

*DISEÑO DE METODOLOGÍAS Y
HERRAMIENTAS
PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS
DE SITIO
Y SU APLICACIÓN EN LA EVALUACIÓN
DE ESCENARIOS DE DAÑOS
DEBIDOS A TERREMOTOS*

**Proyecto financiado por el Vicerrectorado de
Investigación de la Universidad de Alicante
(GRJ0512)**

**Grupo: “Análisis y Procesado de Datos en
Física de la Tierra”**

**Sergio Molina Palacios
Juan J. Galiana Merino
Encarna Gimeno Nieves**

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA.....	4
3. OBJETIVOS PROPUESTOS, ACCIONES DESARROLLADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	7
4. PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS.....	21
5. AGRADECIMIENTOS.....	22
6. REFERENCIAS.....	22

1. INTRODUCCIÓN:

En España, como en muchos otros países, los efectos devastadores de terremotos son conocidos principalmente a través de relatos y documentos históricos, debido a su largo periodo de recurrencia. Ejemplos claros de estos eventos son el terremoto de Tabernes de 1396, el de Torrevieja de 1810 y el de Arenas del Rey de 1882, todos ellos cuantificados con una intensidad X en la escala de Richter y que se recuerdan por los numerosos daños tanto materiales como humanos que produjeron.

A la hora de generar escenarios de daños eficientes para la gestión eficaz de los programas de emergencia o de planificación urbana, también es importante conocer que el daño producido por un terremoto no sólo es función de la energía liberada en su foco, sino también de los posibles efectos que el terreno sobre el cual se haya emplazada una determinada ciudad, presa, etc. provoque en la onda sísmica. Este tipo de efectos, que normalmente se manifiestan como amplificaciones del movimiento del suelo, se conocen como efectos de sitio.

El grupo de investigación que solicitó este proyecto presenta en los últimos años una prometedora trayectoria que vincula dos líneas fundamentales en el estudio del riesgo sísmico.

La primera de ellas analiza los aspectos fundamentales de la onda sísmica (una señal variable en el tiempo que encierra toda la energía liberada en el foco y que se va atenuando o amplificando en función de diferentes variables). Este tipo de señales cuyo contenido en frecuencia y energético se empezó a estudiar mediante la transformada de Fourier en sus inicios, presenta ahora un nuevo campo de estudio con la aplicación de la transformada de wavelet y de herramientas geoestadísticas como los procesos ARMA y W-ARMA. El Dr. Juan J Galiana Merino, cuya tesis doctoral estuvo enfocada hacia el uso de la transformada de wavelet en la detección y filtrado de señales sísmicas, ha contribuido al estado del conocimiento con diferentes publicaciones que ponen de manifiesto que esta nueva línea de investigación aportará, sin duda, nuevas aplicaciones para resolver muchos de los problemas relacionados con el conocimiento físico de este tipo de ondas. Estas publicaciones han favorecido el contacto con organismos internacionales como GeoForschungsZentrum (GFZ) en Potsdam (Alemania) y NORSAR (Noruega).

La segunda de ellas utiliza las aplicaciones y el conocimiento proporcionados por la primera para estimar de una manera correcta el movimiento esperado del suelo en un determinado emplazamiento, en términos de aceleración para diferentes frecuencias, y desarrollar así una de las metodologías más recientes para la estimación del riesgo sísmico: el método del espectro de capacidad, que ha sido implementado por FEMA (Federal Emergency Management Agency–USA) en una herramienta llamada HAZUS-MH (capaz de obtener escenarios de daños y pérdidas económicas y humanas en EEUU). El Dr. Sergio Molina Palacios ha dado, recientemente, un paso adelante en la aplicación del método del espectro de capacidad, introduciéndolo dentro de un árbol de decisiones formado por los diferentes parámetros necesarios para la estimación del riesgo sísmico. A cada decisión se le asigna la correspondiente probabilidad, lo que permite cuantificar no sólo el escenario de daños más probable, sino también sus niveles de confianza desde un punto de vista probabilístico. Estos estudios han permitido empezar a establecer vínculos con grupos de investigación europeos (NORSAR e International Center for Geohazards, ambos en Noruega), que en un futuro esperamos plasmar en redes de excelencia y proyectos de investigación europeos.

El objetivo de este proyecto era, por tanto, adquirir la experiencia, conocimientos y contactos con otros equipos de investigación necesarios para el desarrollo de metodologías y diseño de aplicaciones que ayuden a desarrollar las mencionadas líneas de investigación. Esto permitirá

obtener resultados específicos para diferentes entornos y favorecerá la petición conjunta con investigadores de Noruega, Alemania y posiblemente algún otro país europeo, de proyectos nacionales o europeos.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA.

Los objetivos planteados en el siguiente proyecto constituyen actualmente un punto de investigación central dentro de la comunidad sismológica internacional, reflejándose especialmente en las temáticas abordadas, cada vez con un mayor número de trabajos, en las más recientes e importantes reuniones científicas del pasado año 2006: First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (Ginebra, Suiza); V Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica (Sevilla, España).

Una de las lecciones más importantes aprendidas de los terremotos catastróficos en las últimas décadas es que los daños que se producen en un emplazamiento están determinados por la influencia de la geología superficial en dicha zona, es decir, los efectos locales o de sitio. La evaluación, por tanto, de estos efectos (conocida como microzonación sísmica), es uno de los puntos clave que constituye la base para la mitigación y prevención de los desastres sísmicos. Para cuantificar este tipo de efectos es necesario determinar perfiles de velocidad de las ondas S (V_s) en una, dos y tres dimensiones hasta alcanzar el basamento rocoso. Sin embargo este tipo de perfiles son muy caros y consumen demasiado tiempo ya que para estimar un perfil V_s multidimensional de los sedimentos basándose en métodos geofísicos o geotécnicos son necesarios numerosos sondeos y, a menudo, son imposibles de realizar en entornos urbanos. El presente proyecto pretende desarrollar una metodología mucho más práctica y económica como es la basada en la medida de ruido ambiente, que puede desarrollarse fácilmente sobre la superficie del suelo.

Un gran número de estudios recientes han mostrado que el análisis frecuencia-número de onda (F-k) (Capon, 1969) y los análisis de autocorrelación espacial (SPAC) (Aki, 1957) de los registros verticales de ruido ambiente medidos con arrays de sensores, pueden proporcionar las características de dispersión de las ondas Rayleigh. El análisis F-k transversal (Ej. Tokimatsu, 1997) para componentes horizontales de ruido puede también ser válido para estimar la curva de dispersión de las ondas Love, cuando las componentes horizontal y vertical del ruido ambiente se propagan desde la misma dirección. Además, numerosos trabajos (Ej., Horike, 1985; Matsushima and Okada, 1990; Tokimatsu et al., 1992b) han revelado que los análisis de inversión de los datos de dispersión de registros de movimiento procedente de ruido ambiente proporcionan con éxito el perfil V_s de un depósito de sedimentos. Estos estudios de array indican que el ruido ambiente consiste de ondas superficiales (Rayleigh y Love) y que el uso de arrays de sensores para registrar ruido ambiente es una herramienta efectiva para evaluar la estructura de velocidades V_s en un emplazamiento de sedimentos (Ej. Horike, 1993; Tokimatsu, 1997). Al mismo tiempo (Louie, 2001, Mucciarelli et al. 2003, entre otros) han mostrado la viabilidad del uso de equipos de refracción sísmica en entornos urbanos para registrar ruido ambiente (NASW), procesarlo en el dominio p-F y obtener así las curvas de dispersión de las ondas superficiales y, tras su inversión, estimar el perfil de velocidades V_s con la profundidad.

Los estudios de Nakamura (1989) indican que la razón espectral horizontal-vertical (HVSr) de ruido ambiente registrado en un emplazamiento con sólo un sensor de tres componentes, permite estimar información fiable sobre la frecuencia de resonancia y puede dar una aproximación del factor de amplificación del emplazamiento para las ondas S incidiendo verticalmente. Esto sugiere que el espectro H/V de ruido ambiente puede reflejar el perfil V_s en el emplazamiento. Así,

basándose en observaciones de array, Tokimatsu y Miyadera (1992) revelaron que las variaciones de las razones H/V de ruido ambiente con la frecuencia corresponden a aquellas del modo fundamental de las ondas Rayleigh para el perfil Vs en el emplazamiento. Usando estas características, varios estudios han mostrado que la variación de espesor de las capas de sedimentos profundos se puede estimar conociendo los valores de Vs en las correspondientes capas, y haciendo que las frecuencias pico y valle del espectro H/V del modo fundamental de las ondas Rayleigh se ajusten con las correspondientes al ruido ambiente observado en el emplazamiento (Ej. Yamanaka et al. 1994). Sin embargo, las razones H/V de ruido ambiente no siempre son consistentes con aquellas del modo fundamental de las ondas Rayleigh, probablemente por la presencia de otras ondas superficiales en el ruido ambiente, es decir, modos superiores de las ondas Rayleigh y Love (Ej. Tokimatsu et al. 1992a ; Lachet and Bard, 1994). Esto justifica que uno de los objetivos del presente proyecto sea ahondar en la naturaleza de ruido sísmico y su campo de ondas. Basándose en la teoría propuesta por Harkrider (1964) para ondas superficiales (tanto Rayleigh como Love) propagándose en un semi-espacio estratificado, Arai y Tokimatsu (2000) presentaron fórmulas teóricas para simular el espectro H/V de ruido ambiente que consideraban los efectos tanto del modo fundamental como de posibles modos superiores, indicando además que el espectro teórico H/V obtenido a partir del perfil Vs de un emplazamiento puede ajustarse bastante bien al espectro H/V de ruido ambiente observado en el emplazamiento y viceversa. Por tanto, la estructura de velocidad Vs puede estimarse a partir de la inversión del espectro H/V de ruido ambiente en el emplazamiento (Arai y Tokimatsu, 2004).

