

# Microzonificación sísmica de dos valles Pirenaicos: Andorra y la Cerdanya

## *Seismic microzonation in two valleys of the Pyrenees: Andorra and la Cerdanya*

A. Macau<sup>(1)</sup>, S. Figueras<sup>(1)</sup>, T. Susagna<sup>(1)</sup>, J. Cirés<sup>(1)</sup>, B. Colas<sup>(2)</sup> y M. González<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), Parc de Montjuïc, 08038, Barcelona, [amacau@icc.es](mailto:amacau@icc.es)

<sup>(2)</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

<sup>(3)</sup> Centre de Recerca de Ciències de la Terra de l'Institut d'Estudis Andorrans (CRECIT).

### SUMMARY

Within the framework of the ISARD (*Información Sísmica Automática Regional de Daños*) project two valleys located in the eastern part of the Pyrenees, with different geological features, have been selected as pilot zones for the study of seismic risk. The Andorra la Vella-Escaldes-Engordany basin where most of buildings, infrastructures and economic activity of the country are concentrated, is characterized by a strong density of population. The Cerdanya Valley, located in French and Spanish territory, where the population distribution is spreader and is distributed in small urban nuclei. For the study of seismic risk two seismic scenarios have been chosen: for a return period of  $T=475$  years and  $T=1975$  years values of intensity VII and VIII and values of PGA 0,12g and 0,2g, for both zones for average soil conditions have been obtained within the framework of the same project. The seismic behavior of both areas has been characterized with the seismic noise  $H/V$  spectral ratio empirical method and with transfer functions computed applying a 1D equivalent linear model. In Andorra amplifications for frequencies higher than 1Hz are obtained, due to the thin sedimentary cover. In opposite, in the Cerdanya Valley the sediments that infill the basin, up to 800m thick, give rise to amplifications of the ground motion at smaller frequencies ( $<1$ Hz). The results of this study will be used, together with the building vulnerability assessment for the seismic risk estimation and the damage scenarios accomplishment.

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos del proyecto ISARD es la estimación del riesgo sísmico y la realización de escenarios de daños en Andorra y la Cerdanya. En este trabajo se presentan los distintos estudios llevados a cabo para realizar una microzonificación sísmica en las zonas de estudio considerando la frecuencia fundamental y la amplificación del movimiento del suelo en emplazamientos con características del subsuelo diferentes.

Andorra es un país de alta montaña situado en el Pirineo entre España y Francia, está caracterizado por una geología de valles glaciares cuaternarios, geotecnia y topografía muy particulares y expuesto a muchos riesgos naturales. Se ha seleccionado como zona de estudio la cubeta de Andorra la Vella, valle glaciar muy cerrado que comprende los núcleos urbanos de Andorra la Vella, Escaldes-Engordany, Santa Coloma y La Margineda, que tienen una gran densidad de población con una alta concentración de edificios e infraestructuras.

La comarca de la Cerdanya se localiza también en el Pirineo, es un valle sedimentario Miocénico profundo, con una potencia de sedimentos que llega a los 800m, comprende una zona rural muy extensa, la distribución de la población es más dispersa y se concentra en pequeños núcleos urbanos repartidos entre España y Francia, muy concurridos por el turismo de invierno y verano. El estudio se ha realizado en una serie de perfiles transversales al valle y en Puigcerdà, la población principal de la comarca.

En ambos valles se ha realizado una recopilación de datos geológicos y geotécnicos, y campañas de medidas de ondas superficiales y de ruido sísmico que han permitido llevar a cabo estudios experimentales y de simulación numérica 1D. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en estos estudios, que además, han permitido realizar una microzonificación sísmica que será de gran utilidad, conjuntamente con los estudios de vulnerabilidad para la evaluación del riesgo sísmico en estos valles.

