

**IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA**

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE
MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA**

Andrés José Alfaro Castillo

alfaro@ciees.org

www.ciees.org

RESUMEN

Esta comunicación incluye un resumen del estado del arte en la determinación de las características dinámicas del suelo mediante la utilización de microtemblores, y ejemplos de aplicación en las ciudades de Barcelona (España) y Tsukuba (Japón).

Se presentan los experimentos realizados y los resultados obtenidos en la determinación de las funciones de transferencia en 204 sitios de la ciudad de Barcelona (España) mediante la utilización de la relación espectral horizontal vertical HVSr.

Seguidamente se presenta la determinación de la estructura de velocidades de ondas de corte mediante la utilización de 7 arreglos de microtemblores en la ciudad de Tsukuba (Japón), las dimensiones de los lados de los arreglos triangulares fueron 100, 200, 500 y 900 metros. El análisis de los datos se realizó siguiendo el método de la Autocorrelación Espacial SPAC y mediante el método *Two Sites SPAC* (2sSPAC). La determinación de la estructura de velocidades se realizó mediante dos métodos: inversión de las curvas de dispersión de las velocidades de fase por mínimos cuadrados y determinación de la estructura de velocidades óptima utilizando el método heurístico *down hill simplex* combinado con *simulated annealing approach*.

Los resultados obtenidos son satisfactorios y permitieron en la ciudad de Barcelona la determinación de un mapa de periodos predominantes del terreno acorde con la información geotécnica disponible. En el caso de Tsukuba la estructura de velocidades obtenida hasta profundidades de 750 metros es consistente con la información proveniente de una perforación profunda.

Finalmente se presenta la discusión y las conclusiones sobre la utilización de los microtemblores en la determinación de las características dinámicas del suelo para la evaluación de los posibles efectos locales.

Palabras Clave: Microtemblores, HVSr, SPAC, Arreglos, Microzonificación Sísmica, Velocidades de Ondas de Corte, Funciones de Transferencia

INTRODUCCION

Se presentan los experimentos realizados para determinar características dinámicas del suelo mediante la utilización de microtemblores. Ellos incluyen la determinación de las funciones de transferencia del subsuelo mediante la relación espectral horizontal vertical en la ciudad de Barcelona (España) (Alfaro, 1997; Alfaro *et al.*, 2001) y la determinación de la estructura de velocidades de ondas de corte en la ciudad de Tsukuba (Japón) (Alfaro, 2005a, 2005b; Alfaro y Yokoi, 2005). Esta comunicación se centra en la parte experimental, las definiciones y el desarrollo de la técnica de los microtemblores se pueden encontrar en Moreno y Alfaro (2000); los desarrollos teóricos completos se pueden encontrar entre otros en Alfaro (2005a, 2005b); por su parte la necesidad de las labores de Microzonificación Sísmica en varias ciudades colombianas se puede encontrar en Alfaro *et al.* (2000).

Utilización de la Relación Espectral H/V HVSR

A continuación se presenta el análisis de microtemblores con la técnica de relación espectral horizontal/vertical, realizados para la microzonificación de la ciudad de Barcelona (Alfaro *et al.*, 2001), cuya ubicación se observa en la Figura 1.

Los registros de microtemblores corresponden a la ciudad de Barcelona-España, y forman parte de los trabajos realizados para la microzonificación sísmica de la ciudad (Alfaro *et al.*, 2001). Los microtemblores fueron registrados con un acelerómetro K2 de Kinematics (Figura 2), y con un velocímetro prototipo. Los equipos K2 presentan teóricamente una curva de respuesta plana hasta 50 Hz, un rango dinámico de 114 dB, y nivel de resolución de 19 bits, con lecturas máximas absolutas de 1g (+/- 2.5 V), con una frecuencia de muestreo de 100 mps (Kinematics, 1995). En la Figura 2 se ve el acelerómetro K2 de Kinematics, junto al portátil que almacena la información. En la Figura 3 se observa el velocímetro prototipo con y sin la cubierta protectora; con una frecuencia de muestreo de 100 mps y con respuesta plana entre 2 y 10 Hz, como se puede ver en la Figura 4.

El análisis de los registros incluyó los siguientes pasos: corrección de la línea base, filtrado en el rango de las frecuencias de interés, utilización de una ventana de Hann, de acuerdo con las recomendaciones de Aki y Richards (1980). La longitud de la ventana debe ser lo suficientemente larga para permitir el número suficiente de oscilaciones de la frecuencia de

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

interés, y a la vez lo suficientemente corta, para que pueda estimarse un número suficiente de medidas sin solapar demasiado las ventanas. Por otra parte, el desplazamiento de la ventana en si mismo debe ser lo suficientemente largo para producir residuos incorrelacionados, lo cual es una hipótesis básica utilizada en el cálculo estándar de errores. Posteriormente se suavizan los espectros de Fourier utilizando una ventana en forma de campana gaussiana. En el caso de los microtemblores se realiza un promediado de los resultados obtenidos en las ventanas que cubren todo el registro y se evalúa el intervalo de confianza del 95%.