Por otra parte, muchos otros autores han contribuido al estudio de los efectos de sitio usando diferentes metodologías, (Ej. Aki, 1993; Bard, 1995; Chavez-García et al., 1990; Kudo, 1995; Coutel and Mora, 1998; Bard 1999; Mayer Rosa and Jiménez, 2000, Parolai et al., 2000, Parolai et al., 2002; Parolai and Bindi, 2004; Parolai and Richwalski, 2004). La mayoría son métodos empíricos basados en el cociente espectral de la señal registrada, o parte de ella (Ej. Una fase determinada), en un terreno sedimentario respecto a un registro de referencia en roca (Ej. Borchardt, 1970). Cuando el registro de referencia no está próximo al sitio de estudio pueden ser importantes los efectos direccionales de la fuente. La influencia de la fuente en el cociente espectral no desaparece a menos que se utilicen fases individuales (Ej. Romanelli and Vaccari, 1999). Alternativamente se han propuesto métodos que no dependen de un sitio de referencia (Ej. Boatwright et al., 1991), destacando aquellos basados en el cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical del movimiento del terreno, aplicado originalmente por Langston (1979) para estudios de la corteza y del manto superior y popularizado por Nakamura (1989) utilizando registros de ruido ambiental. Aunque las características espectrales y de polarización de los registros de ruido ambiental presentan una buena correlación con la geología local (Ej. Lermo and Chavez-García, 1994), no existe todavía un consenso entre los especialistas respecto a su justificación teórica (Ej. Lachet and Bard, 1994; Nakamura, 2000; Fäh et al., 2001) y sus límites de aplicabilidad (Ej. Lachet and Bard, 1994; Dravinski et al., 1996; Bonilla et al., 1997 ; Jiménez et al. 2000).

Sin embargo, recientemente un proyecto europeo (SESAME, 2001-2004) ha llevado a cabo una profusa investigación sobre el uso de ruido ambiente en la evaluación de los efectos de sitio. Este proyecto se ha centrado principalmente en la aplicación de técnicas empíricas de bajo coste, usando ruido ambiente para estimar los efectos de sitio en áreas urbanas principalmente. El objetivo primario era consensuar los diferentes puntos de vista por medio de la proposición de una base teórica, un método y unas normas de aplicación y un protocolo común para la interpretación de resultados en relación a la técnica denominada de Nakamura y al uso de técnicas de array para obtención de curvas de dispersión de ondas superficiales y a partir de ahí el perfil de velocidad Vs.

Una vez que se ha definido el movimiento del suelo teniendo en cuenta los posibles efectos de sitio, es necesario definir la vulnerabilidad de las edificaciones en la zona para llevar a cabo una correcta definición de los escenarios de daños.

El riesgo sísmico se define normalmente como la probabilidad de que se produzca un determinado grado de daño (estructural, económico, humano, etc.) para un determinado valor del movimiento del suelo, y esta probabilidad combina dos componentes: la probabilidad de que el movimiento del suelo supere un determinado valor (peligrosidad) con la vulnerabilidad de una estructura o grupo de estructuras, cada una con su correspondiente incertidumbre.

El procedimiento común en ingeniería sísmica cuando se desea analizar una estructura es el método determinístico (Sandi, 1982), el cual calcula el comportamiento esperado de los edificios basándose en cálculos ingenieriles y especificaciones de diseño (Ej. Singhal and Kiremidjian, 1997; Mosalem et al., 1997; Geomatrix, 1999; FEMA, 2004). Sin embargo, para grupos de edificios que muestran características similares desde el punto de vista ingenieril, se observa una variabilidad inherente en su respuesta ante un terremoto que sólo se puede tener en cuenta a través de un método probabilístico (Ej. Coburn and Spence, 2002). En dichos casos es esencial poder definir intervalos de confianza lo más reales posibles para los niveles de daño predichos, intervalos que en la mayoría de los casos se establecen a través de observaciones de campo tras terremotos reales.

Los métodos probabilísticos están basados en estadísticas de daños producidos por terremotos acaecidos (Ej. el desastre ocurrido en la ciudad de México, que proporcionó una gran experiencia en escenarios de daños y que fue usada para estudios posteriores. El formato de una curva de vulnerabilidad se da como una matriz de probabilidad de daños empírica, la cual asigna para diferentes grados de intensidad, una probabilidad de que una edificación clasificada dentro de un determinado grupo sufra un grado de daño dado. Otras aproximaciones probabilísticas-empíricas está descritas por Braga et al. (1982), ATC-13 (1985), Spence (1990), Spence et al. (1991), Spence et al. (1992), Orsini (1999), Yamazaki and Murao (2000), Zonno et al. (2001) and Coburn and Spence (2002).

Los inicios de las evaluaciones de vulnerabilidad de tipo ingenieril se remontan al ATC-13 (1985), que fue desarrollado para proporcionar opiniones de expertos y evaluaciones de pérdidas para California. Este fue seguido por el ATC-40 (1996) en el cual se sentaron las bases para los análisis de comportamiento sísmico de estructuras. Algunas contribuciones a este desarrollo fueron llevadas a cabo por Onose (1982), Singhal and Kiremidjian (1997) and Mosalem et al. (1997).

Como parte de los avances en estimación del riesgo sísmico en los Estados Unidos de América la agencia federal de emergencias (FEMA) ha desarrollado un software de simulación de escenarios denominado HAZUS-MH. Este software está integrado en el entorno ArcGIS de ESRI, permitiendo a cualquier comunidad de los EEUU simular para un determinado terremoto escenarios de riesgo sísmico de una forma simple. El punto débil de este software reside en que su integración con las bases de datos, tipologías constructivas y características propias de ese país lo hacen prácticamente imposible de aplicar a otros países. Molina and Lindholm (2005) han conseguido sin embargo extraer la metodología y aplicarla a la ciudad de Oslo, incorporando además un análisis de las incertidumbres.

En los últimos años, el proyecto europeo RISK-UE (2001-2004) ha diseñado una metodología general y modular para crear escenarios de riesgo sísmico enfocado principalmente a los edificios históricos. Los escenarios proporcionan cifras de daños directos e indirectos debidos a terremotos y también introducen en el cálculo de los daños, parámetros cuantitativos como la aceleración y el desplazamiento espectral, en lugar de parámetros cualitativos como la intensidad.

Las nuevas tendencias dentro de la estimación del riesgo sísmico prefieren el uso de métodos híbridos como el propuesto en RISK-UE. Por ejemplo, Wen and Hu (2000) usan curvas de capacidad espectrales para estimar la respuesta máxima de un edificio y tras establecer curvas de fragilidad, estiman el daño en edificios de China. Ordaz et al. (2000) usan un modelo simplificado que relaciona el espectro de aceleraciones y las características estructurales generales para obtener el desplazamiento entre plantas y usando funciones de vulnerabilidad basadas en el desplazamiento, calcular el daño. Mucciarelli et al. (2001) usan mediciones de ruido sísmico para estimar el desplazamiento entre plantas, mientras que Pinho et al. (2002) introduce una simplificación al procedimiento HAZUS teniendo en cuenta la relación entre los diferentes grados de daño definidos en los estudios de estimación de pérdidas. Entre otros recientes estudios se halla una relación periodo-altura para edificios de hormigón armado en Europa desarrollada por Crowley and Pinho (2004) y usada por Crowley et al. (2004) para una estimación de riesgo sísmico con expresión de incertidumbres.

3. OBJETIVOS PROPUESTOS, ACCIONES DESARROLLADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Diseño de metodologías y herramientas de procesamiento de señal para registro y análisis de ruido sísmico con diferentes equipos y en diferentes emplazamientos.

El interés de este objetivo se haya en el establecimiento de unos cimientos sólidos que permitirán no sólo el desarrollo de una metodología óptima, sencilla y barata para estimar los efectos de sitio en cualquier entorno urbano, sino también en el propio conocimiento de la naturaleza del ruido sísmico: su contenido energético, el campo de ondas que lo forman etc. Los resultados de este tipo de estudios servirán como un primer paso en los planes de desarrollo urbanístico y como una información fundamental para el objetivo segundo.

En este sentido se plantearon las siguientes acciones:

- a) *Estancias de Juan J. Galiana Merino en NORSAR para aplicación y validación de nuevas metodologías para la estimación de efectos de sitio durante Mayo-Junio de 2006 y Julio de 2006.*

Como mencionamos anteriormente la estimación de efectos de sitio en una determinada área es de vital importancia tanto a la hora de llevar a cabo una planificación del desarrollo urbanístico como para analizar la situación de terrenos ya edificados. Con dicha información será posible reproducir escenarios de movimiento del suelo ante la ocurrencia de un determinado terremoto.

En este sentido existen numerosos métodos de carácter invasivo y de alto coste como son los sondeos geotécnicos. En nuestro caso hemos seleccionado diferentes áreas donde aplicar técnicas basadas en el registro de ruido ambiente con el mismo objetivo. Estas técnicas, además de ser relativamente rápidas y baratas, son no invasivas lo cual repercute en que puedan ser aplicadas en áreas ya urbanizadas sin necesidad de llevar a cabo ningún tipo de daño en dichas zonas.

De esta forma, el grupo investigador viajó a Noruega para llevar a cabo un estudio piloto para obtener la curva de dispersión y los perfiles de velocidad analizando los datos procedentes de un array emplazado en Sogn Kolonihage en Oslo (Noruega).

Puesto que las técnicas de array dependen principalmente de la precisión en el tiempo (sincronización de los datos). Incluso cuando se utilizan relojes GPS, el uso de estaciones independientes representa un posible obstáculo al análisis convencional de datos de array, ya que tratar de sincronizar temporalmente todos los datos, cableando los registradores de todas las estaciones hacia un registrador central, como suele hacerse en los análisis convencionales, presenta un obstáculo insalvable cuando se trata de registrar en una ciudad, donde las barreras urbanas imponen restricciones a la longitud y paso de los cables. En nuestro caso hemos observado que el uso de estaciones individuales, con registros propios, no suponen un problema de sincronización de tiempo, de forma que se diseñaron dos geometrías de arrays diferentes con 9 estaciones independientes cuyos datos se registraban y se temporalizaban utilizando GPS independientes (Figuras 1 y 2).

Los anteriores datos (Figura 3) se han analizado usando el software GEOPSY (Wathelet, 2005), utilizando la técnica de las razones espectrales H/V y la técnica de Nakamura para cada estación individual. A partir de ahí, se determinó un perfil de velocidad de cizalla en el subsuelo utilizando un análisis integrado de los resultados de los dos arrays. Se observó que existía concordancia entre los resultados obtenidos por ambas técnicas, de forma que se propuso el modelo de velocidad correspondiente.

