

MICROZONACIÓN SÍSMICA EN EL PIRINEO ORIENTAL EN TÉRMINOS DE ACELERACIÓN E INTENSIDAD MACROSÍSMICA

A. Macau¹, S. Figueras¹, T. Susagna¹, B. Colas², B. Le Brun³, A. Bitri², J. Cirés¹,
M. González⁴ y A. Roullé²

(1) Institut Geològic de Catalunya (IGC)

(2) Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

(3) Antes en el BRGM

(4) Centre de Recerca en Ciències de la Terra de l'Institut d'Estudis Andorrans (CRECIT)
amacau@igc.cat

RESUMEN

En el marco del proyecto ISARD (Información Sísmica Automática Regional de Daños) se han seleccionado los valles de la Cerdaña y de Andorra la Vella como zonas piloto para el estudio del riesgo sísmico en los Pirineos. La cubeta de Andorra la Vella tiene una fuerte densidad de población, en ella se concentran la mayoría de edificios, infraestructuras y actividad económica del país. Mientras que en la Cerdaña la distribución de la población es más dispersa y repartida en pequeños núcleos urbanos. Para el estudio de riesgo sísmico se han considerado dos escenarios. Un escenario probabilista con un período de retorno de 475 años, con valores de intensidad de VII y de a_{\max} de 0.12g. Y un escenario determinista definido por el sismo del 2 de Febrero de 1428, con intensidades que varían entre VI-VII y VII-VIII.

La cubeta de Andorra la Vella se caracteriza por una geología de valles glaciares con capas finas de sedimentos cuaternarios. Por otro lado, los sedimentos que se encuentran en el Valle de la Cerdanya tienen una potencia que puede llegar hasta los 800 metros y su origen es del Mioceno.

Se ha caracterizado el comportamiento del suelo en la Cerdaña y Andorra en términos del espectro de respuesta en aceleraciones y del incremento de intensidad macrosísmica debido al efecto local. Partiendo de los resultados obtenidos se ha realizado una zonación sísmica de las dos regiones agrupando aquellas zonas con un comportamiento sísmico parecido. En Andorra se han obtenido a_{\max} de 0.38g e intensidades de VIII-IX, y en la Cerdaña a_{\max} de 0.19g e intensidades de VIII-IX.

Palabras clave: microzonación sísmica, efecto de sitio, espectro de respuesta, intensidad.

SUMMARY

Within the framework of the ISARD (Information of Seismic Automatic Regional Damage) project, the Cerdanya and Andorra la Vella valleys have been selected as pilot zones for the study of seismic risk. The Andorra la Vella basin has a strong density of population, where most of buildings, infrastructures and economic activity are concentrated. Whereas in the Cerdanya valley the population distribution is spreader and is distributed in small urban nuclei. For the study of seismic risk two seismic scenarios have been considered. A probabilistic scenario with a return period of 475 years, with a macroseismic intensity value of VII and a PGA value of 0.12g. And a deterministic scenario defined by the 2nd of February 1428 earthquake, with intensity values that range between VI-VII and VII-VIII.

The Andorra la Vella basin is characterized by glaciers valleys with geology of thin quaternary sedimentary layers. On the other hand, the Cerdanya valley Miocene sediments,

have a maximum thickness of 800 meters.

Cerdanya and Andorra soil behavior has been characterized in terms of the acceleration response spectra and the macroseismic intensity increase. Considering the obtained results, a seismic zonation for both regions has been performed grouping those zones with similar seismic behavior. In Andorra, PGA values of 0.38g and intensity of VIII-IX and in Cerdanya PGA values of 0.19g and intensity of VIII-IX have been obtained.

Keywords: seismic microzonation, site effects, response spectrum, intensity.

1. Introducción

La sismicidad histórica y los datos de 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., 2006). Entre los años 1427 y 1428 tuvo lugar en el Pirineo Oriental una serie sísmica con intensidad máxima de IX (Olivera et al., 2006). 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 seísmos del Valle de Arán en 1923 (I=VIII) y de Arette en 1967 (I=VIII). Recientemente, con el aumento de la población y de las actividades económicas, algunos seísmos de magnitud moderada han causado pérdidas económicas considerables, por ejemplo los sismos de Saint Paul de Fenouillet (M=5.2) en Febrero de 1996, Hautes Pyrénées (M=4.7) en Mayo de 2002, y en el Ripollès (M=4.0) en Septiembre de 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 partiendo de un catálogo sísmico unificado, considerando la zonación sismotectónica y una atenuación adaptada a la zona. Este estudio se ha llevado a cabo de forma dual, desde el punto de vista de las aceleraciones espectrales y desde el punto de vista de las intensidades, considerando un periodo de retorno de 475 años. Para las dos zonas, Cerdanya y Andorra, se han obtenido valores de aceleración máxima (PGA) de 0.12g y intensidad de VII (Secanell et al., 2007a y 2007b). Los espectros de respuesta propuestos en los estudios de peligrosidad para las dos zonas son muy similares por tanto se considerará el mismo espectro de referencia para ambas.

Uno de los objetivos del proyecto ISARD es la estimación del riesgo sísmico y la realización de escenarios de daños en Andorra y en la Cerdanya. Los diferentes estudios que se han llevado a cabo para la realización de la microzonación sísmica de estas regiones se presentan en este trabajo.

Andorra es un país montañoso caracterizado por una geología de valles glaciares cuaternarios, 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 región de la Cerdanya se localiza también en el Pirineo, es un valle sedimentario Miocénico profundo, con una potencia de sedimentos que llega a los 800 metros. Comprende una zona rural muy extensa, la distribución de población es más dispersa que en Andorra, 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, principal núcleo urbano de la región.

En ambos valles se ha realizado una recopilación de los 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 microzonación sísmica que será de gran utilidad, conjuntamente con los estudios de vulnerabilidad, para la evaluación del riesgo sísmico en estos valles.