### 2. SISMICIDAD DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

La sismicidad histórica y los datos de la tectónica reciente indican claramente un nivel de peligrosidad sísmica considerable en los Pirineos, la mayor actividad sísmica se sitúa en la parte occidental de la cordillera. En el año 1373 tuvo lugar un sismo destructor en una amplia zona de la Ribagorça con una intensidad epicentral VIII-IX (Olivera et al., 1994a). En 1427 y 1428 tuvo lugar en el Pirineo Oriental una serie sísmica con intensidades máximas

entre VIII-IX y IX (Olivera et al., 1994b). En 1660 la parte Central de la cordillera sufrió una sacudida destructora (I=VIII-IX). Durante el siglo XX se han lamentado daños importantes en los sismos del Valle de Arán en 1923 (I=VIII) y de Arette en 1967 (I=VIII). Recientemente, con el aumento de población y de las actividades económicas, algunos sismos de magnitud moderada han causado pérdidas económicas considerables, como por ejemplo los sismos de Saint Paul de Fenouillet ( $M=5.2$ ) en 1996, en los Hautes Pyrénées ( $M=4.7$ ) en mayo 2002, en el Ripollès ( $M=4.0$ ) en septiembre 2004. En Andorra tuvo lugar en el año 1970 una crisis sísmica importante con intensidades epicentrales de V-VI (Susagna y Goula, 1999).

En el marco del proyecto ISARD se ha realizado un estudio probabilista de la peligrosidad sísmica en los Pirineos a partir de un catálogo sísmico unificado, considerando la zonación sismotectónica y una atenuación adaptada a la zona. Este estudio se ha hecho de forma dual, desde el punto de vista de las aceleraciones espectrales y desde el punto de vista de las intensidades, considerando periodos de retorno de 475 años y de 1975 años. En la tabla 1 se muestran los valores de la aceleración máxima (PGA) y de la intensidad propuestos para cada una de las zonas de estudio.

**Tabla 1- Valores de aceleración y intensidad propuestos para Andorra y la Cerdanya. (Acceleration and Intensity values proposed for Andorra and la Cerdanya.)**

	Cerdanya	Andorra
<b>PGA</b>		
T = 475 años	0.12 g	0.12 g
T = 1975 años	0.20 g	0.21 g
<b>INTENSIDAD</b>		
T = 475 años	VII	VII
T = 1975 años	VIII	VIII

Los espectros de respuesta en aceleraciones propuestos en los estudios de peligrosidad para las dos zonas son muy similares por tanto se considerará el mismo espectro de referencia para ambas.

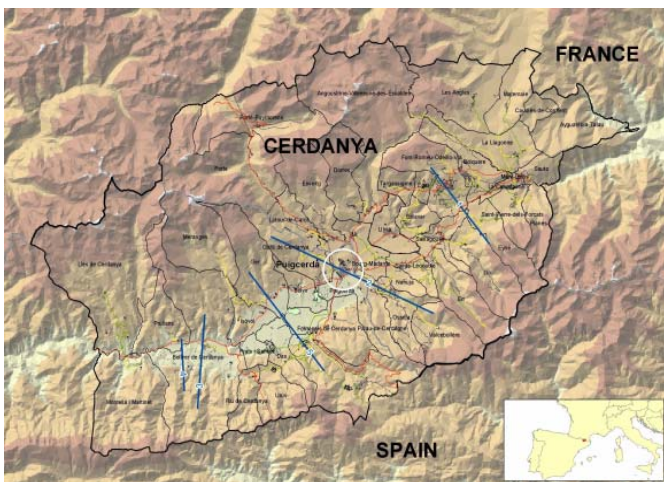
### 3. CAMPAÑA DE MEDIDAS DE RUIDO SÍSMICO

En la cubeta de Andorra la Vella y en la Cerdanya se han realizado campañas de medidas de ruido sísmico para la obtención de los períodos predominantes del suelo. Para la selección de los puntos de medida se han tenido en cuenta las diferencias de topografía, la geología, la geotecnia y la facilidad de acceso a los

diferentes emplazamientos. El equipo utilizado para la campaña de medidas de ruido sísmico está formado por un digitalizador CityShark de la casa Leas y un sismógrafo triaxial Lennartz de 5 segundos. Se realizan medidas en ventanas de tres minutos con un muestreo de 0.01s. En cada emplazamiento se ha hecho varias medidas, repitiéndolas en los casos que ha habido una perturbación o se ha saturado el registro.