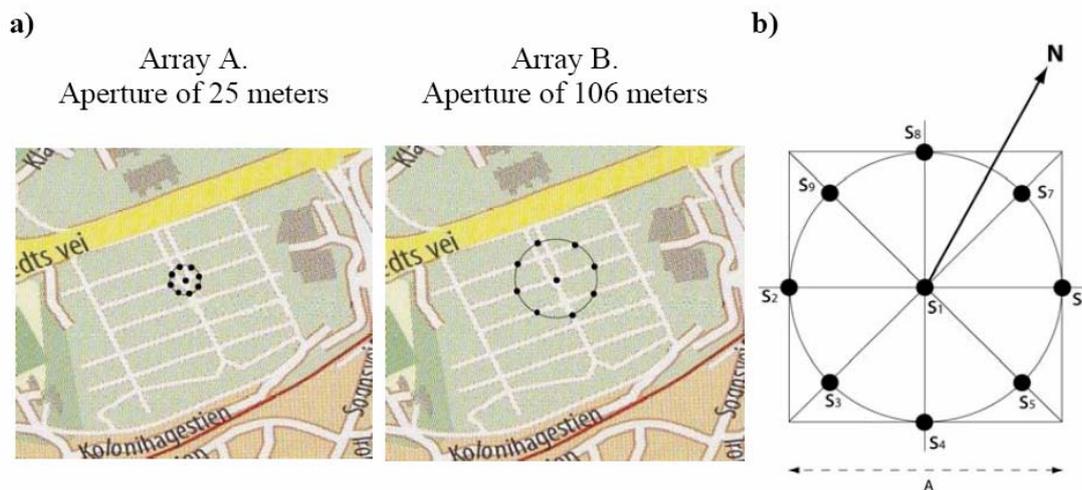


Figura 1. Configuración de los arrays. **a)** Localización de las 9 estaciones para los arrays A y B. **b)** Geometría de los arrays respecto a la componente Norte.

Para el área seleccionada, los resultados obtenidos indican una primera capa de espesor de unos 15.60 m y una velocidad $V_s = 171.49$ m/s; y una segunda capa con una velocidad $V_s = 955.13$ m/s. Además estos valores están asociados a una frecuencia de resonancia de 2.748 Hz, que se haya en concordancia con el valor inicial obtenido a partir del análisis H/V (Tabla 1).

Los resultados de primer orden se pueden resumir a continuación como sigue:

- La consistencia de los resultados indican que tanto la posición del sensor como el origen de tiempo (obtenidos en cada registrador y con relojes GPS independientes) permiten obtener registros con la suficiente precisión.
- La integración de las dos geometrías de array (dos aperturas diferentes) fue necesaria para obtener resultados estables sobre una banda de frecuencias amplia. Sólo si se lleva a cabo dicha integración es posible definir un modelo de dispersión suficientemente preciso.

- En el área analizada (con profundidades de sedimentos < 20 metros), a pesar de la elevada frecuencia de los sensores (4.5 Hz) se pudo resolver de forma adecuada la estructura de velocidad y la frecuencia de resonancia, sin embargo, este tipo de sensores no puede proporcionar resultados tan fiables como aquellos sensores de menor frecuencia (1 Hz) que se consideran más adecuados, para lugares con una mayor profundidad de sedimentos, como ocurre en el sur de nuestra provincia.
- Los resultados obtenidos son similares al conocimiento preexistente de los sedimentos de la zona de estudio, lo que valida el método aplicado (Figura 4; Tabla 2).
- La inversión de las curvas de dispersión para obtener los modelos de velocidad representan un problema de solución múltiple, por lo que es necesario definir un modelo de partida razonable para la zona de estudio (Figura 5).
- Para repetir este estudio en otras áreas se hace necesario mantener al menos 9 estaciones independientes con precisión en el registro de su localización y del origen temporal de los registros.

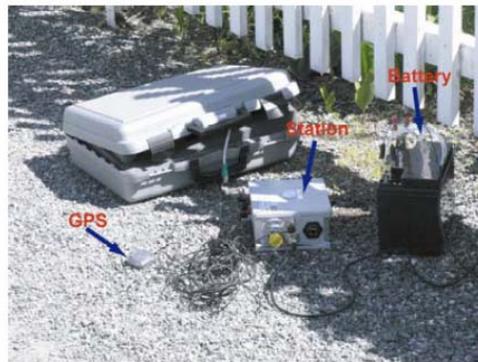


Figura 2. Equipamiento básico para la medición (Sensor y Registrador, Batería y GPS)

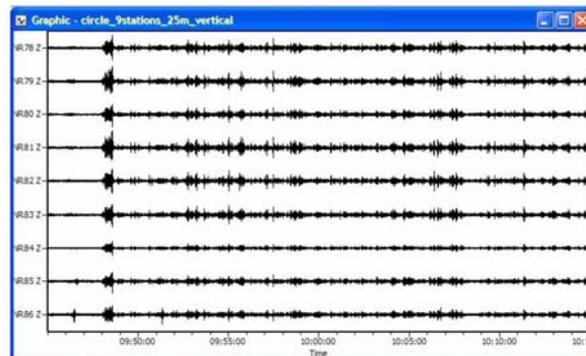


Figura 3. Ejemplo de señal registrada por una de los arrays.

Tabla 1. Frecuencias de resonancia del terreno obtenidas en cada una de las estaciones de los arrays usando la técnica H/V.

Station	Resonance Frequency (Hz)	
	Array A	Array B
s1 (n° 78)	2.820	2.882
s2 (n° 82)	2.799	2.739
s3 (n° 83)	2.799	3.118
s4 (n° 80)	2.840	3.287
s5 (n° 84)	2.799	2.455
s6 (n° 85)	2.799	2.840
s7 (n° 86)	2.779	2.903
s8 (n° 79)	Not clear peak	2.882
s9 (n° 81)	2.719	2.699
Median value	2.799	2.882
STD	0.035	0.239

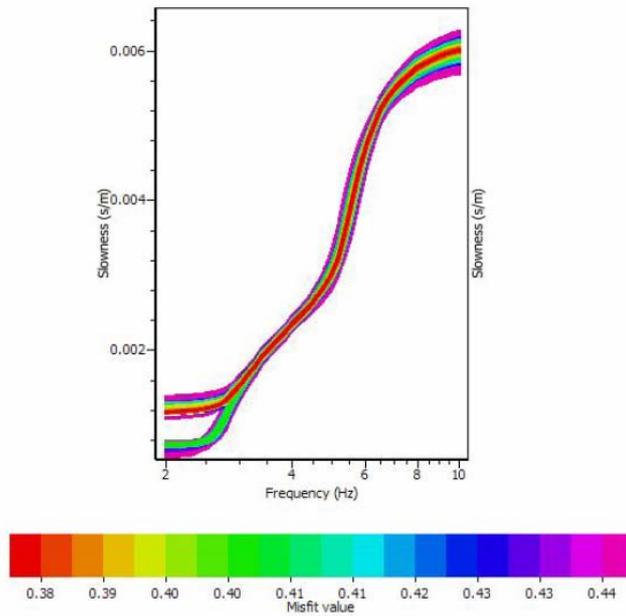


Figura 4. Curva de dispersión para un desajuste menor de 0.5

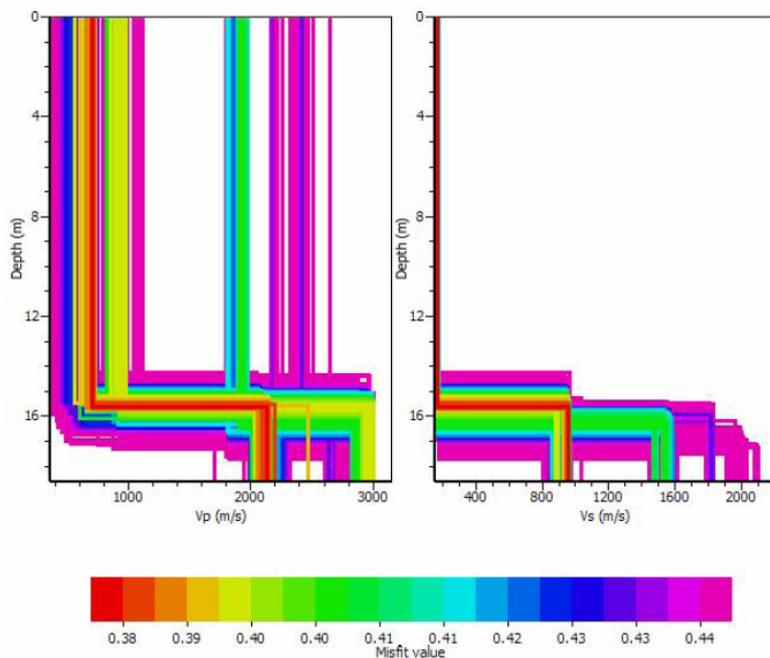


Figura 5. Perfiles de profundidad de sedimentos obtenidos con un desajuste menor de 0.5

Tabla 2. Modelo de capas y velocidades obtenido.

	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Depth (m)
Layer 1	710.77	171.49	15.60
Layer 2	2136.72	955.13	-----

Por otra parte se llevó a cabo una campaña de registros de ruido sísmico en la ciudad de Oslo utilizando estaciones individuales con sensores de 5s para compararla con estudios posteriores que se llevaron a cabo con sensores de 4.5 Hz y así poder comparar los resultados. La principal conclusión es que los sensores de 4.5 Hz no son los más adecuados para llevar a cabo estudios en los que se aplica la técnica H/V si se desean resultados con gran precisión, en zonas con considerable profundidad de los sedimentos.

El mapa de frecuencias predominantes obtenido para el nuevo estudio se observa en la Figura 6.