2. Campaña de medidas de ruido sísmico

En la cubeta de Andorra la Vella y en el valle de la Cerdanya se han realizado campañas de medidas de ruido sísmico para la obtención de las frecuencias fundamentales del suelo. Para la selección de los puntos de medida se han tenido en cuenta las diferencias de topografía, de geología, de geotecnia y la facilidad de acceso a los diferentes emplazamientos. El equipo utilizado para las campañas de medidas de ruido sísmico está formado por un digitalizador CityShark de la casa LEAS y un sismómetro triaxial Lennartz de 5 segundos. Se realizaron medidas con ventanas de tres minutos con un muestreo de 0.01 segundos. En cada emplazamiento se han hecho varias medidas, repitiéndolas en los casos que ha habido un 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 obtenido registros en 47 emplazamientos diferentes.

Se ha aplicado el método de Nakamura (Nakamura, 1989) a los registros de ruido sísmico disponibles. En la figura 1 se muestran los valores de las frecuencias fundamentales obtenidos en la cubeta de Andorra, considerando estos valores se han definido las tres zonas.

Se observan importantes variaciones de la frecuencia fundamental en pocos metros de distancia (de 1.2Hz a 3.0Hz en 200 metros). Estas variaciones de la frecuencia fundamental pueden ser debidas a cambios bruscos de la profundidad del basamento o a cambios de los materiales que forman el suelo de los emplazamientos donde se ha hecho la medida de ruido sísmico. En una campaña de prospección sísmica realizada en la cubeta de Andorra la Vella (Teixidó et al., 2003) se obtuvo que los materiales que forman el suelo son los mismos en toda la cubeta: limos, arenas, gravas y bloques. La profundidad del basamento de la cubeta varía desde 20 metros al sur de la cubeta hasta superar los 60 metros en les Escaldes. Partiendo de estos resultados se puede relacionar la variación de la frecuencia fundamental del suelo con la variación de la profundidad del basamento rocoso en cada punto:

- Zona A (Frecuencia fundamental entre 2.2 y 3.2Hz)
Profundidad del basamento entre 20-25 metros.
- Zona B (Frecuencia fundamental entre 0.9 y 1.5Hz)
Profundidad del basamento entre 35-40 metros.
- Zona A (Frecuencia fundamental entre 1.0 y 2.0Hz)
Profundidad del basamento entre 30-50 metros.

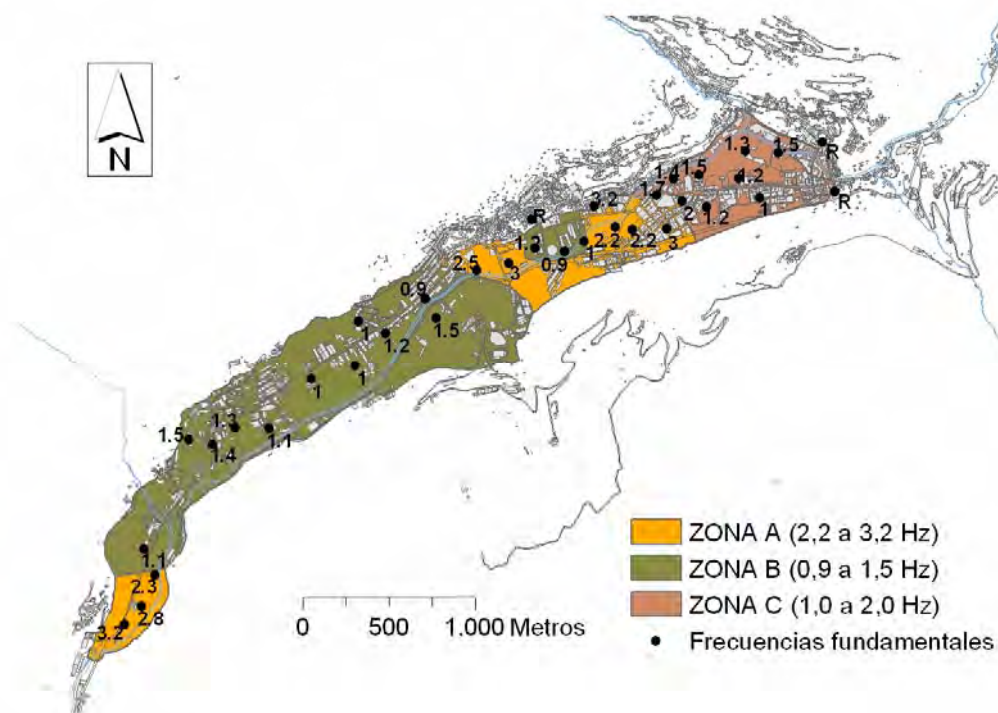


Figura 1: Mapa de la cubeta de Andorra la Vella con las zonas definidas en función del valor de la frecuencia fundamental obtenida en cada emplazamiento.

En el valle de 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, el núcleo urbano más importante de la región (figura 2). En total se han realizado en la Cerdanya registros en 115 emplazamientos diferentes.

En la figura 3 se muestran las relaciones espectrales resultantes de la aplicación del método de Nakamura a los registros de ruido sísmico obtenidos en los perfiles del valle de la Cerdanya. La frecuencia fundamental en el valle varía entre 0.3 y 5.0Hz. Las curvas en rojo siguen los valores de la frecuencia fundamental dibujando la geometría del basamento rocoso prevista en cada perfil (Rivero, 1993). Se observa que los máximos de la frecuencia fundamental corresponden a los mínimos de profundidad del basamento, y los mínimos de frecuencia fundamental a los máximos de profundidad. La profundidad máxima del basamento rocoso en el valle es de 800 metros por lo que se obtienen valores bajos de la frecuencia fundamental, del orden de 0.3Hz.

