

Resultados preliminares del proyecto de peligrosidad sísmica mediante técnicas geofísicas

Zonificación sísmica de la región de Lorca mediante el método del gradiente topográfico

La ocurrencia de un evento sísmico en una zona provoca daños en las edificaciones, que son función de la respuesta del terreno a las cargas cíclicas. Para estudiar este efecto sitio se está desarrollando un proyecto de I+D aplicado a la ciudad de Lorca (Murcia) sobre el diagnóstico local de la peligrosidad sísmica con el empleo de técnicas geofísicas. Los resultados preliminares de este proyecto se exponen en este artículo.

Palabras clave: DAÑO, EFECTO SITIO, GEOFÍSICA, GRADIENTE TOPOGRÁFICO, ONDAS DE CIZALLA, PELIGROSIDAD, PROPAGACIÓN, SEISMO, SUELO, ZONIFICACIÓN SÍSMICA.

Senén SANDOVAL CASTAÑO, Dr. en Geofísica. *Geofísica Consultores*.
Pedro MARTÍNEZ-PAGÁN, Dr. Ing. de Minas. U.P de Cartagena (UPCT).
Manuel ALCARAZ APARICIO, Ing. de Minas. U.P de Cartagena (UPCT).
Jaruselsky PÉREZ CUEVAS. Ingeniero Civil.
Iván ALHAMA MANTECA. Dr. en Ciencias Geológicas.

Las 15:05 del día 11 de mayo de 2011 un evento sísmico de magnitud $M_w = 4.5$ localizado al NE de la ciudad de Lorca (Murcia), aproximadamente sobre la traza de la Falla de Alhama de Murcia (FAM), desencadenó una secuencia de eventos sísmicos cuyo evento principal alcanzó una magnitud $M_w = 5.1$ con efectos destructivos sobre la ciudad de Lorca (Foto 1).

Según el informe del IGME (2011): *Un terremoto de magnitud 5.1 no debería haber generado una intensidad sísmica tan elevada (intensidad VII en la escala EMS-98, datos IGN)... Por otro lado, los depósitos detríticos sobre los que se asienta la ciudad responden a materiales coluviales y aluviales junto al glacis de la Sierra de la Tercia (zona epicentral), así como depósitos de las ramblas del río Guadalentín y que constituyen depósitos con propiedades amplificadoras ante el paso de un tren de ondas sísmico.*

De lo anterior se deduce que la naturaleza y la magnitud de los daños que pueden sufrir las edificaciones con la ocurrencia de un evento sísmico, están muy influenciadas por la respuesta del terreno frente a cargas cíclicas, dando lugar a una modificación de la señal sísmica. Esta modificación de la señal sísmica a su vez va a depender de las condiciones geológicas y topográficas y a esto se conoce como *efecto sitio*, consistiendo en la amplificación de la señal sísmica en varios órdenes de magnitud (Tsige y García-Flórez, 2006). Así, la presencia de terrenos considerados geotécnicamente blandos y situados en superficie próxi-

mos a la ocurrencia de un sismo darán lugar a un incremento importante de los daños sobre las edificaciones o la infraestructura civil.

Teniendo como marco lo comentado anteriormente se está desarrollando un proyecto de I+D aplicado en la ciudad de Lorca (Murcia) sobre el diagnóstico local de la peligrosidad sísmica con el empleo de técnicas geofísicas en el que participan investigadores de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Universidad Rey Juan Carlos (URJC), Universidad Complutense de Madrid (UCM) y asesores externos (Geofísica Consultores, Instituto Andalus de Geofísica, etc.).

Este proyecto de I+D, tiene como objetivo principal el establecer una clasificación de las principales áreas de la ciudad de Lorca en base a la propagación de las ondas de cizalla hasta los 30 metros de profundidad (V_s^{30}), a través del empleo de técnicas geofísica ade-

cuadas para trabajar en ambiente urbano, concretamente el método MASW el cual se describe más adelante.