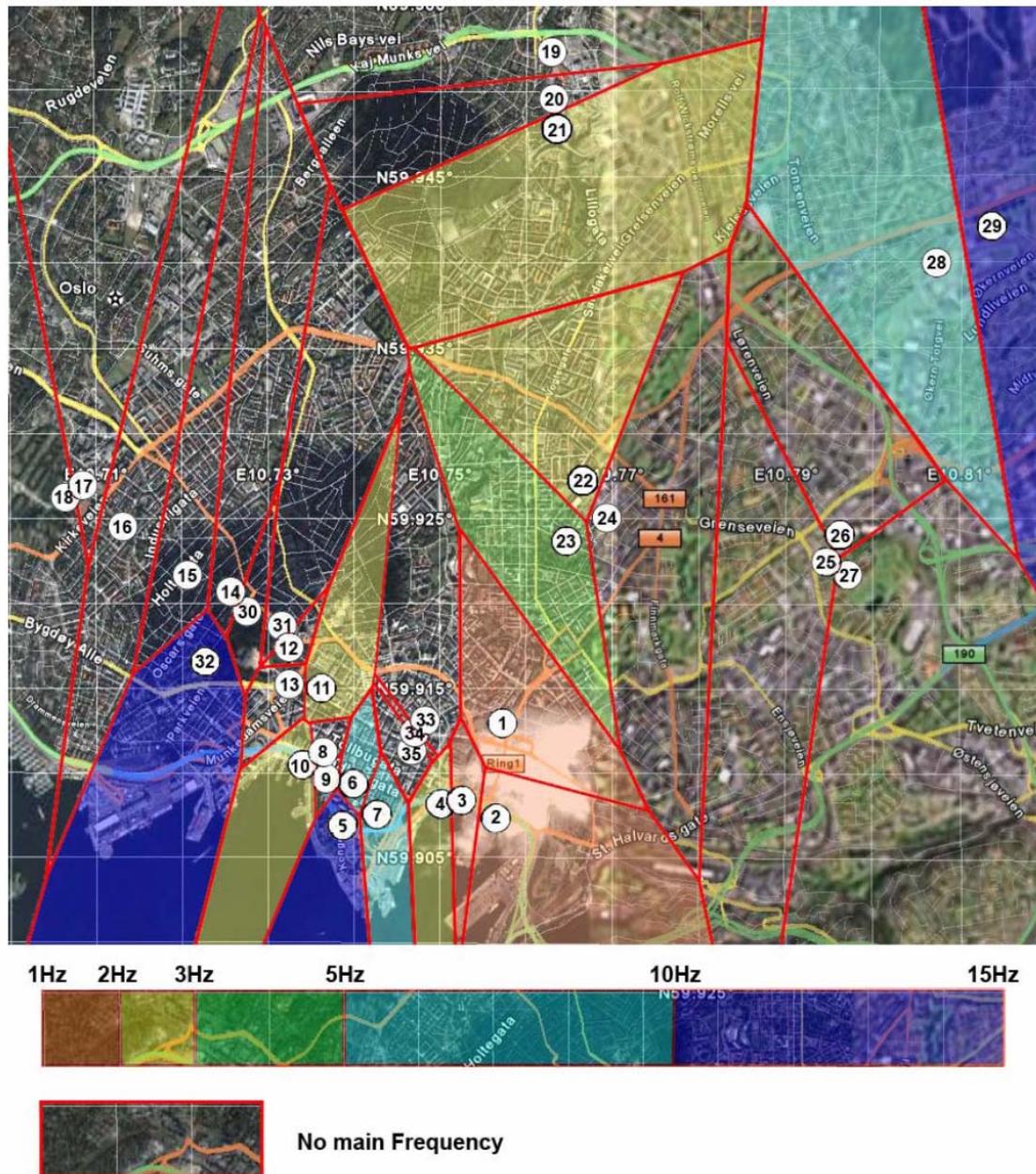


Figura 6. Mapa de frecuencias de resonancia en la ciudad de Oslo.

b) Estancia de Juan J. Galiana Merino en GFZ-Postdam para desarrollo de metodologías para el análisis de señal aplicado a los efectos de sitio (Diciembre 2006).

Los registros sísmicos de múltiples componentes proporcionan una gran cantidad de información para la caracterización de la superficie, particularmente para la estimación de los estados de polarización de las llegadas sísmicas. En general, el procesado de estos datos es computacionalmente costoso y requiere sofisticadas técnicas para poder inferir las propiedades físicas y la estructura del subsuelo. Uno de los puntos de interés que se pueden abordar cuando se tienen datos de múltiples componentes es la separación de eventos sísmicos de diferentes características de polarización. De ese modo, por ejemplo, sería de gran interés distinguir entre ondas de volumen (ondas P y S), que son ondas linealmente polarizadas, y ondas Rayleigh, que son ondas polarizadas elípticamente.

Dada una señal de tres componentes, con $S_x(t)$, $S_y(t)$ y $S_z(t)$ representando los sismogramas registrados en tres direcciones ortogonales, cualquier combinación de dos componentes ortogonales puede ser seleccionada para realizar el análisis de polarización. Dentro del contexto de la caracterización de ondas Rayleigh, se podría seleccionar una combinación de la componente vertical, $S_z(t)$, con una de las componentes horizontales ($S_x(t)$ o $S_y(t)$).

Las ondas Rayleigh son ondas dispersivas en medios heterogéneos y por tanto sus atributos de polarización son dependientes de la frecuencia y de los distintos modos (Shieh and Herrmann, 1990).

En el contexto de evaluación de la peligrosidad sísmica utilizando ruido ambiente, la caracterización de esta dependencia frecuencial es de gran interés práctico. Particularmente, en conexión con las medidas de dispersión, la dependencia frecuencial de la polarización de las ondas Rayleigh en registros de ruidos ambiente puede ser utilizado para predecir las vibraciones de la correspondiente estructura del subsuelo (Scherbaum et al., 2003; Ohrnberger et al., 2003).

Por otro lado, en sismología de observatorio, las ondas Rayleigh son consideradas como ruido coherente que deben ser filtradas con el fin de resaltar las ondas de reflexión de interés.

René et al. (1986) propuso un método para el análisis sísmico de múltiples componentes basado en el análisis de trazos complejos ('complex-trace analysis', CTA). Este método posibilita el cálculo de los atributos de polarización instantáneos que pueden ser utilizados para el diseño de filtros que permitan la separación en diferentes campos de onda. Sin embargo, dado que el método CTA trabaja sólo en el dominio del tiempo, los atributos de polarización calculados representan sólo un valor promedio sobre todas las frecuencias y por tanto no proporciona información sobre su dependencia frecuencial.

En las situaciones donde los diferentes tipos de onda no interfieren en el tiempo, el método CTA proporciona buenos resultados. Sin embargo, en sísmica de observatorio, tales situaciones son muy raras, ya que las llegadas de las ondas Rayleigh son de gran amplitud y ocultan las llegadas debidas a las reflexiones. En esta situación resulta muy difícil eliminar las ondas de Rayleigh sin eliminar o distorsionar al mismo tiempo los diferentes modos de reflexión.

Diallo et al. (2006) han propuesto un método basado en la transformada continua de wavelet para solucionar las limitaciones inherentes a la resolución tiempo-frecuencia. En este caso, en lugar de eliminar las ondas Rayleigh poniendo a cero los coeficientes de wavelet correspondientes a la energía de las ondas Rayleigh (Shieh and Herrmann, 1990; Deighan and Watss, 1997) o mediante una umbralización dependiente del nivel (Abdu-Jauwad and Khene, 2000), se propone un modelo matemático para caracterizar las señales polarizadas elípticamente en el dominio de las wavelets. A partir de ahí, recalculan los atributos de polarización definidos por René et al. (1986) en el dominio tiempo-frecuencia.

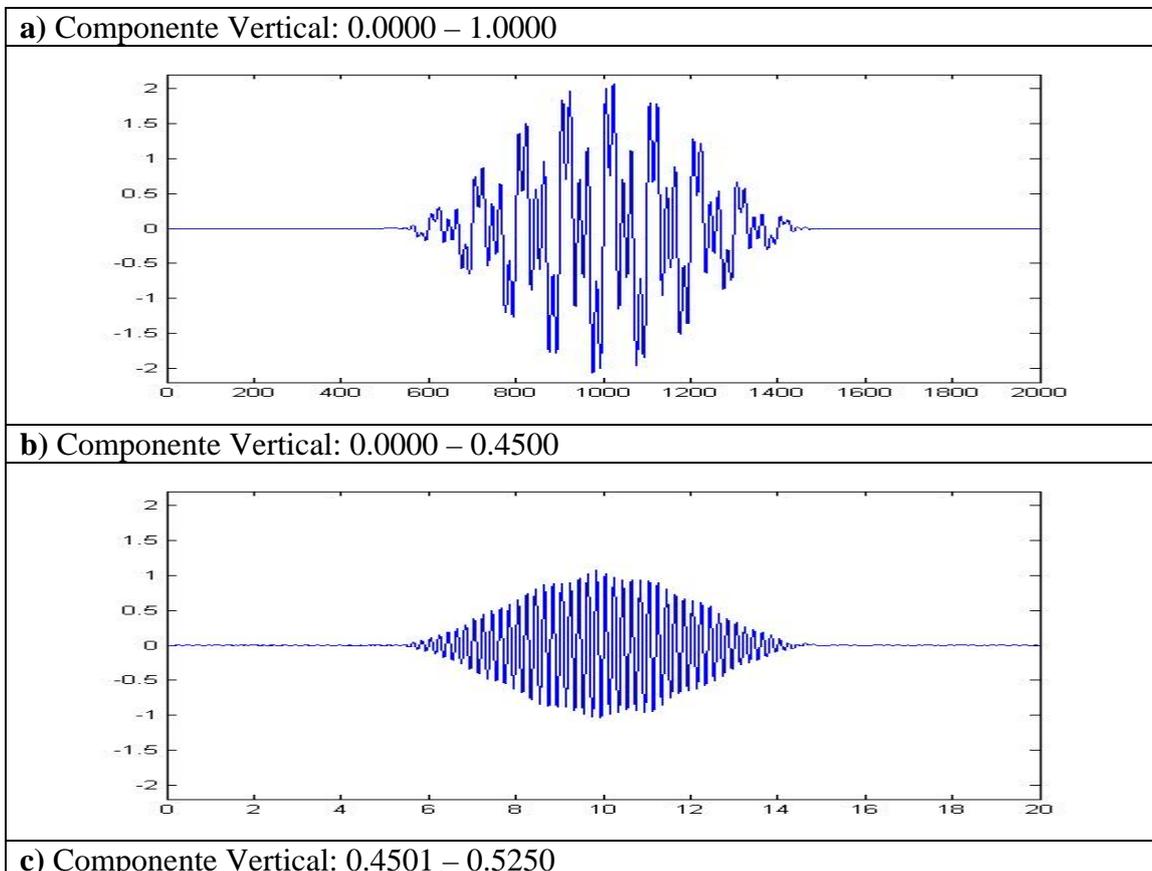
No obstante, el análisis mediante la transformada continua de wavelet no presenta una función inversa completa, realizable en el dominio discreto en que se tienen las señales a tratar, y por tanto, sólo es posible realizar esta inversión mediante aproximaciones.