En Andorra las medidas de ruido sísmico se han realizado en los núcleos urbanos de las parroquias de Andorra la Vella y Escaldes-Engordany. La mayoría de las medidas se han realizado en el fondo del valle, pero también se ha aprovechado para hacer medidas en las laderas, para analizar posibles efectos topográficos. En total se han realizado registros en 47 emplazamientos diferentes.

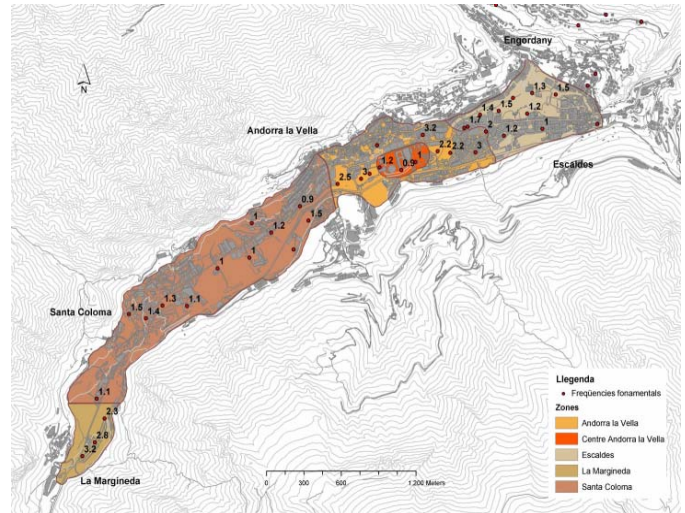
En la Cerdanya, al tratarse de una zona muy extensa se han concentrado las medidas en un conjunto de perfiles transversales al valle y en Puigcerdà, la población más importante de la región, (figura 1). En total se han realizado en la Cerdanya registros en 115 emplazamientos diferentes.



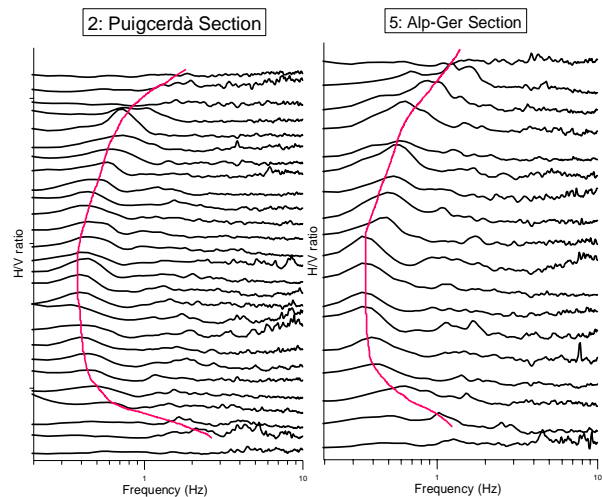
**Figura 1 - Mapa de la Cerdanya con los perfiles donde se han realizado medidas de ruido sísmico, la población de Puigcerdà se señala con un círculo. (Cerdanya map with the sections in which microtremor measurements have been performed, Puigcerdà town is marked with a circle.)**

Se ha aplicado el método de Nakamura (Nakamura, 1989) a los registros de ruido sísmico disponibles de Andorra y la Cerdanya. En la figura 2 se muestran los valores de las frecuencias fundamentales obtenidos en la cubeta de Andorra, considerando estos valores se han definido 5 zonas que se muestran también en la figura. Las variaciones de la frecuencia fundamental pueden ser debidas a cambios de la profundidad del basamento o a las características de los materiales que forman el suelo de los puntos donde se ha hecho la medida de ruido sísmico.

