoi, T. (2005) Combination of Down Hill Simplex Algorithm with Very Fast Simulated Annealing Method - An effective Cooling Schedule for Inversion of Surface Wave's dispersion Curve. *Proc. Fall Meeting of Seismological Society of Japan*. S16-08010854.