De esta forma el grupo investigador llevó a cabo una estancia en el centro GFZ durante la cual se implementó mediante Matlab este método de análisis de polarización, observando las carencias que puede llegar a tener a la hora de diseñar filtros específicos, basados en las propiedades de polarización, que permitan la separación en diferentes tipos de ondas.

A partir de aquí, se diseñó un nuevo algoritmo basado en la transformada de wavelet packet y se redefinieron los atributos de polarización definidos por René et al. (1986) en este nuevo dominio de análisis tiempo-frecuencia. Este nuevo método que se ha desarrollado permite descomponer un sismograma en diferentes tipos de ondas, atendiendo al tipo de polarización de éstas y a sus características tiempo-frecuencia. Además, en este caso, los coeficientes de wavelet packets son invertibles y por tanto, la separación en las diferentes ondas se realiza sin ningún tipo de aproximación. Esto permite también diseñar fácilmente filtros de polarización que nos eliminen ciertos tipos de ondas y nos resalten el resto.

El nuevo método desarrollado se testeó sobre señales sintéticas, las cuales estaban formadas por un conjunto de ondas más sencillas de diferente polarización. Las pruebas realizadas mostraron como de manera sencilla, el método propuesto permite separar y obtener los diferentes tipos de ondas de forma independiente (Figura 7). A partir de ahí, se comenzó a aplicar el método sobre señales reales, permitiendo separar en estos casos las ondas polarizadas linealmente de las polarizadas elípticamente (correspondientes a las ondas Rayleigh, de gran interés para el estudio de los efectos de sitio mediante el análisis de ruido ambiente).

El método propuesto y las conclusiones obtenidas en base a sus resultados, puede dar lugar a una futura publicación en una revista internacional.



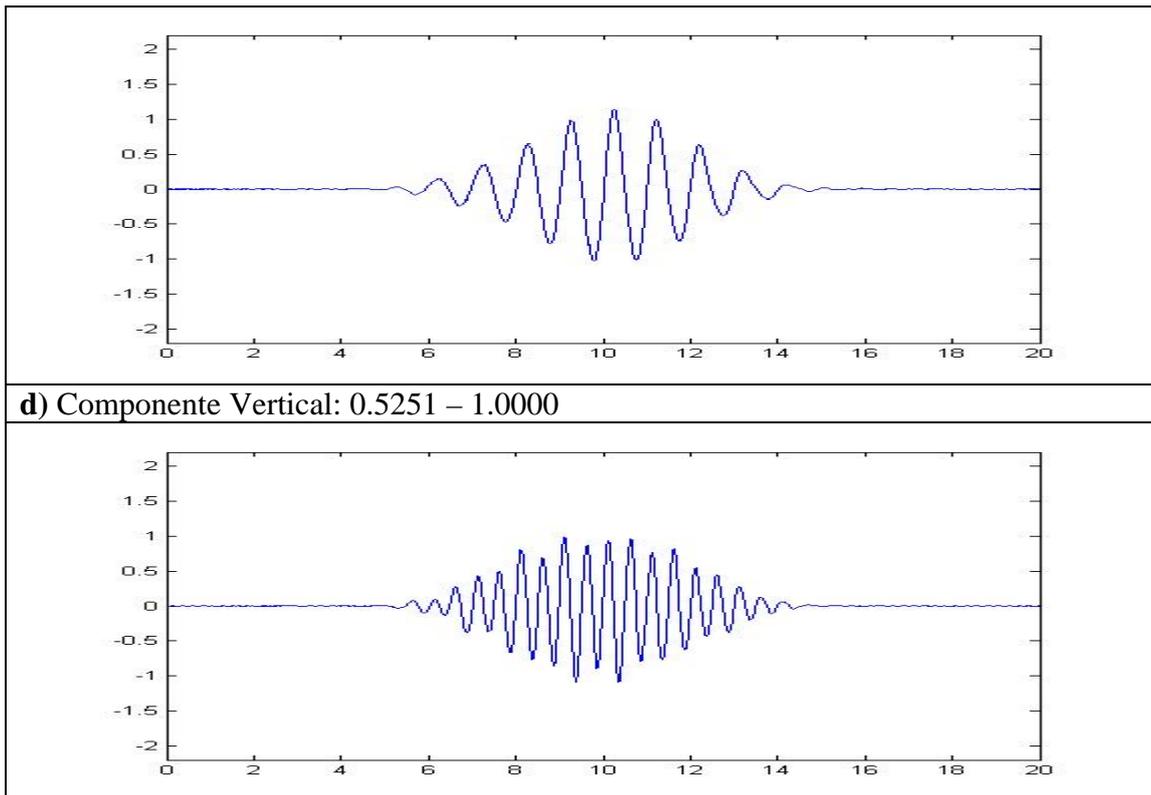


Figura 7. Señal sintética (a) y las diferentes componentes de la misma (b, c, d) obtenidas mediante la aplicación del método propuesto basado en la transformada de wavelet packet.

Dentro de la memoria económica reflejada en el apartado 7 de este informe, esta actuación corresponde con el aporte económico al proyecto: TR 18/12/2006 y la propuesta de Gasto: 3569

c) Adquisición de un sensor de 1Hz para su uso en estimación de efectos de sitio y análisis de estructuras.

En función de los resultados obtenidos anteriormente y teniendo en cuenta el futuro desarrollo y aplicación de esta línea de investigación por el grupo de investigación se ha comprado un sensor de velocidad de 1 Hz (1s) que será usado para llevar a cabo este tipo de estudios en futuros proyectos de investigación.

3.2 Diseño de metodología y herramientas para la obtención de funciones de vulnerabilidad de edificios (curvas de capacidad y curvas de fragilidad) y vínculos de unión con los actuales métodos aplicados en Europa para el riesgo sísmico y que están basado en la escala EMS-98.

El interés del segundo objetivo se haya en que si conocemos una estimación realista del movimiento del suelo, también es necesario calibrar de forma adecuada aquellas funciones de vulnerabilidad que predigan el comportamiento del edificio. Es necesario ahondar por tanto en la correcta definición de estas funciones, sus límites de confianza, su aplicabilidad en aquellos países en los que el movimiento del suelo se dé en términos no ingenieriles como, por ejemplo, la Escala de Intensidad sísmica EMS-98. Por otro lado la definición de funciones de vulnerabilidad debe calibrarse con datos empíricos de daños producidos por terremotos, para establecer sus correctos intervalos de confianza

a) *Estancia de Sergio Molina Palacios en NOR SAR y en ROSE School para desarrollo de métodos para la estimación de la vulnerabilidad sísmica y riesgo sísmico.*

El grupo de investigación se benefició de los contactos que posee con grupos europeos para que el investigador principal llevara a cabo una estancia de investigación compartida en NOR SAR (Noruega) y en la Rose School de Pavia (Italia) para desarrollar métodos de obtención de funciones de vulnerabilidad y una aplicación para la estimación de los daños sísmico utilizando el método del espectro de capacidad denominada SELENA.

El procedimiento para la estimación de la vulnerabilidad utiliza fórmulas derivadas mecánicamente para describir la capacidad de desplazamiento de las edificaciones para tres estados límite diferentes. Estas ecuaciones se dan en términos de las propiedades geométricas y de los materiales, incluyendo la altura media de los edificios en cada clase. Tras sustituir esta altura usando una fórmula que relaciona la altura con el periodo correspondiente al estado límite, se pueden establecer funciones de capacidad del desplazamiento en términos del periodo. La principal ventaja es que de esta forma se puede establecer una comparación directa para cualquier periodo entre la capacidad de desplazamiento de una edificación y la demanda en desplazamiento predicha a partir de un espectro de respuesta.

La variabilidad aleatoria en la demanda se representa utilizando la suposición, ampliamente aceptada, de que los residuos siguen una distribución log-normal mientras que FORM se utiliza para representar la incertidumbre asociada a la capacidad del desplazamiento.

La aplicación desarrollada para el cálculo de funciones de fragilidad o vulnerabilidad de los edificios fue aplicada a una edificación clásica en la ciudad de Oslo, para los tres estados límite de daño, con los resultados mostrados en la Figura 8.

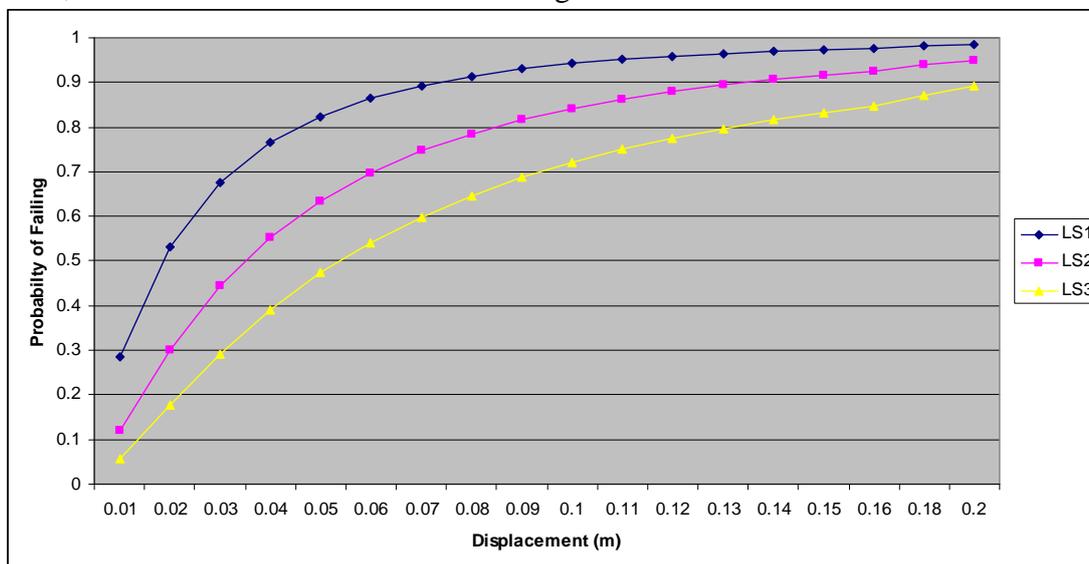


Figura 8. Curvas de fragilidad para los tres estados límite de daños (LS1, LS2 y LS3) correspondiente a una estructura de hormigón armado de no más de 3 plantas.