En la figura 3 se presentan las relaciones espectrales resultantes de la aplicación del método de Nakamura a los registros de ruido sísmico obtenidos en dos perfiles del valle de la Cerdanya. Las curvas en rojo siguen los valores de la frecuencia fundamental dibujando la geometría del basamento en cada perfil. La profundidad máxima del basamento en el valle es de 800m por lo que se obtienen valores bajos de la frecuencia fundamental, del orden de 0.3 Hz.



**Figura 2 – Mapa de la cubeta de Andorra con las zonas definidas en función del valor de la frecuencia predominante obtenida en cada punto. (Andorra map with the zones defined considering the fundamental frequency values.)**



**Figura 3 – Relaciones espectrales obtenidas en dos perfiles del valle de la Cerdanya, la línea roja sigue los valores de la frecuencia fundamental. (Spectral ratios in two sections of the Cerdanya Valley, red lines indicate the fundamental frequencies.)**

En la figura 4 se muestran las frecuencias fundamentales obtenidas en la ciudad de Puigcerdà, no se observan efectos locales destacables, la frecuencia fundamental responde a la geometría del basamento del valle de la Cerdanya caracterizado por una elevada profundidad.

#### 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA 1D. APLICACIÓN DEL MÉTODO LINEAL-EQUIVALENTE.

En las dos zonas de estudio se ha aplicado el método lineal-equivalente Proshake para obtener las funciones de transferencia que nos informen de la amplificación del movimiento del suelo en emplazamientos con características de subsuelo distintas. Previamente a la aplicación del método es necesario caracterizar adecuadamente las columnas de suelo y seleccionar un sismo de referencia en roca.

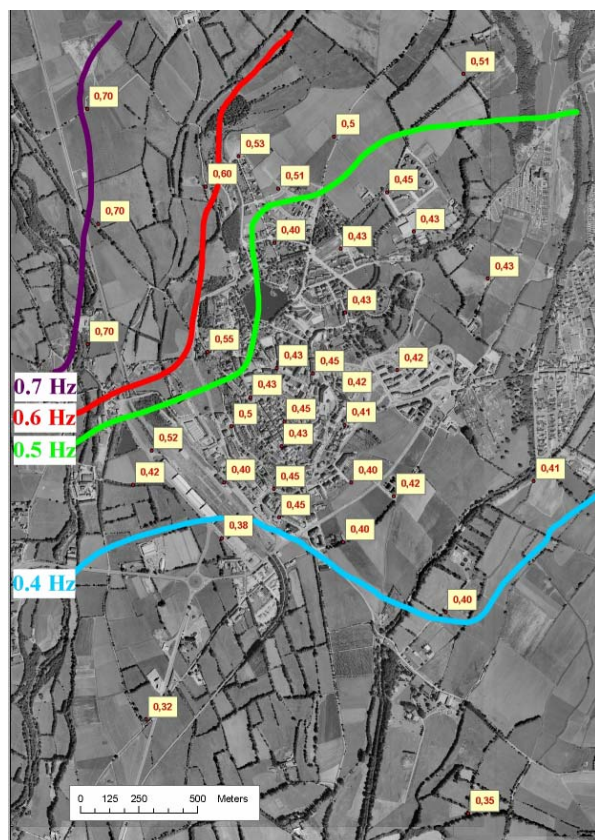


Figura 4 - Plano de la ciudad de Puigcerdà con las frecuencias fundamentales e isolinias de emplazamientos con el mismo valor de éstas. (Puigcerdà map with zones of similar fundamental frequency values.)

#### 4.1 Recogida de datos y definición de las columnas de suelo

Para definir las columnas de suelo que caracterizan los distintos emplazamientos se ha recopilado previamente la máxima información geológica y geotécnica disponible. En ambas zonas se ha realizado además una campaña de medidas de ondas superficiales por parte de un equipo de geofísica del BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) y se ha aplicado el método SASW para obtener perfiles de velocidad de ondas de cizalla (Nazarian and Stokoe, 1984).