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

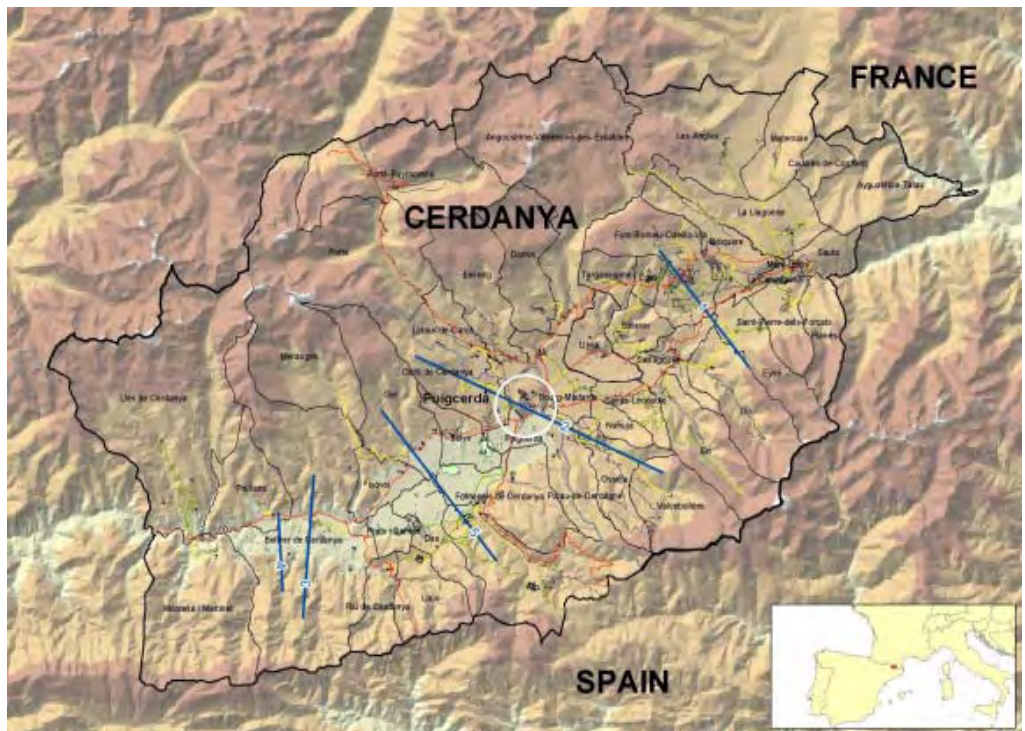


Figura 2: Mapa del valle de la Cerdanya con los perfiles donde se han realizado medidas de ruido sísmico, la población de Puigcerdà se señala con un círculo blanco.

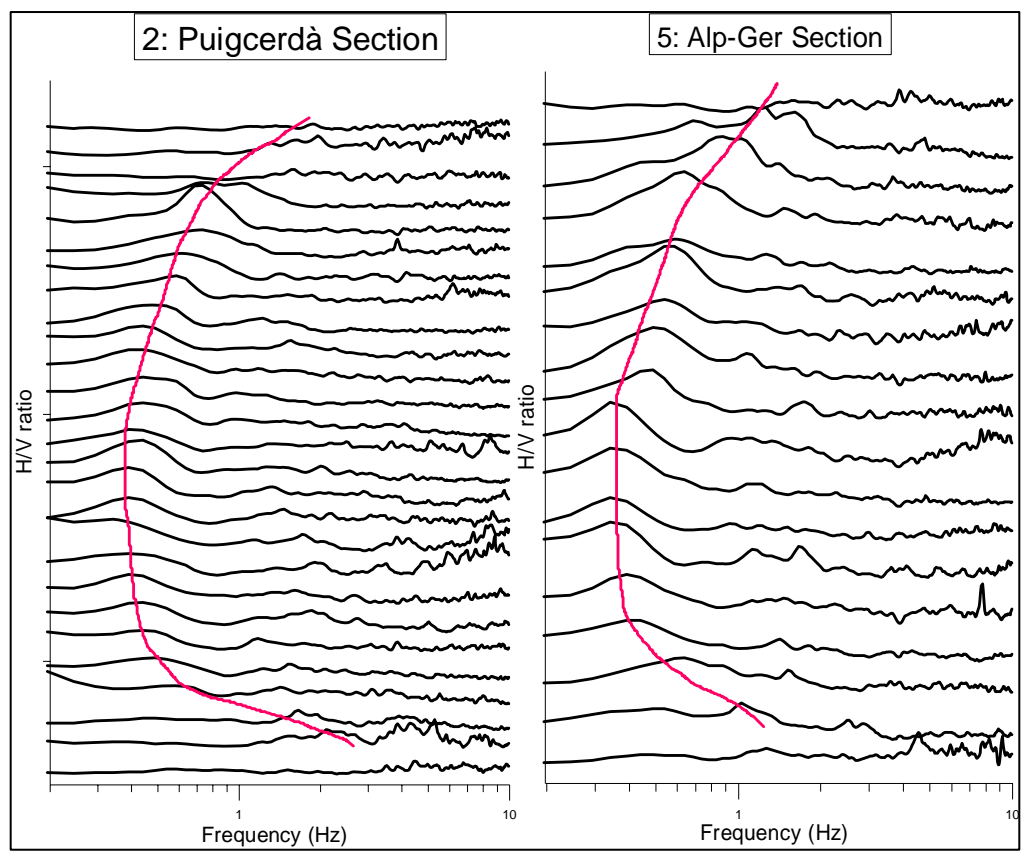


Figura 3: Relaciones espectrales obtenidas en dos perfiles del valle de la Cerdanya, la línea roja sigue los valores de la frecuencia fundamental.