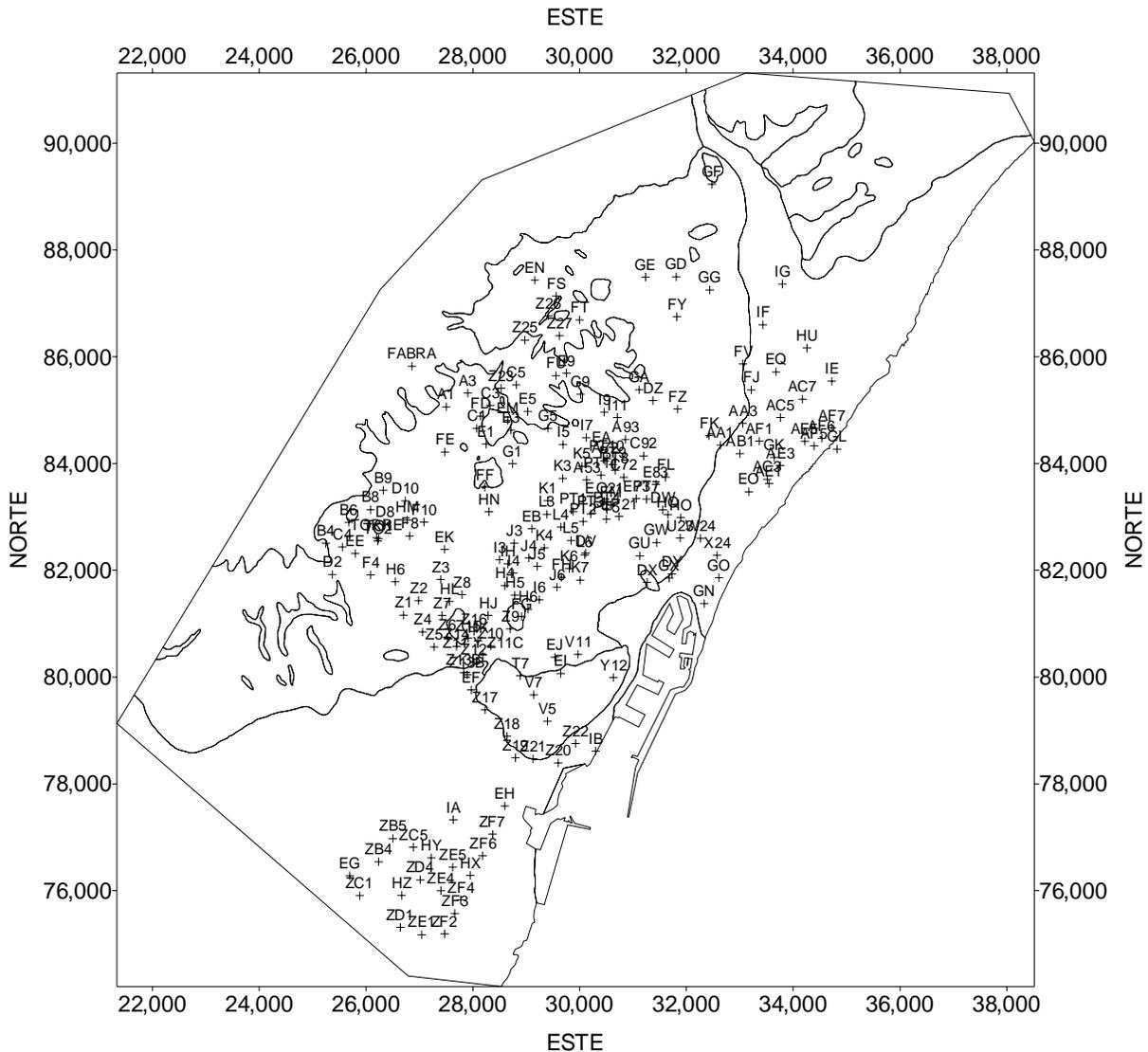


Figura 1.- Localización de los sitios de medición de microtemblores en la ciudad de Barcelona-España

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA



Figura 2.- Acelerómetro K2 y ordenador (Alfaro ,1997).

Para el análisis de las FFT y el filtrado de datos se ha desarrollado un programa Fortran que usa la librería de Herrmann (1985).

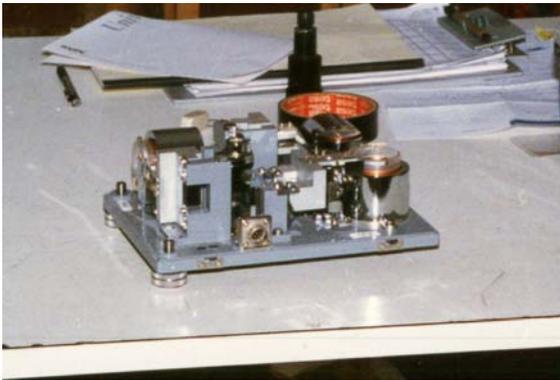


Figura 3.- Velocímetro sin y con la cubierta protectora.

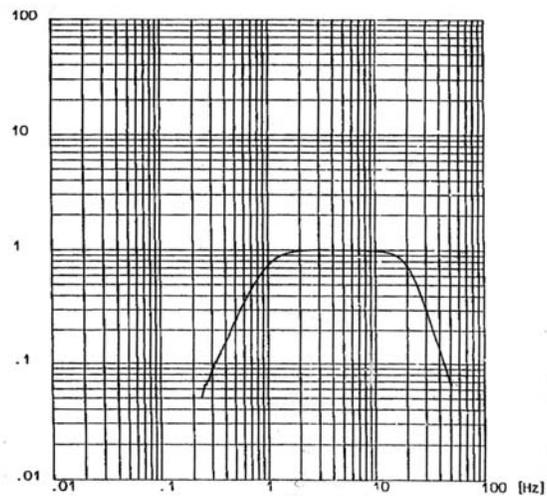


Figura 4.- Curva de Respuesta del Velocímetro

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

En los 204 sitios mostrados en la Figura 1, se realizaron mediciones de microtemblores con duración de 180 segundos y a 100 muestras por segundo (Alfaro, 1997, Alfaro *et al.*, 1998). Adicionalmente en los sitios denominados Fabra y Torre, correspondientes al Observatorio Fabra y al Rectorado de la Universidad Politécnica de Cataluña (Torre Girona), se realizaron 24 mediciones, una cada hora para verificar la estabilidad del método. El Observatorio Fabra está localizado en afloramiento rocoso y La Torre Girona en material sedimentario de bajo espesor, la variabilidad de los análisis fue mínima, como se puede ver en la figura 5.

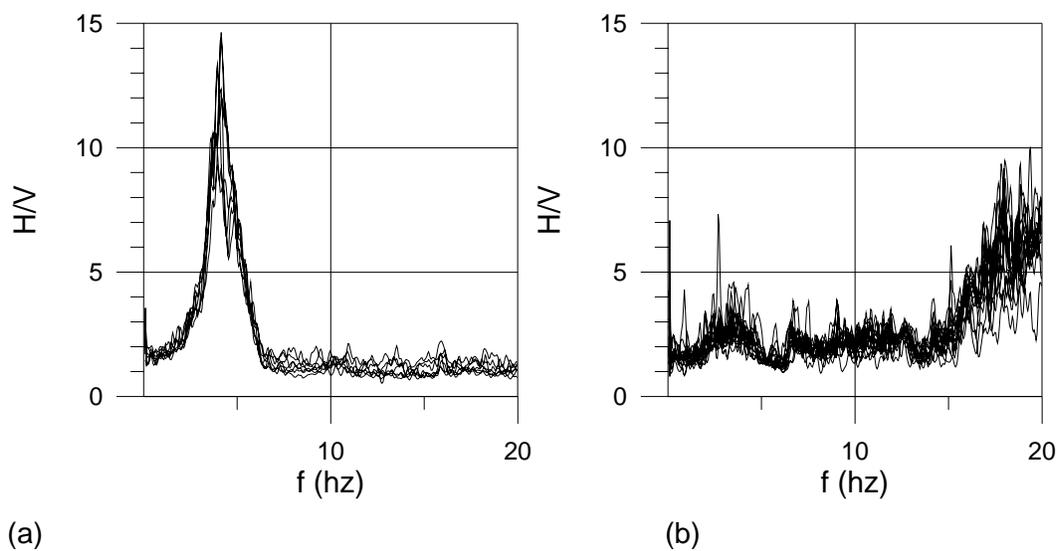


Figura. 5.- Ensayos de estacionariedad: (a) en material sedimentario de bajo espesor en el Campus de la Universidad Politécnica de Cataluña; (b) en afloramiento rocoso en el Observatorio Fabra (Alfaro *et al.*, 1999b).

A pesar de que los niveles de ruido ambiental varían sustancialmente a lo largo del día (Kanai y Tanaka, 1961; Nakamura 1989), los cocientes espectrales aparecen estables y por lo tanto el período predominante del suelo también.

Los análisis de estacionariedad también permiten identificar la presencia de fuentes fijas que excitan el suelo a una determinada frecuencia, como puede observarse en la Figura 5b, en la cual aparece frecuencia espuria en tres hz y alguna fuente que excita durante ciertas horas del día la frecuencia alrededor de los 16 hz. Para el caso del suelo sedimentario de bajo espesor (Figura 5a) se descarta la presencia de fuentes fijas que no actúen durante todo el día. También es importante mencionar que los resultados son independientes de la hora del día en que se realicen, o lo que es lo mismo del nivel de ruido ambiente existente.