Para la cubeta de Andorra se ha obtenido información de la geología superficial en el mapa geológico 1:50.000 (CRECIT, 2002). La información geotécnica del subsuelo se obtiene de la base de datos geotécnica de Andorra (CRECIT, 2001) que contiene 118 sondeos pertenecientes a 19 informes geotécnicos. Estos ponen de manifiesto la presencia de un relleno sedimentario poco profundo, compuesto, en su parte superior, por bloques y gravas cuaternarias en una matriz areno-limosa. Existen además para la cubeta de Andorra los resultados obtenidos en una campaña de prospección sísmica y eléctrica (Teixidó et al, 2003). Con toda la información disponible, se han caracterizado en la cubeta de Andorra la Vella-Escaldes-Engordany nueve columnas de suelo, cada una en uno de los emplazamientos donde se disponía de resultados de los sondeos eléctricos verticales.

Los datos que se disponen para la Cerdanya provienen de diferentes estudios: Mapas geológicos 1:50.000 de la serie MAGNA editados por el Instituto Geológico Minero Español (IGME). Una de las informaciones más útiles del mapa geológico es el perfil geológico de la zona de Martinet. A partir de este perfil se ha podido definir la profundidad de las columnas así como los materiales que forman cada una de sus capas. Se dispone también de diferentes estudios geotécnicos, la mayoría en los municipios de Puigcerdà, Alp y Bellver de Cerdanya. A partir de estos datos se han obtenido valores de la velocidad de las ondas de cizalla ( $V_s$ ), la densidad y la profundidad del nivel freático en las cinco columnas de suelo

situadas en la figura 7 sobre un perfil geológico representativo del valle de la Cerdanya, el sustrato rocoso está constituido por pizarras y su profundidad varía desde 140m hasta 800m, los materiales sedimentarios del valle se componen básicamente de conglomerados, lutitas y areniscas.

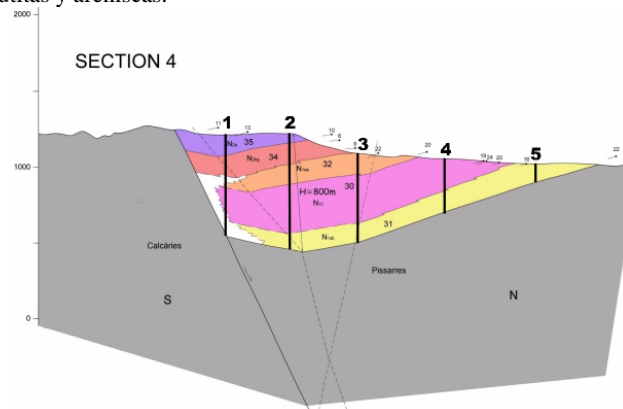


Figura 5 - Perfil geológico de la Cerdanya con la situación de las cinco columnas de suelo en las que se aplica Proshake. (Geologic section of Cerdanya valley with the soil columns for the Proshake calculations.)

#### 4.2 Selección del registro de entrada en roca

Para los cálculos de la función de transferencia de la columna de suelo con el programa ProShake es necesario disponer de un registro de entrada en roca que tenga un espectro de respuesta similar al obtenido en los cálculos de peligrosidad mencionados en el apartado 2, para ello se ha realizado una selección de registros en la base de datos de movimientos sísmicos europeos (European Strong-Motion Database, 2000). En la selección de los registros se ha procurado que sus espectros estén dentro de una banda de confianza del  $\pm 20\%$  del espectro que se ha adoptado para la zona de estudio. Una vez se han obtenido los registros se escalan con el PGA esperado en las zonas de estudio para un período de retorno de 475 años. En la figura 6 se presentan los espectros de respuesta en aceleración de los registros escogidos de la base de datos junto con el espectro de referencia con las bandas de error de  $\pm 20\%$ , observándose que el promedio de estos espectros se ajusta bien al espectro de referencia quedando dentro de las bandas de error.