Esta información geofísica estará apoyada por estudios de sismotectónica activa y los resultados obtenidos a partir de ensayos de V_s sobre testigos de sondeo. Esta clasificación se comparará con la clasificación de las zonas de la ciudad de Lorca en base a la magnitud de los daños sufridos por el reciente terremoto. Además, esta clasificación se comparará a los estudios de gradiente topográfico realizados; todo ello con el fin de establecer una metodología de trabajo a un coste aceptable, que sea relativamente rápida y reproducible en otras áreas con riesgos de amplificación sísmica.

Zonificación sísmica y V_s^{30}

La zonificación (o microzonificación) sísmica consiste en la división de una población en pequeñas regiones geográficas caracterizadas por distintos comportamientos del terreno ante la ocurrencia de un sismo. La zonificación sísmica es un elemento esencial para la reducción del riesgo sísmico ya que permite seleccionar los diseños más adecuados en cada caso para la construcción de nuevas edificaciones.

En numerosos estudios de zonificación sísmica (Boore et al. 1993; Anderson et al. 1996; Castro et al. 1997; Park y Elrick 1998) se emplea el V_s^{30} como parámetro fundamental.

Se denomina V_s^{30} al valor promedio de la velocidad de las ondas de cizalla en los primeros 30 metros de terreno. Es un parámetro importante ya que a partir de él se definen



[Foto 1] .- Colapso de un edificio en Lorca (Murcia) debido al evento sísmico principal ocurrido el 11 de mayo de 2011.

Clase	Descripción	V_s^{30} (m/s) (según el IBC2000, sección 1615.1.5)
A	Roca dura	$V_s > 1524$
B	Roca	$762 < V_s \leq 1524$
C	Suelo muy denso y/o roca blanda	$366 < V_s \leq 762$
D	Suelo rígido	$183 < V_s \leq 366$
E	Suelo blando	$V_s < 183$

[TABLA I].- Definiciones de las clases de suelo según el parámetro V_s^{30} (Tabla 1615.1.1 del IBC).

[TABLA II].- Relación entre pendiente topográfica y V_s^{30} según el NEHRP.

Clase	V_s^{30} (m/s)	Pendiente (m/m)	
		Regiones tectónicamente activas	Regiones tectónicamente estables
B	>760	>0.138	>0.025
C	620-760	0.100-0.138	0.018-0.025
	490-620	0.050-0.100	0.013-0.018
	360-490	0.018-0.050	$7.2e^{-3}$ - 0.013
D	300-360	$6.3e^{-3}$ - 0.018	$4.0e^{-3}$ - $7.2e^{-3}$
	240-300	$2.2e^{-3}$ - $6.3e^{-3}$	$2.0e^{-3}$ - $4.0e^{-3}$
	180-240	$3.2e^{-5}$ - $2.2e^{-3}$	$1.0e^{-6}$ - $2.0e^{-3}$
E	<180	$<3.2e^{-5}$	$<1.0e^{-6}$

las categorías de suelo en el Código Internacional de la Edificación (IBC2000, Tabla 1615.1.1) adoptadas por el NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program). Según esta clasificación, el tipo de suelo puede ser dividido en cinco categorías (desde la **A** para un terreno de roca dura hasta la categoría **E** para un suelo blando, Tabla I).

Efectos de amplificación de sitio

Cada tipo de terreno presenta un comportamiento diferente cuando es sometido a las vibraciones propias de un terremoto y por lo tanto es determinante conocer de manera precisa la forma en que el terreno va a reaccionar al paso de las ondas sísmicas para, de este modo, poder predecir el efecto en los edificios que se apoyan sobre él.

Los fenómenos de *amplificación de sitio* dependen de varios factores: potencia y composición de sedimentos, velocidad de las ondas de cizalla, densidad y atenuación de las distintas capas.

Numerosos estudios (Finn, 1991) han demostrado que existe una relación de carácter no lineal entre las propiedades mecánicas de los suelos y los fenómenos de amplificación de sitio. Uno de los factores más importantes es la relación entre la velocidad de las ondas de cizalla en las capas de sedimentos más profundas y la velocidad de las ondas **S** en la superficie. Shima (1978) demostró que la amplificación calculada de manera analítica está relacionada de manera casi lineal con este parámetro.