Por otra parte se ha desarrollado el software de estimación de daños denominado **SELENA** (**SE**ismic **L**osses **E**stimation through a logic tree **A**pproach) (Figura 8).

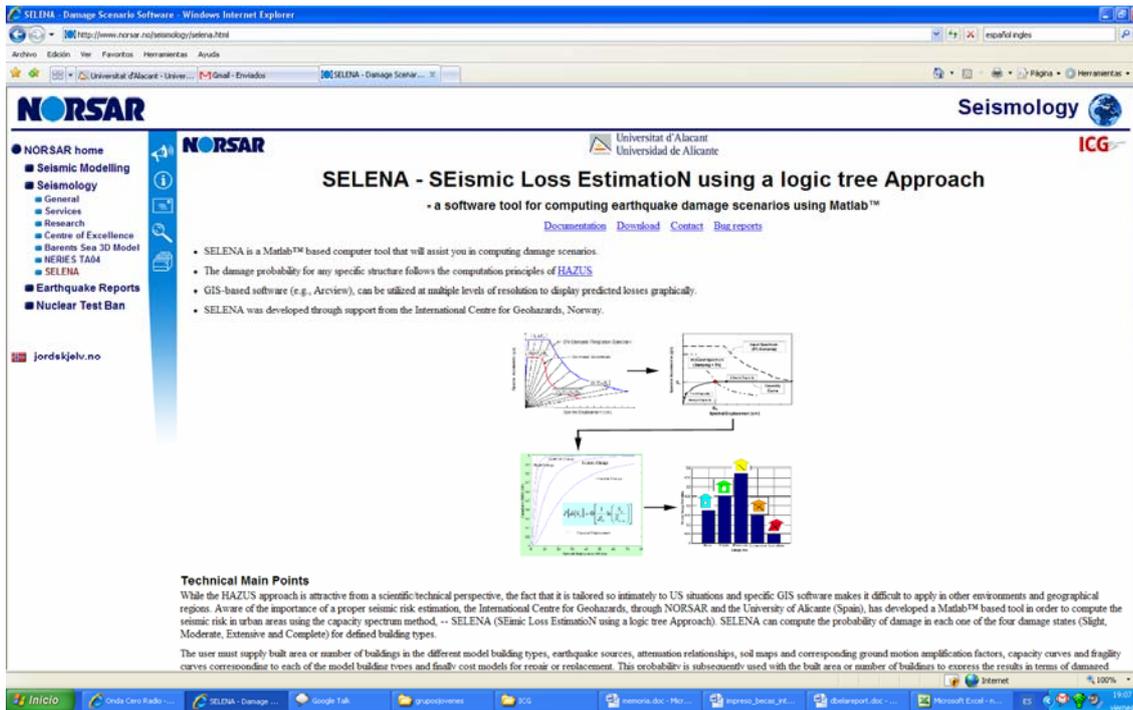


Figura 9. Página web donde se da difusión al software desarrollado en este proyecto. También, en breve, podrá consultarse en la página web del investigador principal. En la Figura 10 podemos observar el diagrama de flujo que representa la aplicación desarrollada.

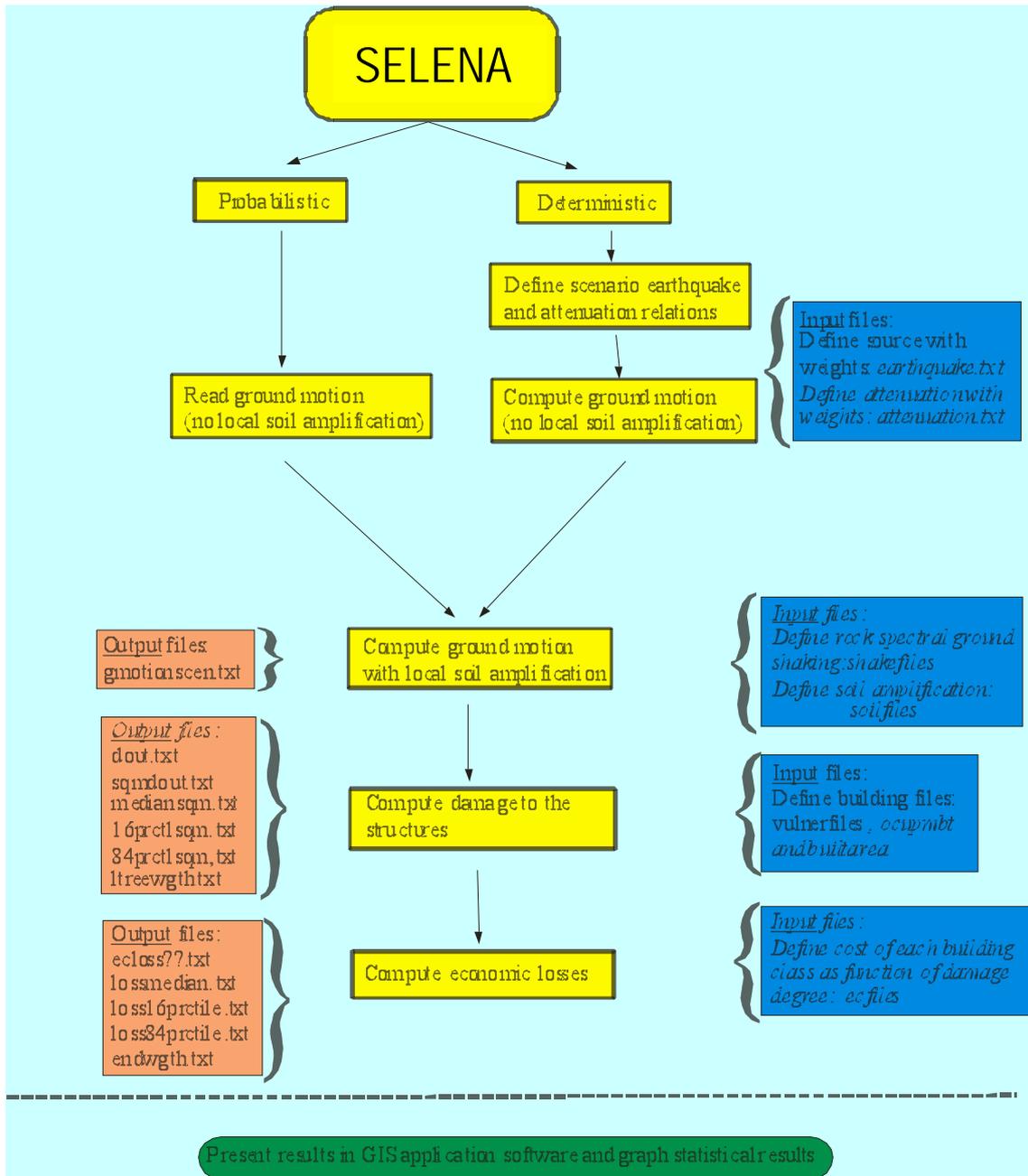


Figura 10. Diagrama de flujo correspondiente al software desarrollado.

Un ejemplo de la interfaz de aplicación así como de los resultados de su aplicación a la ciudad de Oslo se muestra en las Figuras 11 y 12.

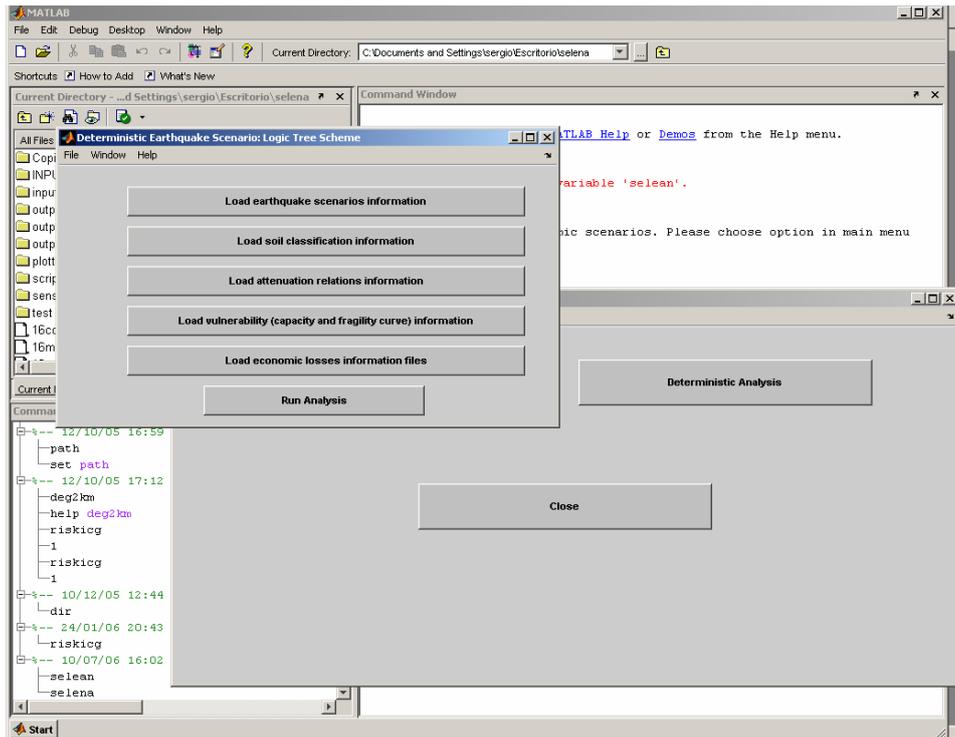


Figura 11. Una de las pantallas de ejecución del software.