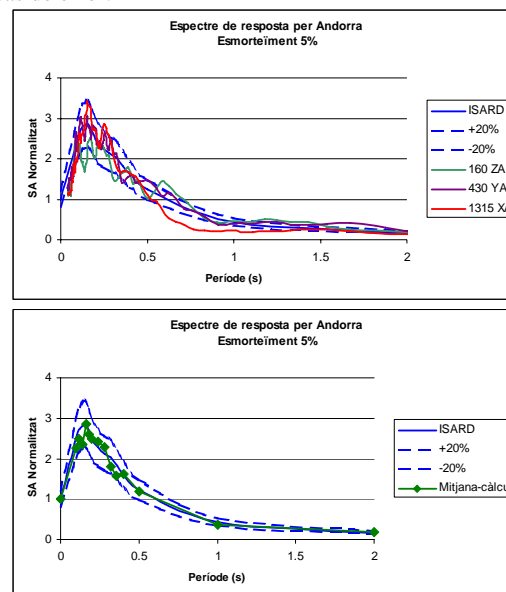


Figura 6 - Espectros de respuesta de los registros reales obtenidos de ESMD-2000 y espectro de referencia con las bandas de error del  $\pm 20\%$ . En la figura inferior, espectros de respuesta medio y espectro de referencia con las mismas bandas de error. (Response spectra of real records from ESMD-2000 and target spectrum  $\pm 20\%$ . At bottom mean response and target spectrum.)

### 4.3 Resultados obtenidos con el programa Proshake y comparación con los resultados obtenidos con el método Nakamura.

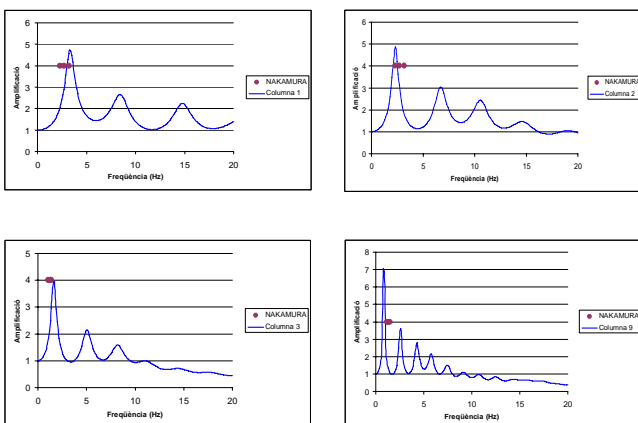
Una vez se ha definido el sismo de entrada y se han caracterizado las columnas de suelo con sus propiedades físico-mecánicas se ha aplicado el programa de modelización 1D ProShake. De este cálculo se han obtenido las funciones de transferencia para cada una de las columnas de suelo definidas en ambas zonas de estudio.

En la tabla 2 se muestra la frecuencia fundamental y el valor de amplificación para cada una de las 9 columnas definidas en la cubeta de Andorra y las 5 columnas definidas en la Cerdanya.

**Tabla 2 – Valores de la frecuencia fundamental y amplificación obtenidos en las columnas de suelo definidas en Andorra y la Cerdanya. (Fundamental frequency and amplification values obtained in the soil columns defined in Andorra and la Cerdanya).**

Cubeta de Andorra			La Cerdanya		
Col.	Frecuencia (Hz)	Amplif.	Col.	Frecuencia (Hz)	Amplif.
1	3.3	5	1	0.23	4
2	2.3	5	2	0.20	4
3	1.6	4	3	0.25	4
4	2.0	5	4	0.36	5
5	1.1	4	5	0.65	6
6	3.2	5			
7	1.0	4			
8	1.7	4			
9	0.9	7			

En ambas zonas se observan variaciones de la frecuencia fundamental del suelo asociadas a las variaciones de profundidad del basamento. Las amplificaciones del movimiento de suelo observadas en estas frecuencias están relacionadas con el contraste de impedancia entre las capas de sedimentos y el basamento. En la Cerdanya se observan amplificaciones a frecuencias mucho más bajas, entre 0.2 y 0.6 Hz, que en Andorra debido a la mayor profundidad del basamento. En la figura 7 se muestran las funciones de transferencia calculadas en cuatro columnas de suelo definidas en la cubeta de Andorra la Vella. Se observan los valores de amplificación obtenidos en la frecuencia fundamental y sus armónicos.