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Para ver la influencia de fuentes artificiales puntuales y cercanas, como el caso de tráfico o peatones, se realizaron más de 30 pruebas determinando el período predominante analizando todo el registro o los intervalos en los cuales la amplitud media era aproximadamente constante. En la figura 6 se observan dos ejemplos. El período predominante obtenido es el mismo teniendo en cuenta o no las interferencia en la señal (Alfaro *et al.*, 1999b).

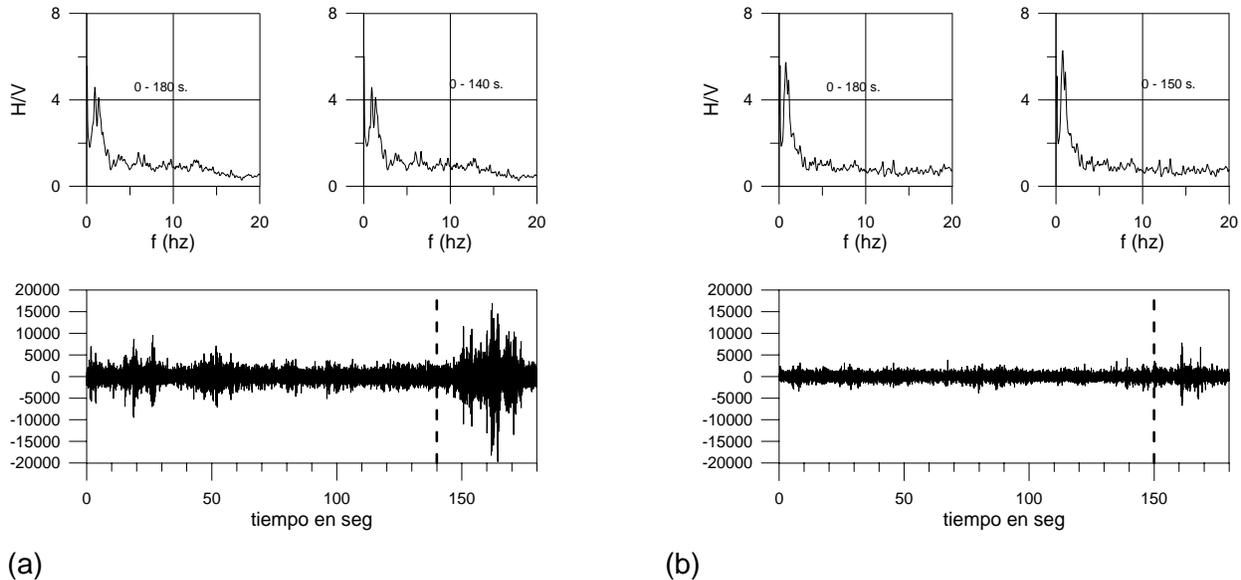


Figura 6.-Comparación entre la función de transferencia utilizando toda la longitud del registro (0-180 s.) (a)Registro BAI3 la parte con amplitudes medias constantes (0-140 s.). (b) Registro BAL3.la parte con amplitudes medias constantes (0-150 s.). (Alfaro *et al.*, 1999)

Se ha de destacar, la influencia del tratamiento de los registros en el resultado obtenido, en la figura 7 se presenta la comparación entre resultados obtenidos para Barcelona utilizando la técnica de la relación espectral horizontal vertical (Nakamura, 1989) o la técnica propuesta por Konno y Ohmachi(1998), la línea continua indica períodos iguales, en algunos registros se presentan diferencias en los períodos obtenidos. Sin embargo, es de destacar que para fines de microzonificación sísmica, los períodos de interés, generalmente están comprendidos entre 0.0 y 0.7 segundos, ya que la mayor parte de las estructuras civiles convencionales tiene períodos comprendidos en este rango, en este caso los valores del período predominante obtenidos son básicamente los mismos.

El análisis de los más de 300 registros obtenidos en los 204 sitios de la ciudad de Barcelona permite diferenciar materiales (Alfaro 1997, Alfaro *et al.* 2001) y obtener un mapa de períodos

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

predominantes del suelo, como se puede ver en la figura 8. Ejemplos de las relaciones espectrales H/V se pueden ver en la figuras 9. En la figura 9a se presenta la relación espectral en afloramiento rocoso, la función de transferencia es aproximadamente plana en todo el rango de frecuencias y no presenta amplificaciones, ya que la amplitud de la relación de unitaria.

En la Figura 9b, se presenta la relación espectral para material sedimentario de bajo espesor, con máximos de 25 metros y promedios de 10 metros (Ventayol *et al.* 1978, Candela 1983), el ejemplo mostrado con frecuencia dominante a los 6 Hz. En el caso del material sedimentario de bajo espesor la amplificación es del orden de 2.5 veces.

En la Figura 9c se presenta la relación espectral para material sedimentario: arcillas y limos sobre gravas, con espesores variables de 0 a 50 metros. En este caso se encuentran frecuencias dominantes en 1 y 4 Hz. con amplificaciones inferiores a 2 veces. Finalmente en la Figura 9d se ve un ejemplo de material sedimentario de mayor espesor: limos y arcillas sobre gravas, con potencias variables entre 25 y 100 metros. Hay un pico dominante muy claro en 2 Hz. y un nivel de amplificación de 3.5 veces.