De esta manera, conociendo la distribución de velocidades de ondas **S** desde la superficie hasta la base de la capa de sedimentos se pueden obtener modelos numéricos que representen la amplificación teórica del suelo que se produciría durante un terremoto. Varias investigaciones (Joyner et al., 1981; Midorikawa, 1987; y Borcherdt et al., 1991) han demostrado que calculando el promedio de la velocidad de las ondas de cizalla desde la superficie hasta una profundidad de 30 metros se puede obtener una estimación aproximada de los fenómenos de amplificación del suelo.

Gradiente topográfico y V_s^{30}

Recientemente se ha demostrado (Wald y Allen, 2007) que el gradiente topográfico se puede emplear para estimar en una aproximación de primer orden el parámetro V_s^{30} y, por lo tanto, para elaborar de manera rápida mapas de zonificación sísmica. La Tabla II resume la relación existente entre el V_s^{30} y la pendiente topográfica en zonas tectónicamente activas y en zonas estables.

Según el estudio anteriormente mencionado, el principio que relaciona el gradiente topográfico y el V_s^{30} es que en zonas de fuerte pendiente deben predominar los materiales más rígidos y competentes (y por lo tanto de mayor velocidad sísmica) que en zonas sin pendiente (valles), donde predominarán sedimentos de baja rigidez y por lo tanto de baja velocidad sísmica.

La principal ventaja de esta aproximación es que se pueden realizar estudios de zonificación sísmica de manera rápida ya que existen modelos digitales del terreno de gran calidad disponibles para la comunidad técnica y científica.

Un ejemplo de este tipo de análisis se describe a continuación. En la Fig. 1 se muestra el modelo digital del terreno de alta resolución (4x4m) correspondiente al entorno de la ciudad de Lorca (Proyecto NATMUR08 – D.G. Patri-

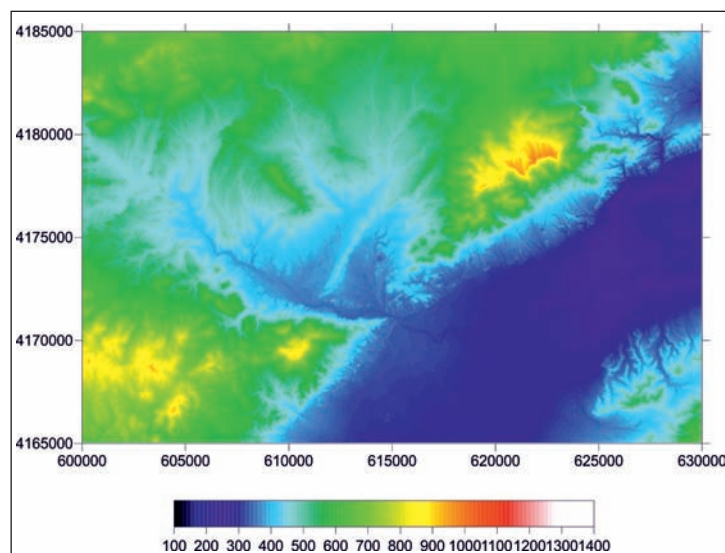
monio Natural y Biodiversidad – CARM). El relieve está dominado por el valle del río Guadalentín cuyo curso cambia de dirección NO-SE a SO-NE a su paso por Lorca (Murcia).

Las Figs. 2 y 3 se han obtenido calculando el gradiente topográfico y aplicándoles las definiciones propuestas por Wald y Allen (2007) para regiones tectónicamente activas. El resultado es que los terrenos que se asientan sobre el valle del río Guadalentín (incluida la ciudad de Lorca) son del tipo **C** (subgrupo inferior) y **D** según la clasificación de la Tabla II. Por otro lado, los terrenos situados en las estribaciones de Sierra Espuña (al NO del valle) y Sierra de la Almenara (al SE del valle) pertenecen al tipo **B** y **C** (subgrupos superiores).