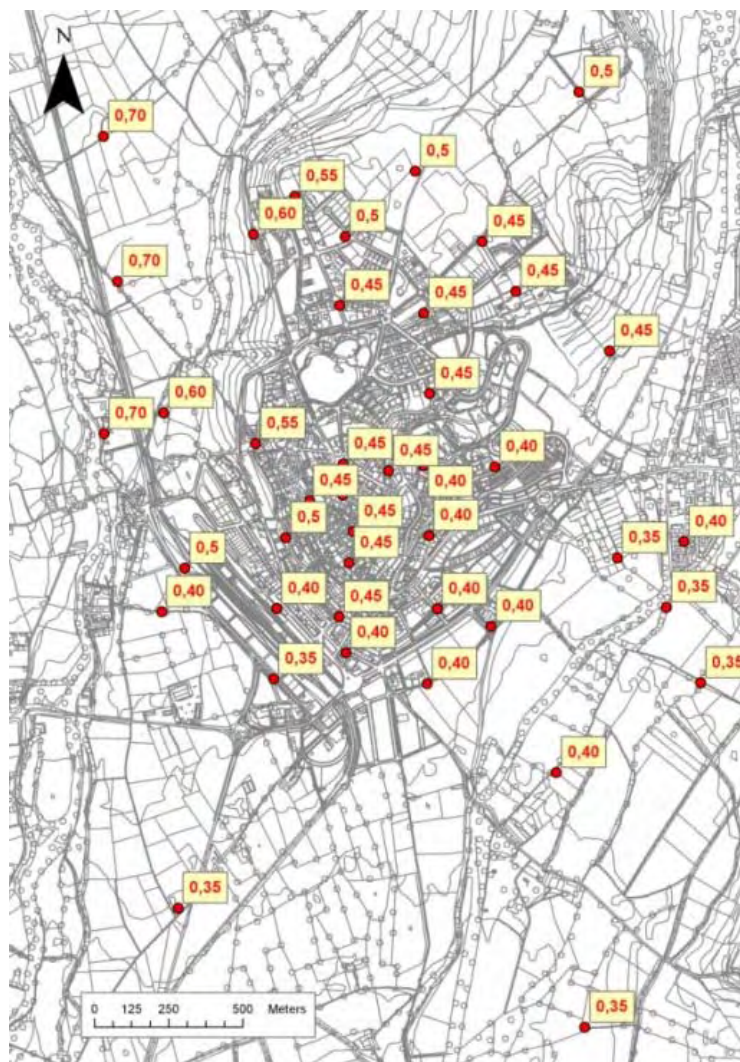


Figura 4: Mapa de la ciudad de Puigcerdà con las frecuencias fundamentales del suelo obtenidas mediante la aplicación del método de Nakamura.

3. 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 y el movimiento del suelo en emplazamientos con características del suelo distintas. Previamente a la aplicación del método es necesario caracterizar adecuadamente las columnas de suelo y seleccionar un acelerograma de referencia en roca.

3.1. 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. Además, en ambas zonas se ha realizado una campaña de medidas de ondas superficiales por parte del equipo de geofísica del BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) (Bitri et al., 2004) y se ha aplicado el método SASW para obtener los perfiles verticales de velocidad de ondas de cizalla (Bitri et al., 1997).

Para la cubeta de Andorra la Vella se ha obtenido información de la geología superficial del mapa geológico 1:50.000 (CRECIT, 2002). La información geotécnica del subsuelo se ha obtenido de la base de datos geotécnica de Andorra (CRECIT, 2001) que contiene 118 sondeos pertenecientes a 19 informes geotécnicos. Éstos 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 la Vella 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 nueve columnas de suelo, con importantes contrastes de la velocidad de las ondas de cizalla entre los depósitos cuaternarios y el basamento rocoso.

Los datos que se disponen para el valle de 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 (Cirés et al., 2007, en edición). A partir de este perfil se ha podido estimar 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 cinco columnas de suelo. En la figura 5 se localizan estas columnas de suelo en un perfil geológico representativo del valle de la Cerdanya, el basamento rocoso está formado por pizarras y su profundidad varía entre 140 y 800 metros, los materiales sedimentarios del valle están formados básicamente por conglomerados, lutitas y areniscas del periodo Neógeno.