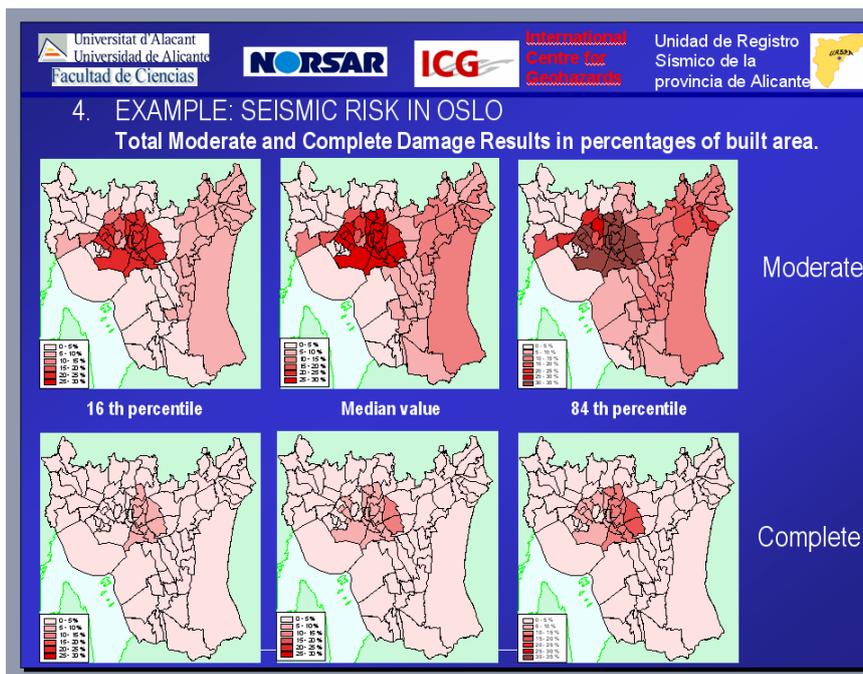


Figura 12. Ejemplo de aplicación de la metodología al municipio de Oslo.

Esta estancia fue financiada totalmente por el grupo receptor en NOR SAR, siendo el único cargo al proyecto la presentación de parte de los resultados al ECI Conference: Geohazards - Technical, Economical and Social Risk Evaluation, celebrado en Lillehammer (Noruega).

b) *Estancia de Sergio Molina Palacios en Nápoles para toma de datos sobre estructuras en la ciudad para aplicación de la metodología desarrollada y en NORSAR para análisis y preparación de los datos.*

Para tratar de hacer una evaluación similar de esta metodología en nuestro país se trató de recoger datos de edificaciones de agencias locales pero los resultados fueron infructuosos. Debido a esto el grupo decidió solicitar un proyecto de grupos emergentes de la convocatoria de Generalitat cuya resolución se hará durante el año 2007 en el que, si es concedido, se iniciará en cooperación con arquitectos técnicos una campaña de recogida de datos en entornos urbanos seleccionados. Para obtener experiencia en la preparación y clasificación de los datos se llevó a cabo una estancia a la ciudad de Nápoles para llevar a una recopilación de datos en dicha ciudad, coordinado con las agencias locales de la ciudad y la universidad (Figuras 13, 14 y 15)



Districts	Km ²	Male	Female	total
Ponticelli	9.11	26 518	27 579	54 097
Barra	7.82	18 607	19 576	38 183
San Giovanni a Teduccio	2.35	12 081	13 280	25 361
Total	19.28	57 206	60 435	117 641

Figura 13. Ejemplo de clasificación geográfica de un distrito de la ciudad y estadísticas de su población.



Figura 14. Esquema de selección de información para clasificación de las edificaciones.

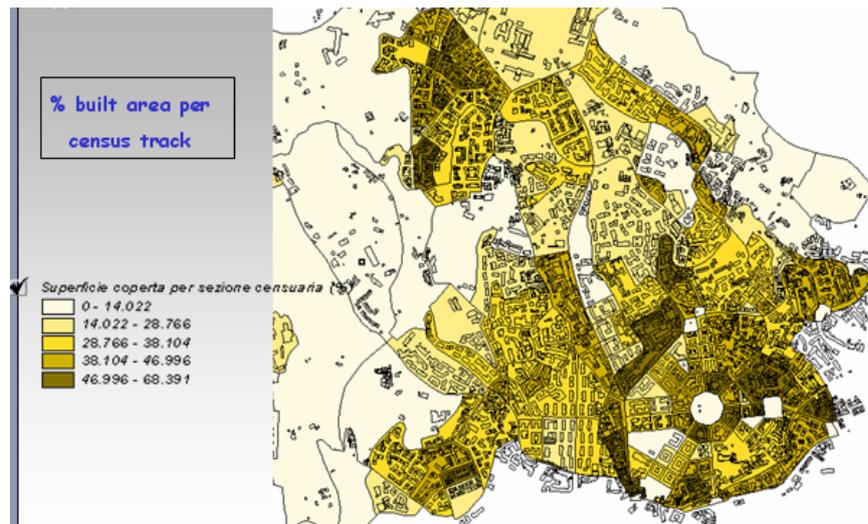


Figura 15. Representación del área construida en las unidades geográficas de referencia (census tracts)

Esta estancia fue financiada totalmente por el grupo receptor en NORSAR, siendo el único cargo al proyecto el desplazamiento a Noruega y Nápoles en Diciembre 2006.

4. PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS.

S. Molina-Palacios, J.J. Galiana-Merino y E. Gimeno-Nieves (2007). *Reports from the project: "Diseño de metodologías y herramientas para la estimación de los efectos de sitio y su aplicación en la evaluación de escenarios de daños debidos a terremotos"*. (Libro en impresión).

S. Molina and C.D. Lindholm (2007). Estimating the confidence of earthquake damage scenarios: examples from a logic tree approach. *Journal of Seismology*, 1- 16 (aceptado con revisiones menores).

P. Conde, S. Molina and C.D. Lindholm (2006). A first approach to the estimation of site effects in the city of Oslo (Norway) using the Nakamura (H/V spectral ratio) technique. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, pp. 329. (Ginebra, Suiza, 2006). Propuesta de gasto 127596 y 118417.

S. Molina and C.D. Lindholm (2006). The confidence of earthquake damage scenarios; Examples from the capacity spectrum method. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, pp. 23. (Ginebra, Suiza, 2006). Aporte económico al proyecto TR 25/10/2006 y Propuesta de gasto 127596 y 118417.

E. Gimeno-Nieves, J.J. Galiana-Merino and S. Molina-Palacios (2006). Statistical study of the site influence on the statistical properties of seismic noise. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, pp. 283. (Ginebra, Suiza, 2006). Propuesta de gasto 127582.

J.J. Galiana-Merino, P. Jaúregui-Eslava, J. Rosa-Herranz, J.J. Giner-Caturla and S. Molina-Palacios (2006). Wavelet processing of multichannel records for the analysis of surface waves. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. (Ginebra, Suiza, 2006).

S. Molina and C.D. Lindholm (2006). A Capacity Spectrum Method for Seismic Risk Assessment. In Proceedings of the *ECI Conference: Geohazards - Technical, Economical and Social Risk Evaluation*. Volumen 7. Paper 18, 1-4. (Lillehammer, Noruega, 2006). Propuesta de gasto 98919

S. Molina and C.D. Lindholm (2006). RISKICG: Una herramienta basada en el método del espectro de capacidad, desarrollada para incluir apropiadamente las incertidumbres en la estimación del riesgo sísmico, mediante un árbol lógico. *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 1- 4 (Sevilla, 2006)

5. AGRADECIMIENTOS.

Los resultados de este proyecto han sido posibles gracias a la financiación del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Alicante (GRJ05-12), a la cooperación y ayuda en la financiación del grupo de investigación en Sismología de NORSAR/ICG (NORSAR1-031), a la cooperación del departamento de Riesgo Sísmico y Alerta Rápida del GFZ-Potsdam (Alemania) y a la cooperación del departamento de Análisis y Protección de las estructuras de la Universidad degli Studi di Napoli Federico II (Italia).

6. REFERENCIAS.

- ABDU-JAUWAD, S.H., and M.F. KHÈNE, 2000. Two-dimensional wavelet-based ground roll filtering. 70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2107-2110.
- AKI, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, **35**, 415-456.
- AKI, K. (1993). Local site effects on weak and strong ground motion. *Tectonophysics* **218**, 93-111.
- ARAI, H. AND TOKIMATSU, K. (2000). Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra, *Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering*, paper 2232, CD-ROM.
- ARAI, H. AND TOKIMATSU, K. (2004). S-Wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V Spectrum. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 1, 53-64
- BARD, P.-Y (1995). *Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues*, In Proc. 10th European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323.
- BARD, P.-Y (1999). *Microtremor measurements: a tool for site effect estimation? State-of-the-art paper*, 2th International Symposium of the Effects of Surface Geology on seismic motion, Yokohama, December 1-3, 1998, Irikura, Kudo, Okada & Sadatani, (eds), Balkema 1999, 3, 1251-1279.
- BOATWRIGHT, J., L.C. SEEKINGS, T.E. FUMAL, H.P. LIU, y C.S. MUELLER (1991). Ground motion amplification in the Marina District. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1980-1997.
- BONILLA LF., STEIDL JH., LINDLEY GT., TUMARKIN AG. Y ARCHULETA RJ (1997). Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site effect estimation using the S-wave, coda and H/V methods. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 710-730.
- BORCHERDT, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **60**, 29-61.
- BUNGUM, H., C. LINDHOLM, A. DAHLE, G. WOO, F. NADIM, J.K. HOLME, O.T. GUDMESTAD, T. HAGBERG & K. KARTHIGEYAN (2000). New seismic zoning maps for Norway, the North Sea and the U.K., *Seism. Res. Lett.*, **71**(6), 687-697.
- CAMACHO, E., C. LINDHOLM, A. DAHLE, & H. BUNGUM (1997). Seismic Hazard Assessment in Panama. *Engineering Geology*, **48**, 1-6.
- CAPON, J.(1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Geophysics* **34**, no 1, 21-38.
- CHÁVEZ GARCÍA, F.J., G. PEDOTTI, HATZFELD y P.Y. BARD (1990). An experimental study of the site effects near Thessalonica (Northern Greece). *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 784-806.
- COUDEL, F. & MORA, P. (1998). Simulation-Based Comparison of Four Site-Response Estimation Techniques. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 30-42.
- DEIGHAN, A.J., AND D.E. WATTS, (1997). Ground-roll suppression using the wavelet transform. *Geophysics*, **62**, 1896-1903.