**Figura 7-Funciones de transferencia calculadas con el programa Proshake en la cubeta de Andorra la Vella junto con los valores de la frecuencia fundamental obtenidos mediante el método de Nakamura. (Transfer functions computed with Proshake in Andorra la Vella together with the fundamental frequencies obtained with the application of Nakamura's method.)**

En la figura se ha añadido también el valor de la frecuencia fundamental obtenida con la aplicación del método de Nakamura a los registros de ruido sísmico en los emplazamientos que se encuentran cercanos a estas columnas. Vemos que este valor coincide bastante bien con la frecuencia fundamental de la función de transferencia.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha aplicado el método 1D lineal-equivalente (Proshake) en diferentes emplazamientos de la cubeta de Andorra la Vella y la Cerdanya y se han obtenido las correspondientes funciones de transferencia. En la cubeta de Andorra la Vella la frecuencia fundamental varía desde 0.9Hz hasta 3.3Hz, con amplificaciones del movimiento del suelo en un factor entre 4 y 7. Las variaciones de la frecuencia fundamental se asocian a las variaciones de la profundidad del basamento. En las columnas de suelo de la Cerdanya se obtienen valores bajos de la frecuencia fundamental, entre 0.2 Hz y 0.6 Hz asociados a la gran profundidad del basamento. Las amplificaciones son del orden de 4 a 6.

Se han calculado los espectros de respuesta en aceleración PSA de los registros obtenidos para cada una de las columnas de suelo definidas. El comportamiento de la amplificación del espectro de respuesta y el valor del PGA del suelo se ha relacionado con la frecuencia fundamental del suelo.

En ambas zonas de estudio, los valores de la frecuencia fundamental calculados mediante la simulación numérica en las columnas definidas se aproximan a los valores obtenidos de la aplicación del método de Nakamura a las medidas de ruido sísmico realizadas en los puntos cercanos a estas columnas.

Los efectos de amplificación local obtenidos en las columnas de suelo de las distintas zonas se tendrán en cuenta tanto en términos de valores espectrales como de intensidad, conjuntamente con las evaluaciones de la vulnerabilidad de los edificios, para la estimación de riesgo sísmico y la realización de escenarios de daños en las zonas de estudio.

## 6. REFERENCIAS

- BRGM (1990). "Carte Géologique de la France E 1:50 000. Feuille 1093 Fortangente". Bureau de Recherches Géologiques et Minières. France.
- CRECIT (2001). "Base de Dades Geotècniques d'Andorra". Institut d'Estudis Andorrans. Andorra.
- CRECIT (2002). Mapa geològic d'Andorra 1:50.000. DL: AND. 183-2002. ISBN. 99920-0-291-3.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface". Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 30-1, pp. 25-33.
- Nazarian, S. y K.H. Stokoe (1984). "In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves". Proceedings of the world conference on Earthquake Engineering, Vol. 8, San Francisco, pp: 21-28.
- Olivera, C., A. Riera, J. Lambert, E. Banda y P. Alexandre (1994a). "Els Terratrèmols de l'any 1373 al Pirineu: efectes a Espanya i França". Monografies núm 3, 220 pp. Servei Geològic de Catalunya. Barcelona.
- Olivera, C., A. Riera, B. Martínez y A. Roca (1994b). "Revision of the 1427 earthquakes in the Eastern Pyrenees. Delimitation of the epicentral area and intensity assessment for the March 15 and May 15 events". Historical Investigation of European Earthquakes, 2, pp. 169-179.
- Susagna, T. y X. Goula (1999): Catàleg de sismicitat, Atlas sísmic de Catalunya, Vol 1, 436 pp.
- Teixidó, T., I. Palomeras, P. Valls y P. Martínez. (2003). Prospecció sísmica a la cubeta d'Andorra la Vella-Escaldes-Engordany. Horitzó (CRECIT). pp: 3-25.