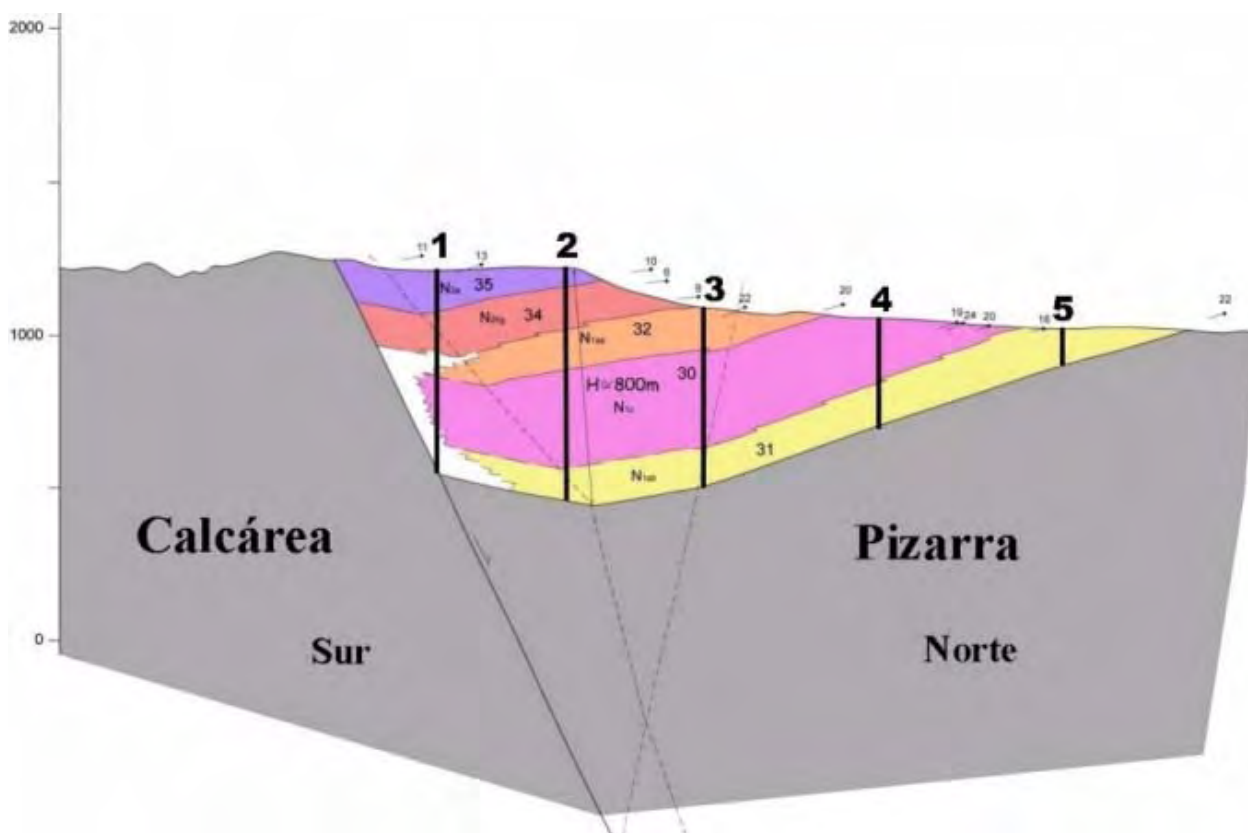


Figura 5: Perfil geológico del valle de la Cerdanya con la situación de las cinco columnas en las que se aplica el programa de cálculo ProShake.

3.2. Selección del acelerograma de entrada en roca

Para los cálculos de la función de transferencia de la columna de suelo con el programa de cálculo ProShake es necesario disponer de un acelerograma de entrada en roca que tenga un espectro de respuesta similar al obtenido en los cálculos de peligrosidad mencionado en la introducción. Para ello se ha realizado una selección de registros en la base de datos movimientos sísmicos europeos (Ambraseys et al., 2000). Se han seleccionado un total de cuatro acelerogramas cuyos espectros están dentro de una banda de confianza del $\pm 20\%$ de diferencia respecto al espectro adoptado para la zona de estudio. Los acelerogramas obtenidos se han escalado a un PGA de 0.12g calculado para un periodo de retorno de 475 años en las zonas de estudio. En la figura 6 se muestran los espectros de respuesta en aceleración de los registros escogidos de la base de datos junto con el espectro de referencia, obsérvese que el promedio de estos espectros siempre está dentro del $\pm 20\%$ de diferencia respecto al espectro del acelerograma de referencia.

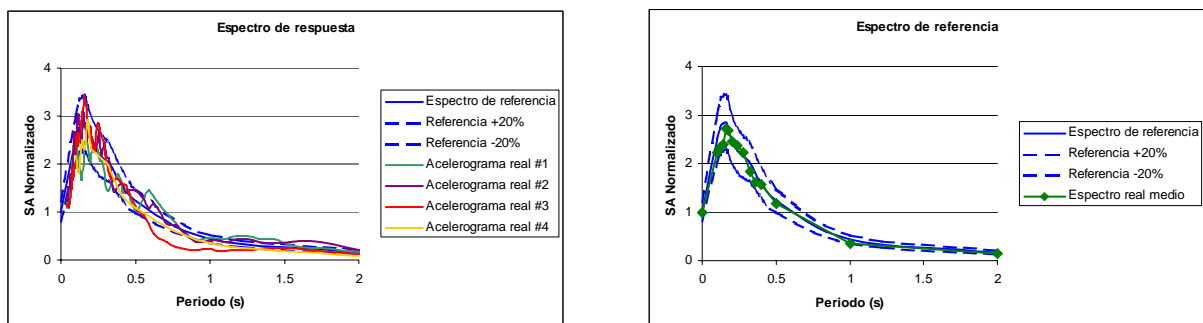


Figura 6: A la izquierda, espectros de respuesta de los acelerogramas reales obtenidos de la base de datos de Ambraseys et al., (2000) y espectro de referencia con bandas de error del $\pm 20\%$. A la derecha, espectro de respuesta medio y espectro de referencia con bandas de error del $\pm 20\%$.

3.3. Cálculos numéricos.

Una vez se ha definido el acelerograma de entrada en roca y se han caracterizado las columnas de suelo con sus propiedades físico – mecánicas se ha aplicado el programa de cálculo ProShake. De estos cálculos se ha obtenido la función de transferencia y el movimiento del suelo para las columnas de suelo definidas en ambas zonas de estudio. Se han calculado los espectros de respuesta en aceleración (SA) y el valor de la Intensidad de Arias (AI) de los acelerogramas sintéticos obtenidos en las columnas de suelo. La Intensidad de Arias y la intensidad macrosísmica (I_L) se pueden relacionar a partir de correlaciones empíricas. Se usa la relación propuesta por Cabañas et al. (1997) para la zona del Mediterráneo (ecuación 1).

$$\ln(\Delta I) = 1.50 \cdot I_L - 6.42 \tag{1}$$

De este modo, el incremento de intensidad (ΔI_i) representativo de cada columna de suelo se puede obtener, mediante la ecuación 2, a partir del cociente entre la Intensidad de Arias en suelo y en roca (AI_S/AI_R)

$$\Delta I_i = 0.66 \cdot \ln\left(\frac{AI_S}{AI_R}\right) \tag{2}$$

Estos valores se usarán para incrementar el valor de la intensidad para un suelo de referencia en ambas zonas de estudio.

4. Resultados de la cubeta de Andorra la Vella

En la cubeta de Andorra la Vella se han considerado un total de nueve columnas de suelo. En la tabla 1 se muestran los valores de la frecuencia fundamental y la amplificación para cada una de ellas. En la figura 7 se presentan las funciones de transferencia calculadas en dos columnas de suelo juntamente con la frecuencia fundamental obtenida con la aplicación del método de Nakamura en emplazamientos cercanos a estas columnas de suelo. Los valores de la frecuencia fundamental obtenidos con el método de Nakamura en emplazamientos cercanos a las columnas de suelo concuerdan con los valores de la frecuencia fundamental de la función de transferencia.