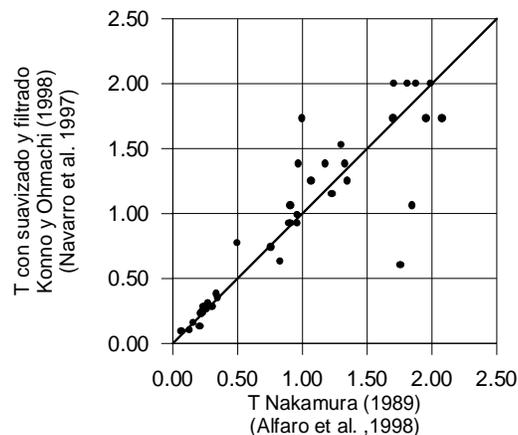
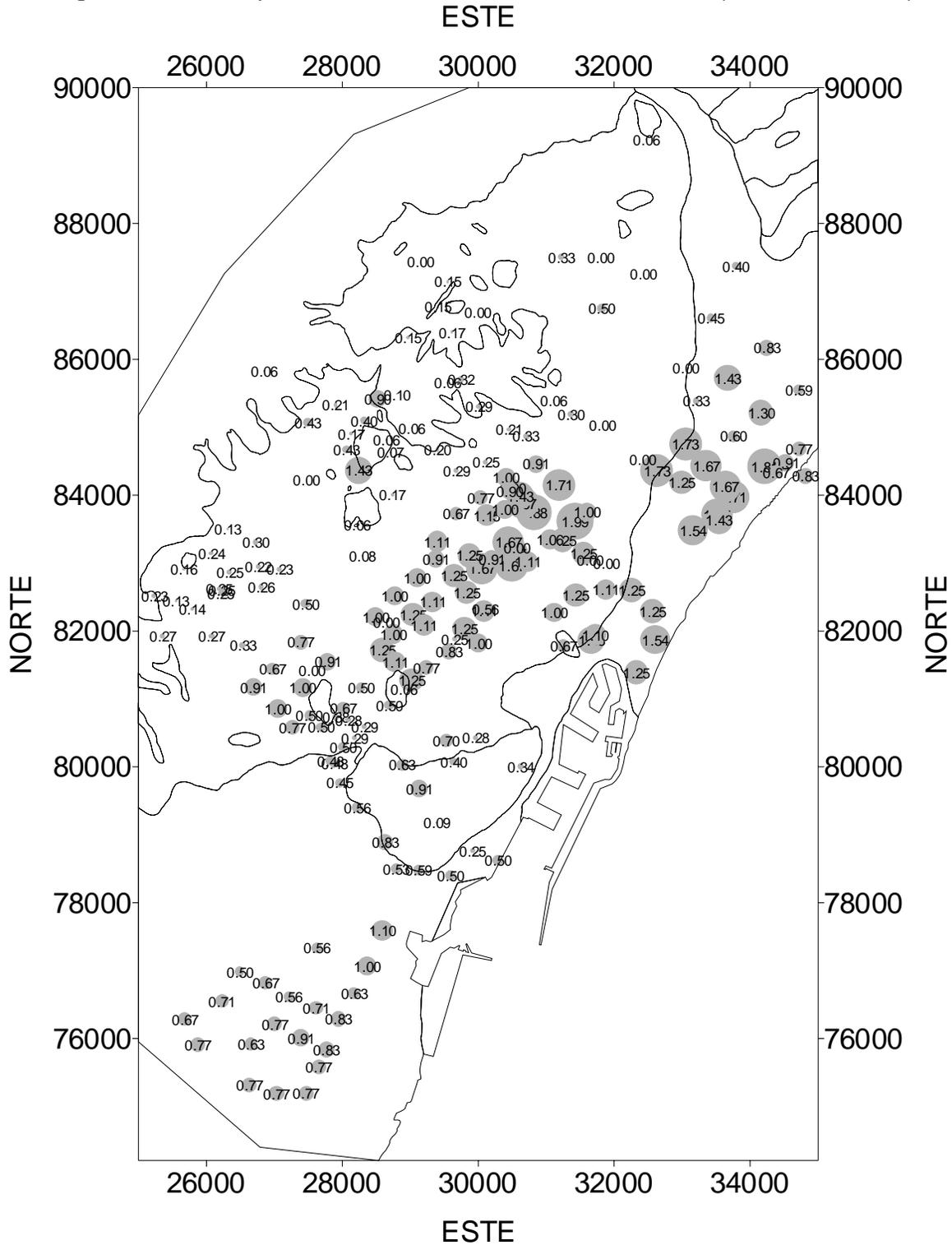


Figura. 7.- Resultados para Barcelona utilizando la HVSR y la HVSR con el filtrado y suavizado de Konno y Ohmachi(1998)

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Figura 8. Periodos predominantes de los suelos de Barcelona (Alfaro *et al*, 2001)



CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

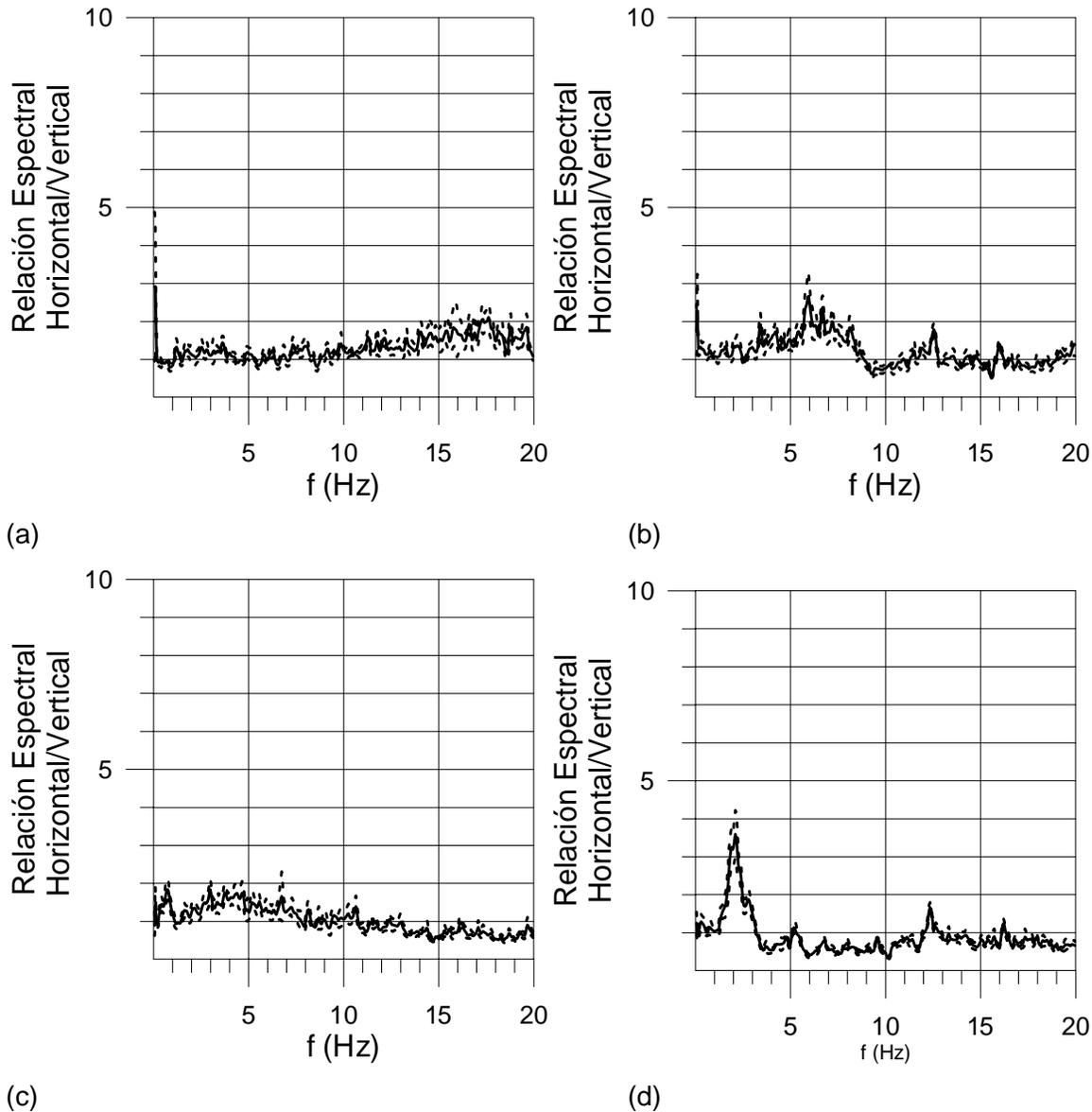


Figura 9.- Relación Espectral H/V (línea continua, 95% de confiabilidad en línea discontinua) (a) en afloramiento rocoso. Parque del Carmel - Jardines de Juan Ponce; (b) en material sedimentario de bajo espesor. Pasaje de Luca - Acceso al Club de Tenis Barcino; (c) en material sedimentario del Delta del Río Besos. Plaza Eduardo Torroja; (d) en material sedimentario del Delta del Río Llobregat Puerto - Acceso al Muelle Sur.