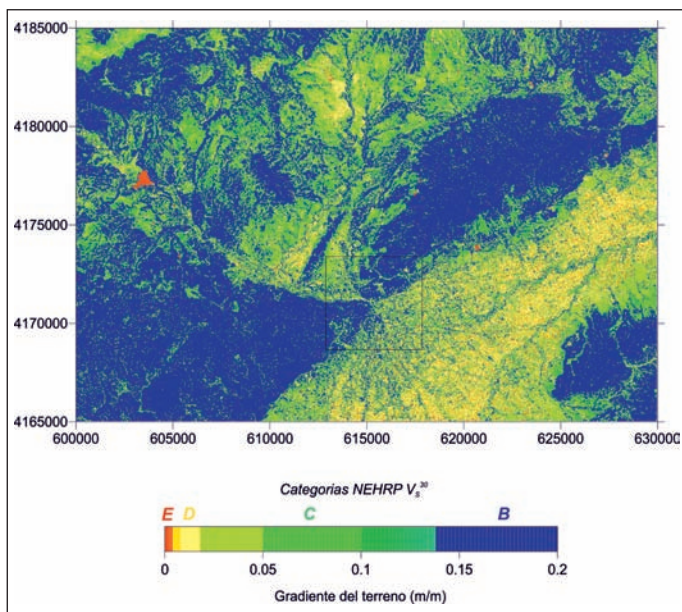
Método MASW

El *gradiente topográfico* es, como se ha dicho anteriormente, una aproximación de primer orden. Para confirmar que la zonificación sísmica obtenida mediante el método del gradiente topográfico es necesario realizar medidas independientes *in-situ* que proporcionen modelos de velocidad de ondas de cizalla que permitan obtener el parámetro V_s^{30} .

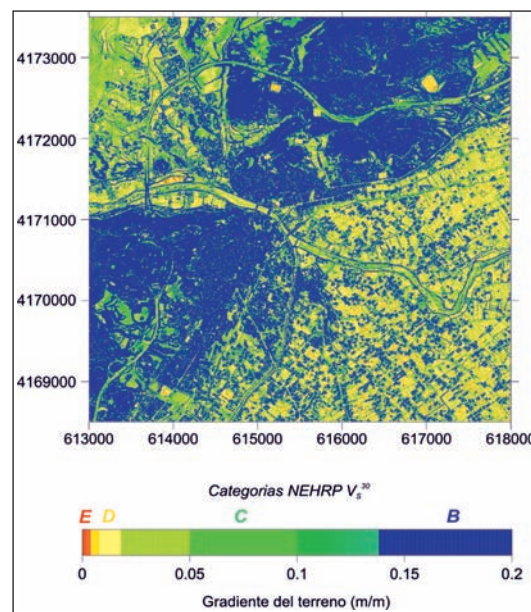
Existen varios métodos que permiten generar modelos de velocidad de propagación de ondas **S**. Mediante los ensayos *cross-hole*



[Figura 1].- Modelo digital del terreno de alta resolución (4x4m) correspondiente al entorno de la ciudad de Lorca.



[Figura 2]. - Gradiente topográfico de los terrenos asentados en las estribaciones de la sierra de España y la de Almenara .



[Figura 3]. - Gradiente topográfico de los terrenos del valle del Guadalentín y la ciudad de Lorca.

y *down-hole* se pueden obtener velocidades de ondas **S** con mucha precisión, su principal desventaja es que es necesario realizar uno o varios sondeos, lo cual aumenta los costes económicos asociados.

Los ensayos geofísicos de superficie basados en la dispersión de las ondas superficiales son una herramienta más económica que los ensayos *cross-hole* y *down-hole* y generan modelos de velocidad de ondas **S** de buena calidad. De todos ellos, los ensayos **MASW** (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) es probablemente el que mayor grado de detalle ofrece. A diferencia de los métodos pasivos (*REMI*) se emplea una fuente activa cuyo rango de frecuencias es suficientemente amplio para obtener modelos hasta 30 metros de profundidad. Si además se emplea un sistema de adquisición de tipo *land-streamer* se puede obtener un alto rendimiento (reduciendo aún más los costes económicos asociados) y cubrir amplias zonas de estudio en poco tiempo (**Foto 2**).