- DELGADO MARCHAL, J.; LOPEZ CASADO, C.; ESTÉVEZ, A.; GINER, J.J.; CUENCA, A. AND MOLINA, S. (2000). Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool. *J. Appl. Geophys.*, **45**, 19-32.
- DIALLO, M.S., M.KULESH, M. HOLSCHNEIDER, F. SCHERBAUM AND F. ADLER. Characterization of polarization attributes of seismic waves using continuous wavelet transform. *Geophysics*, **71**, v67-v77.
- DRAVINKI, M.; DING, G. AND WEN, K.L. (1996). Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, 646-654.
- FÁH, D.; KIND, F. AND GIARDINI, D. (2001). A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophys. J. Int.*, **145**, 535-549.
- GALIANA-MERINO, JJ. (2001). *Aplicación de la transformada de wavelet a sismogramas locales: filtrado, deconvolución y estimación del ángulo azimut*. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- GALIANA-MERINO, JJ.; ROSA-HERRANZ, J.; GINER, J.; MOLINA, S. AND BOTELLA, F. (2003). De-Noising of short period seismograms by wavelet packet transform. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 6, 2554-2562.
- GALIANA-MERINO, JJ.; ROSA-HERRANZ, J.; GINER, J.; MOLINA, S. AND BOTELLA, F. (2004a). Regularized Deconvolution of Local Short-Period Seismograms in the Wavelet Packet Domain. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 4, 1467-1475
- GALIANA-MERINO, JJ.; PAROLAI, S. (2004b). *Statistical study of noise in the time-frequency domain*. Poster presentation at the ESC meeting Sept. 12-17, GFZ, Potsdam, Germany
- GANGOPADHYAY, A. AND TALWANI, P. (2003) Symptomatic features of intraplate earthquakes, *Seismological Research Letters*, **74**, 6,
- GINER JJ., MOLINA, S., DELGADO J. Y JAUREGUI P. (2002 a) Mixing methodologies in the seismic hazard assessment via a logic tree procedure: An application for eastern Spain. *Nat. Hazards*, **25** (1), 59-81.
- GINER JJ., MOLINA S. Y JAUREGUI P. (2002 b). Advantages of using sensitivity analysis in seismic hazard assessment. A case study of sites in Southern and Eastern Spain. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 2, 527-542.
- GINER JJ., MOLINA S., JAUREGUI P. AND DELGADO J. (2002 c). A new methodology for decreasing uncertainties in the seismic hazard assessment results by using sensitivity analysis: An application to sites in Eastern Spain. *PAGEOPH*, **159**, 1271-1288.
- HARKRIDER, D.G. (1964). Surface waves in multilayered elastic media, part 1, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **54**, no. 2, 627-679.
- HORIKE, M. (1985). Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave velocity structure down to the basement in urbanized areas. *Journal of the Physics of the Earth*, **33**, 59-96
- HORIKE, M. (1993). Studies on microtremors, *J. Seism. Soc. Japan, Ser. 2*, **46**, 343-350.
- IDRISS, I.M. AND SUN, J.I. (1992). "SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits," User's Guide, University of California, Davis, California, 13 pp.
- JIMÉNEZ, M.J.; GARCIA-FERNANDEZ, M.; ZONNO, G. AND CELLA, F. (2000). Mapping soil effects in Barcelona, Spain through an integrated GIS environment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **19**, 289-301.
- KVALSTAD, T.J., NADIM, F., KAYNIA, A.M., MOKKELBOST, K.H. AND BRYN, P. (2004). Soil conditions and slope stability in the Ormen Lange area. *Marine Petroleum and Geology*.
- KUDO, K. (1995). *Practical estimates of site response. State-of-the-art report*. In Proc. 5th Int. Conf. Seismic Zonation, ed. Quest, Nice, France, vol.3, 1878-1907.
- LACHET, C. AND BARD, P.-Y. (1994) Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *J. Phys. Earth.*, **42**, 377-397.
- LANGSTON, C.A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, *J. Geophys. Res.*, **84**, 4749-4762.
- LERMO, J. AND CHÁVEZ-GARCIA, F.J. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1350-1364.
- LINDHOLM, C. & H. BUNGUM (2000): Probabilistic seismic hazard; A review of the seismological frame of reference with examples from Norway, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **20**, 27-38.
- LINDHOLM, C. D. AND H. BUNGUM (2002). *Microzonation studies in Central America*. 12th Symposium on Earthquake Engineering, Eds. D. Paul, A. Kumar and M. Sharma, Roorkee, India, 16-18 Dec., pp 351-358.
- LISMER, J., UKADA, T., TSAI, C.-F., AND SEED, H.B. (1975). "FLUSH-A computer program for approximate 3-D Analysis of soil structure interaction problems". Report No. EERC/75-30, EERI Center, University of California, Berkeley.
- LOUIE, J. N. (2001) Faster, better: Shear-wave velocity to 100 m depth from refraction microtremor arrays, *Bull. Seism. Soc. Am.* **91**(2), 347-364.
- MATSUSHIMA, T. AND OKADA, H. (1990). Determination of deep geological structures under urban areas, *BUTSURI-TANSA* **43**, no. 1, 21-33.

- MAYER-ROSA, D. AND M.J. JIMÉNEZ (2000). *Seismic Zoning. State-of-the-art and Recommendations for Switzerland*. Geological Reports Nr.26, Swiss National Hydrological and Geological Survey, Bern, Switzerland. ISBN 3-906723-41-0.
- MOLINA PALACIOS, S (1998). *Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica del área de contacto entre Iberia y Africa*. Tesis Doctoral. Univ. Granada.
- MOLINA, S., LINDHOLM, CD Y BUNGUM H. (2001). Probabilistic seismic hazard analysis: Zoning free versus zoning methodology, *BGTA*, **42** (1-2) 19-39.
- MOLINA, S. AND LINDHOLM, C. (2004a). *Seismic risk in Oslo: a HAZUS testing and application*. Poster presentation at the ESC meeting Sept. 12-17, GFZ, Potsdam, Germany
- MOLINA, S. AND LINDHOLM, C. (2004b) *A logic tree extension of the capacity spectrum method developed to estimate seismic risk in Oslo, Norway*. Paper submitted to Journal of Earthquake Engineering.
- MUCCIARELLI, M.; MASI, A.; VONA M.; GALLIPOLLI, M.R.; HARABAGLIA, P. AND CAPUTO, R. (2003). Quick survey of the possible causes of damage enhancement observed in San Giuliano after the 2002 Molise, Italy Seismic Sequence. *Journal of Earthquake Engineering*, **7**, 4, 599-614.
- NAKAMURA, Y.(1989). A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Q Rep. RTRI*, **30**(1), 25-33.
- NAKAMURA, Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*. Proc. XII World Conf. Earth. Eng., New Zealand, paper no. 2656.
- OHRNBERGER, M., F. SCHERBAUM, F. KRÜGER, R. PELZING, AND S.K. REAMER, (2003). How good are shear wave velocity models obtained from inversion of ambient vibrations in the Lower Rhine Embayment (NW Germany). *Bolletino di Geofisica Teorica e Applicata*, **45**, 215-232.
- PAROLAI, S; BINDI, D. AND AUGLIERA, P. (2000). Application of the Generalized Inversion Technique (GIT) To a Microzonation Study: Numerical Simulations and Comparison with Different Site Estimation Techniques. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 2, 286-297.
- PAROLAI, S.; BORMANN, P. AND MILKEREIT, C. (2000). New Relationships between Vs, Thickness of Sediments, and Resonance Frequency Calculated by the H/V Ratio of Seismic Noise for the Cologne Area (Germany). *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 6, 2521-2527.
- PAROLAI, S. AND BINDI, D. (2004). Influence of Soil-Layer Properties on k Evaluation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 1, 349-356.
- PAROLAI, S. AND RICHWALSKI, S.-M. (2004). The Importance of Converted Waves in Comparing H/V and RSM Site Response Estimates. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 1, 304-313
- RENÉ, R.M., J.L. FITTER, P.M. FORSYTH, K.Y. KIM, D.J. MURRAY, J.K. WALTERS, AND J.D. WESTERMAN (1986). Multicomponent seismic studies using complex trace analysis. *Geophysics*, **51**, 1235-1251.
- ROMANELLI, F. AND VACCARI, F. (1999). Site response estimation and ground motion spectral scenario in the Catania Area. *J. of Seism.*, **3**, 311-326.
- SHIEH, C.F., AND R.B. HERRMANN (1990). Ground roll: Rejection using polarization filters. *Geophysics*, **55**, 1216-1222.
- TOKIMATSU, K. (1997). *Geotechnical site characterization using surface waves*. Proc. 1st Intl. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. 3, 1333-1368.
- TOKIMATSU, K. AND MIYADERA Y. (1992). Characteristics of Rayleigh waves in microtremors and their relation to underground structures. *J Struct. Constr. Eng.*, **439**, 81-87
- TOKIMATSU, K. ; TAMURA, S. AND KOJIMA, H. (1992a). Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion. *J Geotech. Eng.* ASCE **118**, no. 10, 1529-1543.
- TOKIMATSU, K. ; SHINZAWA, K. AND KUWAYAMA, S. (1992b). Use of short-period microtremors for Vs profiling. *J. Geotech. Eng.*, ASCE **188**, no. 10, 1544-1588.
- VILLAGRAN, M., C. LINDHOLM, A. DAHLE, H. COWAN & H. BUNGUM (1997): Seismic hazard assessment for Guatemala City, Guatemala. *Natural Hazards*, **14**, 189-205.
- WATHELET M. (2005) *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion*. – Liège: Faculté des Sciences Appliquées.
- YAMANAKA, H.; TAKEMURA, M.; ISHIDA, H. AND NIWA, M. (1994). Characteristics of long-period microtremors and their applicability in exploration of deep sedimentary layers, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 6, 1831-1841.