Arreglos de Microtemblores

El uso de los arreglos de microtemblores se está consolidando como una técnica pasiva de prospección geofísica, utilizada principalmente para el reconocimiento de la estructura del subsuelo. Las técnicas para el análisis de datos fueron desarrolladas en el año 1957 por Aki y en el año 1969 por Capon, la segunda tuvo mayor impulso porque permite adicionalmente determinar el origen de la fuente que produce la señal sísmica. En las últimas dos décadas las dos técnicas se han utilizado más, debido a la posibilidad del registro digital y a la reducción del

**IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA**

costo de los sismógrafos, lo que ha facilitado la realización de los arreglos y el procesamiento de los datos.

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 las Figuras 10 y 11, las observaciones se denominaron R y B.

Se realizaron mediciones simultáneas en 7 y en 4 sitios (Figura 10 y 11 respectivamente), 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 (Alfaro, 2005; Alfaro y Yokoi, 2005).

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 tráfico intenso de camiones. Un ejemplo de los microtemblores se puede observar en la Figura 12, 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).

Algunos ejemplos de coeficientes SPAC se muestran en la Figura 13; estos son función de la distancia y de la frecuencia, para bajas frecuencias los valores son máximos, los coeficientes

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

SPAC van disminuyendo su valor en la medida en la que aumenta la distancia. Con respecto a la técnica 2sSPAC, la Figura 14 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.

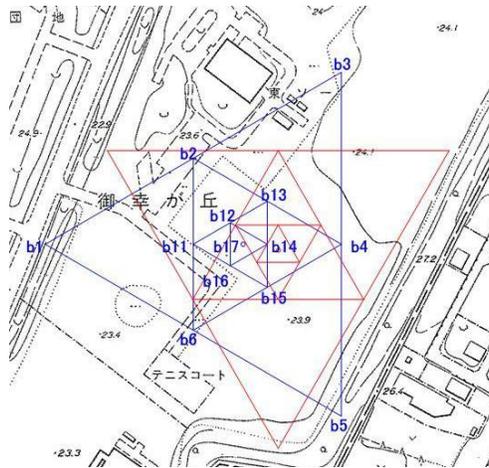


Figura 10. Arreglos de 100m y 200m de lado mayor

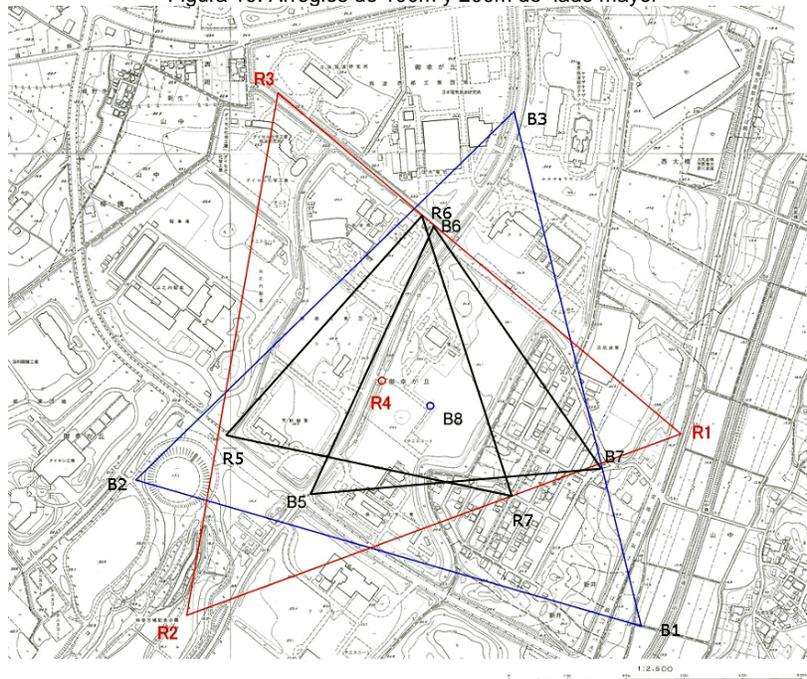


Figura 11. Ubicación de los sitios de observación. Estos están ubicados en la parte noroccidental de la cuenca del Kanto, en la ciudad de Tsukuba, donde la profundidad del basamento está a 600 m a partir de perforaciones profundas (Hayashi *et al.*, 2005). B8 es el centro de los arreglos B y R4 es el 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 (Alfaro, 2005).

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

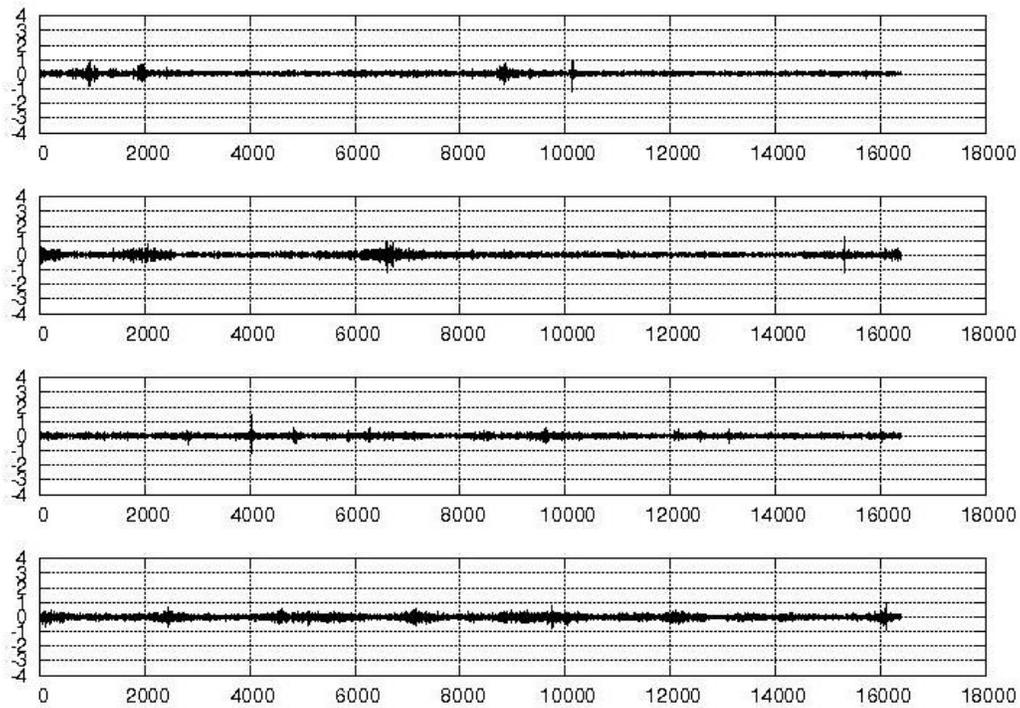


Figura 12. Ejemplo de registros de microtemblores del arreglo de 900m, estaciones R4, R1, R2 y R3 respectivamente. Cada traza indica la velocidad vertical del terreno.