Columna de suelo	Frecuencia Fundamental (Hz)	Amplificación
1	4.6	6
2	3.4	5
3	2.4	5
4	2.7	6
5	1.3	5
6	4.5	6
7	1.5	6
8	2.6	5
9	1.0	8

Tabla 1: Valores de la frecuencia fundamental y de la amplificación obtenidos en las columnas de suelo definidas en la cubeta de Andorra la Vella.

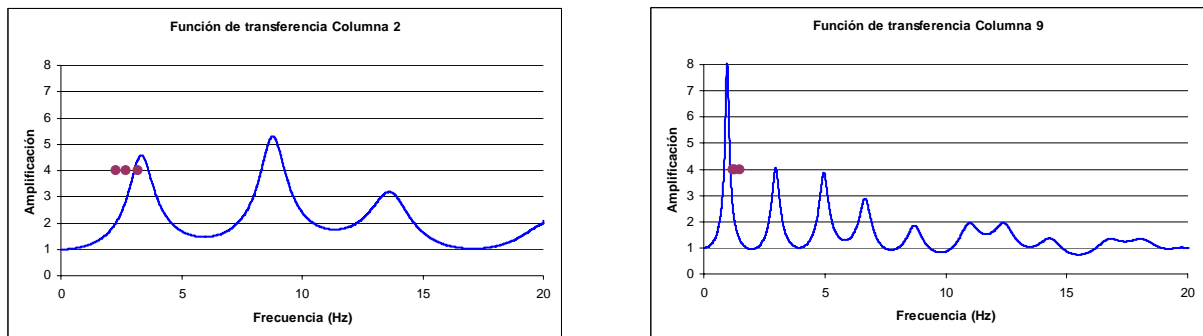


Figura 7: Funciones de transferencia de las columnas 2 y 9 junto con las frecuencias fundamentales (punto rojo) obtenidas con la aplicación del método de Nakamura en emplazamientos cercanos a estas columnas.

Las variaciones de la frecuencia fundamental están asociadas a variaciones de la profundidad del basamento. Las amplificaciones observadas en el movimiento del suelo están relacionadas con el contraste de las ondas de cizalla entre las capas de suelo de las columnas y el basamento rocoso. Se han calculado los espectros de respuesta en aceleración (SA) de los diferentes acelerogramas sintéticos obtenidos en las columnas de suelo. En la figura 8 se muestran los espectros de respuesta calculados en dos columnas de suelo y en roca.

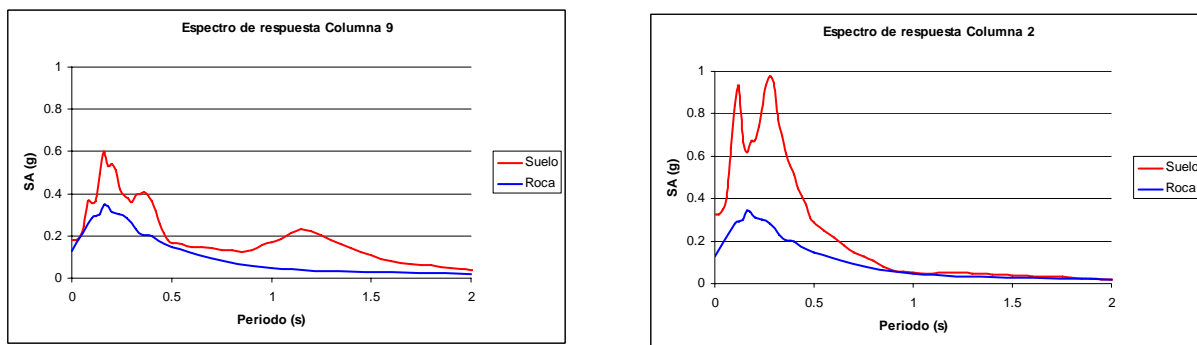


Figura 8: Espectros de respuesta en aceleración (SA) para las columnas de suelo 2 y 9 junto con el espectro de respuesta en aceleración en roca.

Se ha realizado una zonación sísmica de la cubeta de Andorra la Vella basada en el comportamiento de los espectros de respuesta obtenidos en cada columna de suelo. Las cinco zonas propuestas se muestran en la figura 9.

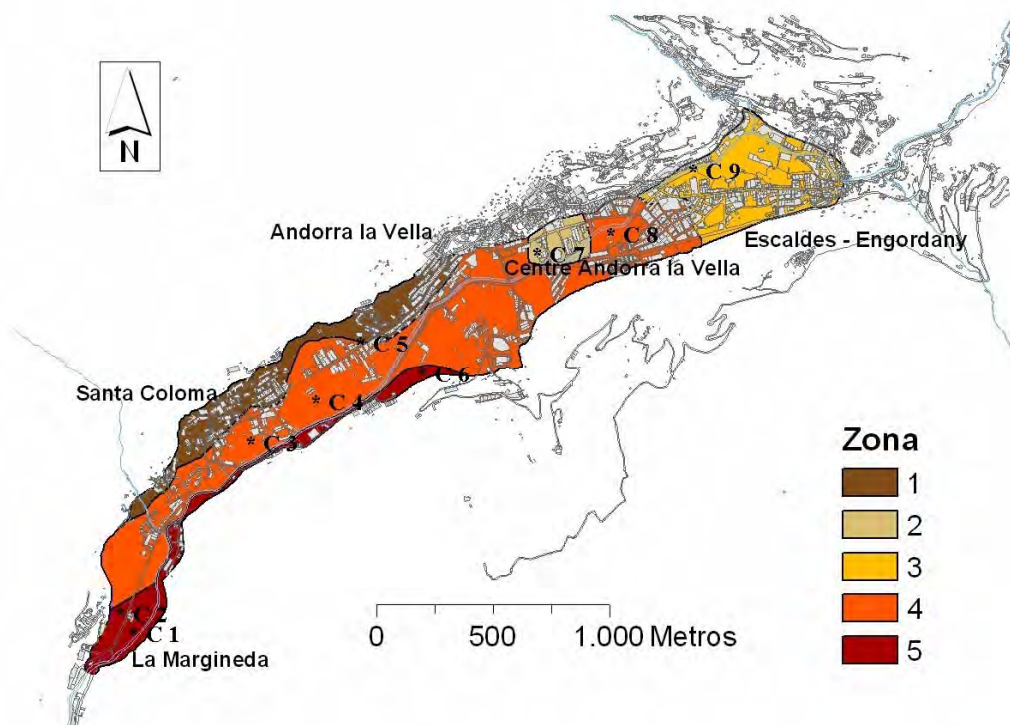


Figura 9: Zonación sísmica de la cubeta de Andorra la Vella basada en el comportamiento de los espectros de respuesta en cada columna de suelo.