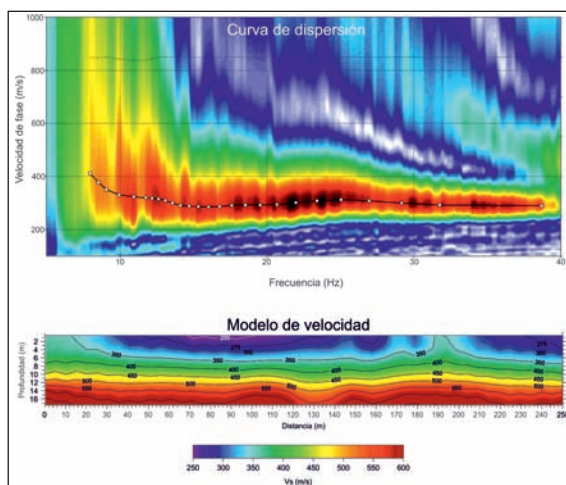
El método **MASW** (*Park et al.* 1999) se basa en crear una curva de dispersión (**Fig. 4**) del modo fundamental y de los modos superiores de ondas *Rayleigh* a partir de un registro sísmico compuesto generalmente por varios geófonos de componente vertical dispuestos de manera regular.

A partir de esta curva de dispersión se genera un modelo de velocidad de ondas de cizalla. Desplazando el dispositivo de sensores una pequeña distancia (habitualmente la distancia que separa uno o dos sensores consecutivos) se repite el proceso pudiendo generar modelos 2D del terreno. De este modo se pueden ob-

tener las variaciones del parámetro V_s^{30} a lo largo de un transecto que recorra una determinada población pudiendo establecerse una zonificación sísmica de detalle que complementa a la realizada por otros métodos.



[Foto 2]. - Land Streamer con geófonos a un metro de distancia para el registro de las ondas Rayleigh en un ensayo MASW.



[Figura 4]. - Curva de dispersión de las ondas Rayleigh.

Agradecimientos

Agradecer a la *Fundación Séneca* el apoyo financiero al proyecto de I+D 15322/PI/2010.

Referencias

- ANDERSON, J.G., LEE, Y.H., ZENG, Y.H. AND DAY, S., 1996. **Control of strong motion by the upper 30 meters.** *Bulletin of the Seismological Society of America* 86, 1749-1759.
- BOORE, D.M., W.B. JOYNER AND T.E. FUMAL (1993). **Estimation of response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: an interim report, U.S. Geological Survey Open-File Report 93-509.**
- CASTRO, R. R., M. MUCCIARELLI, F. PACOR, AND C. PETRUNGARO (1997). **S-wave site response estimates using horizontal-to-vertical spectral ratios.** *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 256-260.
- FINN, W.D.L. (1991). **Geotechnical engineering aspects of microzonation.** *Proc. 4th International Conference on Seismic Zonation, Vol.1, 199-259.*
- IGME (2011). **Informe geológico preliminar del terremoto de Lorca del 11 de mayo del año 2011, 5.1 Mw.** Ministerio de Ciencia e Innovación, 47 pp.
- PARK, S., AND S. ELRICK (1998). **Predictions of shear-wave velocities in southern California using surface geology.** *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 677-685.
- PARK, C.B., MILLER, R.D., AND XIA, J., 1999, **Multi-channel analysis of surface waves (MASW):** *Geophysics*, v. 64, no. 3, p. 800-808.
- TSIGE, M. AND GARCÍA-FLÓREZ, I (2006). **Propuesta de clasificación geotécnica del "Efecto Sitio" (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia.** *Geogaceta*, 40, 39-42.
- WALD, D. AND ALLEN, T (2007). **Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site Conditions and Amplification.** *BSSA* 97 (5) 1379-1395.