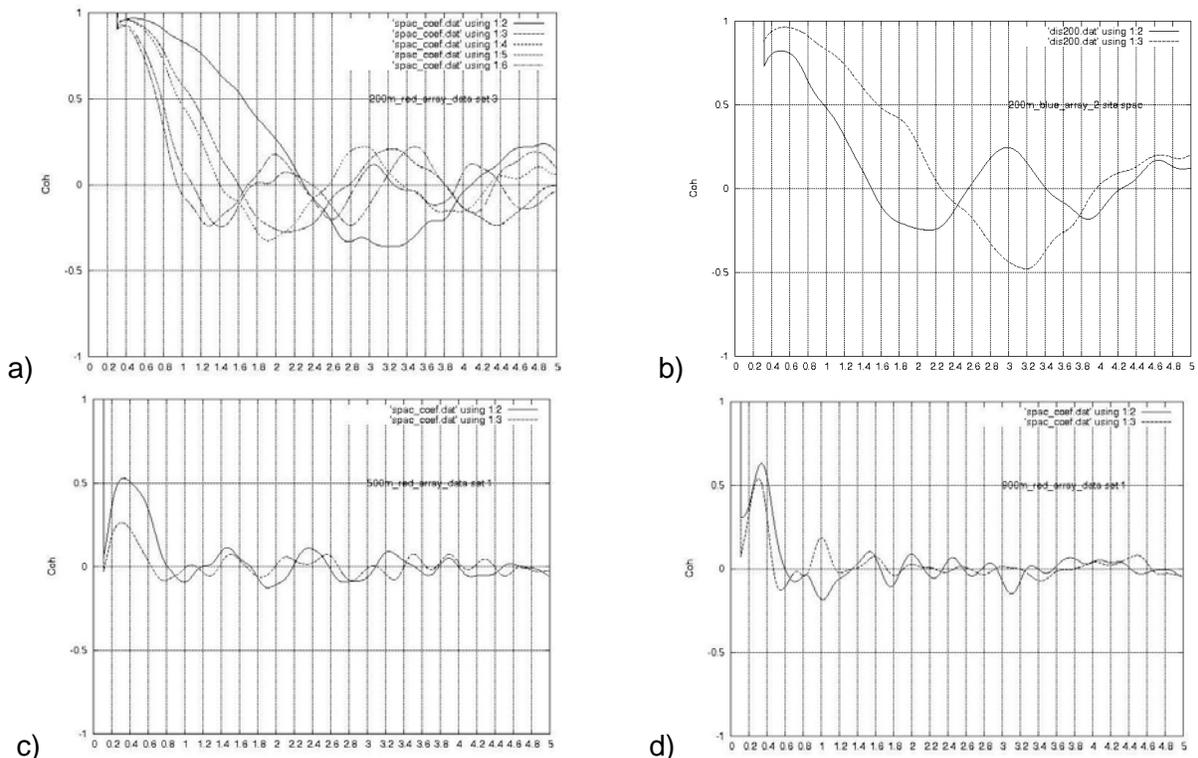


Figura 13. Ejemplos de Coeficientes SPAC, a) arreglo 200 m, b) arreglo 2sSPAC 200m ; c) arreglo 500m y d) arreglo 900m.

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACION DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACION SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

El siguiente paso en el análisis es ajustar las funciones Bessel para cada frecuencia, es necesario verificar los datos que pueden ser utilizados en el ajuste. La figura 15 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 obtienen las curvas de dispersión, algunos ejemplos se pueden observar en la Figura 16.

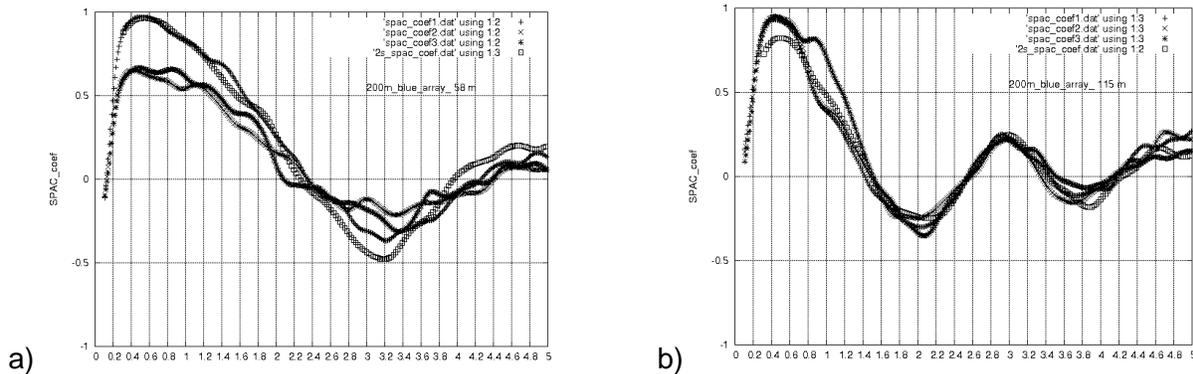


Figura 14. Coeficientes SPAC obtenidos de observaciones simultáneas y utilizando 2sSPAC en el arreglo B200m, a) para $r=58$ m, b) para $r=115$ m. Los cuadrados corresponden a 2sSPAC.

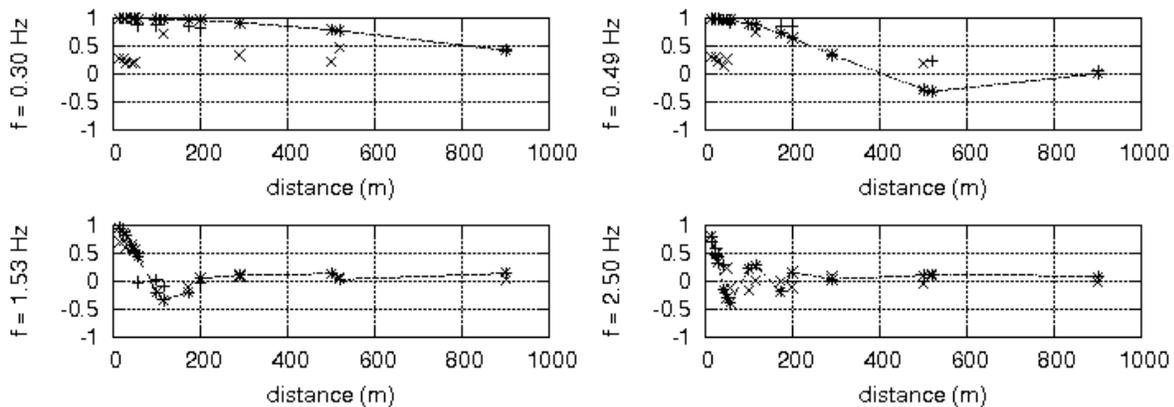


Figura 15. Ejemplos del ajuste de las funciones Bessel de primer tipo y orden cero para varias frecuencias (0.30 Hz, 0.49, 1.53 y 2.50 Hz) 'x' denota los puntos no utilizados para el ajuste de las funciones Bessel.

Determinación de la estructura de Velocidades Vs

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

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

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 1, los cuales muestran concordancia con los datos de la perforación.