En las zonas 3, 4 y 5 las amplificaciones se producen en todo en rango de frecuencias. En las zonas 1 y 2 las amplificaciones se producen en las bajas frecuencias.

Por otro lado la amplificación se ha caracterizado en términos del incremento de la intensidad macrosísmica producido por efectos de suelo usando la metodología propuesta en el apartado 3.3. La tabla 2 muestra el incremento de intensidad macrosísmica obtenido en las cinco zonas definidas en la cubeta de Andorra la Vella.

Zona	ΔI
1	+0.0
2	+0.5
3	+1.0
4	+1.0
5	+1.5

Tabla 2: Incremento de la intensidad obtenido en la cubeta de Andorra la Vella.

De este modo la zonación sísmica de la cubeta de Andorra la Vella se ha caracterizado en términos del incremento de intensidad macrosísmica, se han definido cuatro zonas con valores de incremento de intensidad entre +0.0 y +1.5 grados.

5. Resultados en el valle de la Cerdanya

En un perfil geológico representativo del valle de la Cerdanya se han definido cinco columnas de suelo. También se han definido columnas de suelo de depósitos cuaternarios blandos, presentes en algunas zonas del área de estudio, para caracterizar su comportamiento. En la figura 10 se presentan las funciones de transferencia calculadas en dos de las columnas de suelo definidas a lo largo del perfil geológico del valle de la Cerdanya a partir del mismo acelerograma de entrada escogido para la cubeta de Andorra la Vella. Se observa que la variación de la frecuencia fundamental del suelo calculada a lo largo del perfil responde a la variación de la profundidad del basamento. Este comportamiento coincide con el observado en los valores de la frecuencia fundamental del suelo obtenidos con el método del cociente espectral H/V de ruido sísmico: los máximos de la frecuencia fundamental corresponden a los mínimos de profundidad del basamento, y los mínimos de frecuencia fundamental a los máximos de profundidad.

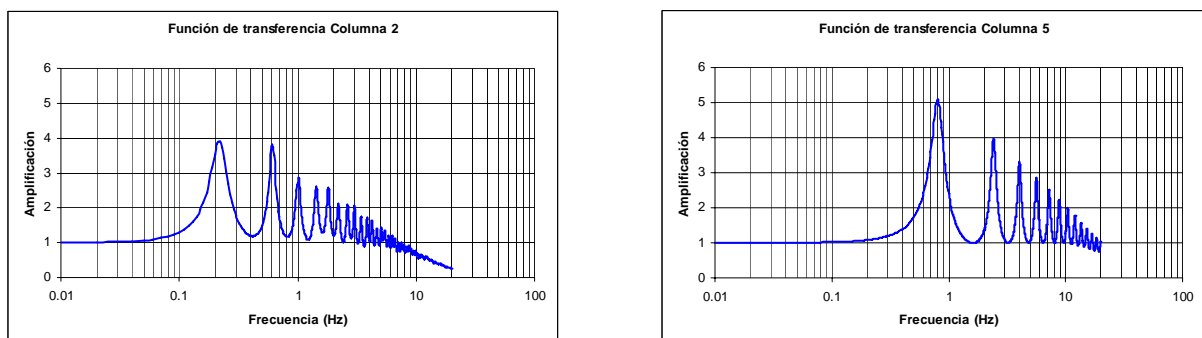


Figura 10: Funciones de transferencia de las columnas 2 y 5 definidas en el perfil geológico del valle de la Cerdanya.

Se han calculado los espectros de respuesta en aceleración (SA) de los diferentes acelerogramas sintéticos obtenidos en las columnas de suelo. En la figura 11 se muestran los espectros de respuesta calculados en dos columnas de suelo y en la roca.

Los espectros de respuesta en aceleraciones obtenidos en las columnas de suelo definidas en el perfil geológico del valle de la Cerdanya tienen un comportamiento similar, con variaciones en la frecuencia del pico de amplificación, localizado en las bajas frecuencias en las columnas de suelo más profundas y en las altas frecuencias en las columnas menos profundas.

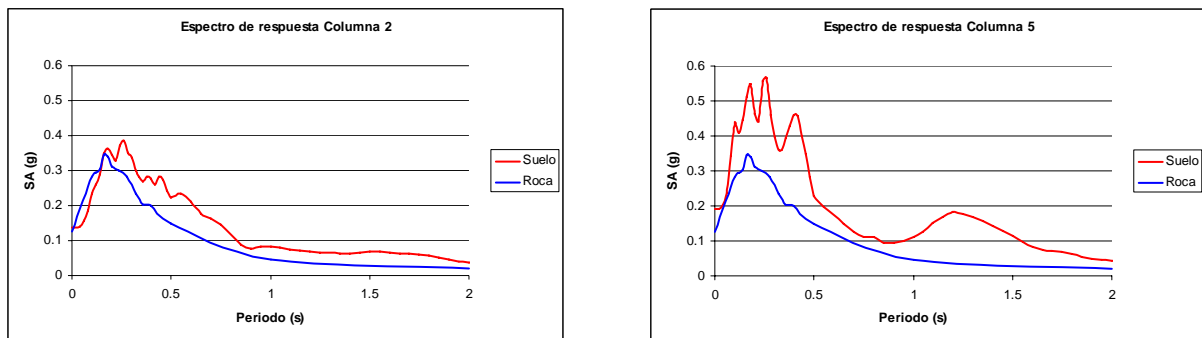


Figura 11: Espectros de respuesta en aceleración (SA) para las columnas de suelo 2 y 5 definidas en el perfil geológico del valle de la Cerdanya junto con el espectro de respuesta en aceleración en roca.