De otro lado, la Figura 17 muestra algunos ejemplos de resultados utilizando *surf96* (Herrmann and Ammon, 2004); la Figura 18 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 16d. 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.

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACION DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACION SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

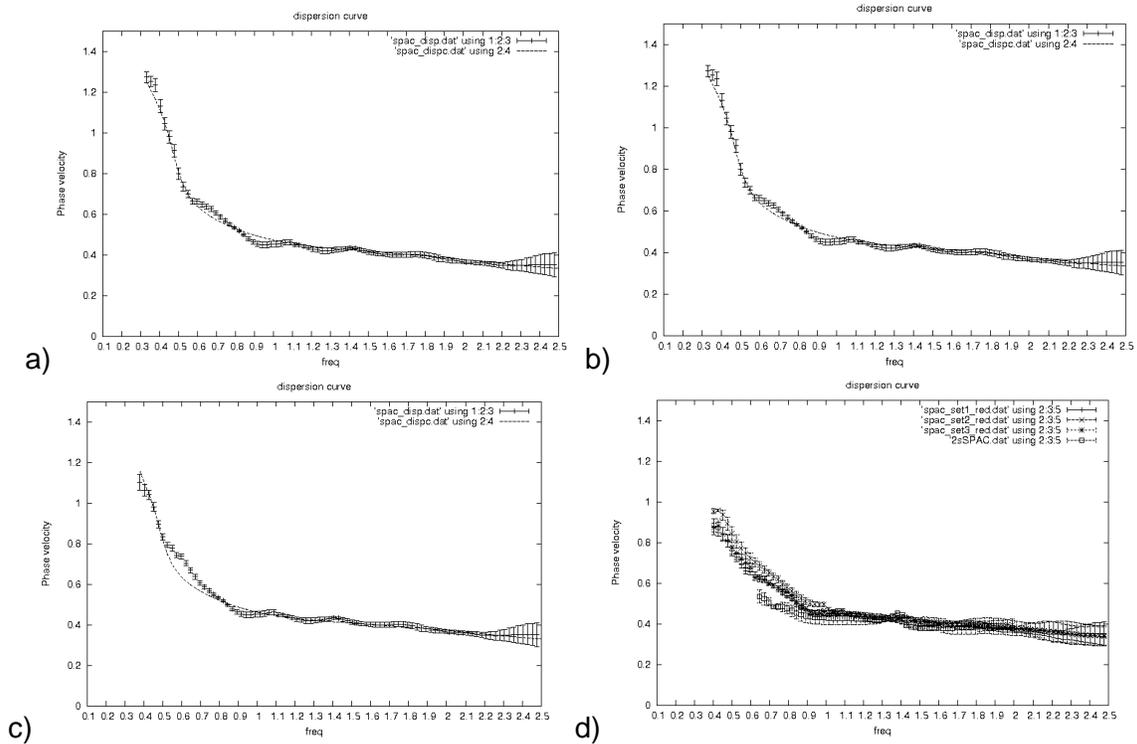


Figura 16. Velocidades de Fase de ondas Rayleigh de la componente vertical de microtemblores. La línea continua muestra el mejor ajuste de la curva de dispersión. a) Primer conjunto de datos de R200m mas un conjunto de datos de R900m; b) segundo conjunto de datos de R200m más un conjunto de datos de 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 1. 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

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

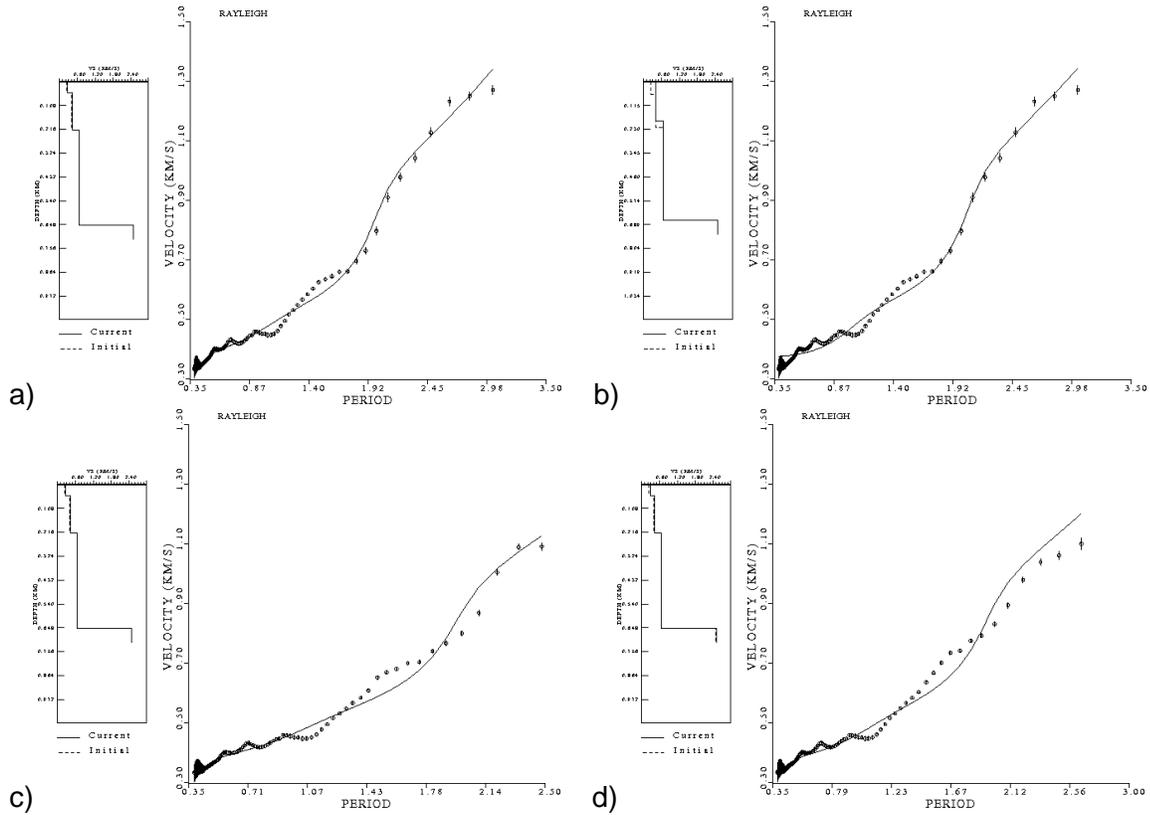


Figura 17. Varias estructuras de Vs utilizando *surf96* (Herrmann and Ammon, 2004) a) y b) con la misma curva de dispersión, a) fijando el espesor de las capas; b) fijando las Vs; c) y d) resultados utilizando otras curvas de dispersión. Los arreglos de 900 m permiten observar largos periodos tales como 3 segundos.

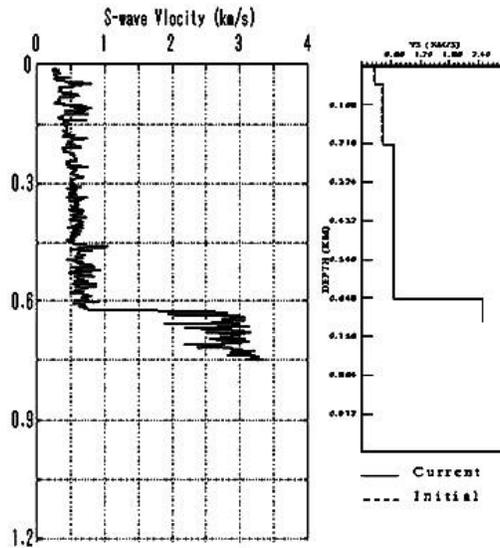


Figura 18. Comparación de la estructura de Vs obtenida con los datos de la perforación.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

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 las características dinámicas del suelo, entre otros, los periodos predominantes y la estructura de velocidades de ondas de corte del sitio. Adicionalmente, en algunas cuencas sedimentarias, es importante conocer la estructura profunda de los sedimentos, debido a la amplificación de ondas de largo periodo.

Usualmente la velocidad de ondas de corte 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 no es fácil de realizar en zonas urbanas.

Adicionalmente, las dimensiones de los arreglos dependen de la profundidad de interés y en zonas urbanas puede ser difícil su despliegue. A lo que hay que añadir que el costo de la prospección geofísica a profundidad es elevado, por lo tanto, en algunos casos, se limita la profundidad a capas con velocidades menores a 400 m/s (Basamento rocoso en Ingeniería) y no al verdadero reflector profundo de las ondas incidentes, que tiene velocidades mayores a 3.000 m/s (Basamento rocoso sísmico). Por otra parte, el costo de realizar perforaciones profundas es elevado y los resultados son válidos para un único sitio.

Esta comunicación presenta la utilización de la relación espectral H/V para determinar los periodos predominantes del suelo en la ciudad de Barcelona (España) y la utilización de arreglos de microtemblores para la determinación de la estructura de velocidades de ondas de corte en la ciudad de Tsukuba (Japón).

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 (Okada, 2003). Durante los últimos años la relación espectral

**IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA**

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.

El análisis de los más de 300 registros obtenidos en 204 sitios de la ciudad de Barcelona permitió diferenciar materiales (Alfaro, 1997; Alfaro *et al.*, 2001) y obtener un mapa de períodos predominantes del suelo.

Dentro de las varias técnicas para determinar la V_s , probablemente la menos costosa es utilizando la componente vertical de los microtemblores mediante un arreglo de sismógrafos. Mediante la utilización de diferentes 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. Aunque recientemente se ha incrementado el uso de los métodos heurísticos para invertir las velocidades de fase en la exploración con microtemblores.

En esta comunicación se presentan los resultados de 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 (Alfaro, 2005a).

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, o seguir la recomendación de Apostolidis *et al.* (2004) de ubicar las estaciones al menos 50 metros alejadas de avenidas o carreteras.

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

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 apertura relativamente pequeña del arreglo (900 m). Esto es importante para estudios de microzonificación en grandes ciudades, donde encontrar espacios libres para colocar arreglos convencionales es difícil y no se pueden utilizar fuentes vibratorias potentes fácilmente.

La obtención de los perfiles de Vs, 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.

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.

De acuerdo con los resultados obtenidos es deseable que se impulse la utilización de microtemblores para estudios de caracterización dinámica de suelos. Se deben realizar esfuerzos importantes para relacionar variables, de tal forma, que con la realización de ensayos relativamente sencillos y de bajo costo se pueda contribuir a la elaboración de mapas de microzonificación.

AGRADECIMIENTOS

Los arreglos se realizaron siendo el autor becario de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) en el *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering* IISEE, 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

**IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA**

to Bessel function and determine the dispersion curve) y *disp_sma1* (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). Las mediciones de microtemblores en Barcelona fueron realizadas siendo el autor becario de la Agencia Española de Cooperación Internacional.

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. y P. Richards (1980). Quantitative Seismology. Theory and Methods, Freeman and Company. San Francisco. 932 pp.
- Alfaro, A. (1997). Estimación de Períodos Predominantes de los Suelos de Barcelona a partir de Microtremors. M. Sc. Thesis, Technical University of Catalonia, Barcelona. España. Informe ICC No. GS091-97.
- Alfaro, A. (2005a) Estimation of S-wave velocity structure 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. En imprenta.*
- 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. y T. Yokoi (2005) Determinación de la Estructura de Velocidades de Ondas de Corte Mediante Arreglos de Microtemblores de Largo Periodo. XIII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana y VI Foro Sobre la Geotécnica de la Sabana de Bogotá. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá.
- Alfaro A., J. J. Egozcue y A. Ugalde (1999a). Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemblores. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Sísmica. España. *Proc. Primer Cong. Nacional Ing. Sísmica*. Murcia. España. 2:435-441.
- Alfaro A., M. Navarro, J. Sánchez y L.G. Pujades (1999b). Microzonificación Sísmica de Barcelona utilizando el Método de Nakamura. Ventajas y Limitaciones. *Proc. Primer Cong. Nacional Ing. Sísmica*. Murcia. España. 1:273-278.
- Alfaro A., J. Junco, A. Franco G. y A. Torres (2000) Reducción Del Riesgo Sísmico de Ciudades Intermedias en Colombia. Retos y Limitaciones Memorias del VIII Congreso Colombiano De Geotecnia. 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. Ptilakis (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

CARACTERIZACION DINAMICA DE SUELOS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MICROTEMBLORES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SISMICA

Andrés José Alfaro Castillo

- 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.
- Candela, L., (1983). Cartografía Geotécnica Automática. Aplicación al Llano de Barcelona. *Tesis Doctoral*, Universidad de Granada, Granada. España.
- 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.*
- 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.
- Herrmann, R.B., 1985. Ed. Computer Programs in Seismology. Saint Louis University.
- Horike, M., B. Zhao and 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.
- Kanai, K. y T. Tanaka, (1961). On microtremors VIII, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 39,97-114.
- Kinometrics, (1995), Installation, Initial Startup and operating Instructions for Altus K2, High Dynamic Range Accelerograph, Rev B , Pasadena , California, USA.
- Kirkpatrick S., C. D. Gelatt and M.P. Vecchi (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*. 1983; 220: 671-680.
- Konno, K. y T. Ohmachi (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 228-241.
- Metropolis N. and A. Rosenbluth (1953). "Equation of state calculations by fast computing machines." *J. Chem.Phys* ; 21: 1087-1092.
- Moreno L. y A. Alfaro (2000) De los Microsismos a los Microtemblores. Memorias del VIII Congreso Colombiano De Geotecnia. Bogotá.
- 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.
- Ventayol A., J. Albaiges, J. Cortal, F. Gallart, C. López, J. López y J. Santaularia, Eds. (1978). *Mapa Geotécnico de Barcelona, Badalona, Esplugues, L'Hospitalet, Sant Adrià, Santa Coloma*. Barcelona.
- Yamanaka, H., M. Dravinski y H. Kagami (1993). Continuous measurements of microtremors on sediments and basement in Los Angeles, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83,1595-1609.
- 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

**IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
FORO INTERNACIONAL SOBRE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA**

dispersion Curve. *Proc. Fall Meeting of Seismological Society of Japan.* S16-08010854.