Se han calculado los espectros de respuesta de los acelerogramas registrados en dos estaciones acelerométricas permanentes instaladas en la Cerdanya por el IGC (http://www.igc.cat/web/gcontent/ca/sismologia/igc_sismologia_xaccel.html). Una de estas estaciones está instalada sobre roca, y la otra está instalada sobre suelo con características similares a la columna #5 del perfil geológico de la Cerdanya. El comportamiento, especialmente la frecuencia fundamental, de los espectros de respuesta en aceleraciones de los registros reales es similar a los resultados obtenidos en la columna #5.

En el marco del proyecto ISARD se ha realizado una zonación geotécnica del valle de la Cerdanya (Colas et al., 2006). La zonación geotécnica está basada en un mapa litoestratigráfico simplificado incluyendo información de medidas geofísicas (SASW y H/V), información de la base de datos de pozos del BRGM, y de la síntesis geológica y geofísica de la cuenca Neógena de la Cerdanya. La zonación final (figura 12) consiste en:

- R: Formaciones rocosas y depósitos cuaternarios de menos de 5 metros de profundidad.
- Nb: Depósitos neógenos.
- Qb: Depósitos cuaternarios cubriendo los depósitos neógenos.
- S: Depósitos cuaternarios blandos cubriendo depósitos cuaternarios duros.
- E: Depósitos blandos finos cubriendo el basamento rocoso (de 5 a 20 metros de profundidad).

Partiendo de los espectros de respuesta en aceleración (SA) en los diferentes tipos de suelo y de la clasificación geotécnica del valle de la Cerdanya se ha realizado una zonación agrupando aquellas zonas que tienen un espectro de respuesta similar para un periodo de retorno de 475 años. En la clase de suelo R no se produce amplificación, éste es el que se considera como referencia. En las clases de suelo Nb, Qb y S las amplificaciones se producen en las bajas frecuencias. En la clase de suelo E la amplificación se produce en todo el rango de frecuencias.

La amplificación del suelo también se ha caracterizado en términos del incremento de intensidad macrosísmica, usando la metodología propuesta en el apartado 3.3. Los resultados obtenidos en el valle de la Cerdanya, mostrados en la tabla 3, se han clasificado en términos de las litologías de la Cerdanya.

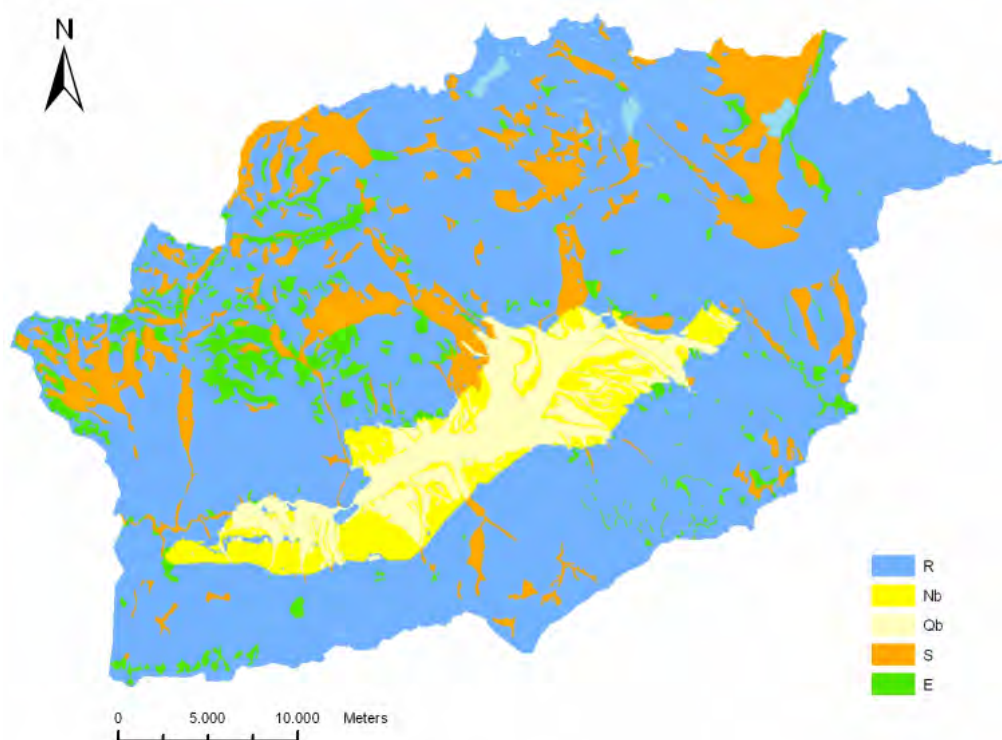


Figura 12: Mapa de la zonación geotécnica del valle de la Cerdanya.

Clase de suelo	ΔI
R	+0.0
Nb	+0.5
Qb	+0.5
S	+0.5
E	+1.0

Tabla 3: Incremento de la intensidad para cada clase de suelo en el valle de la Cerdanya.

La mayor parte del valle de la Cerdanya tiene un incremento de intensidad macrosísmica entre +0.0 y +0.5 grados. Sólo algunos depósitos cuaternarios localizados en las zonas montañosas muestran un incremento de intensidad de +1.0.

6. Peligrosidad sísmica a escala local en Andorra y la Cerdanya

Conocida la peligrosidad sísmica y los efectos de sitio de la cubeta de Andorra la Vella y del valle de la Cerdanya se puede obtener la peligrosidad sísmica a escala local para ambas zonas. Se han considerado dos escenarios diferentes: un escenario probabilista con un periodo de retorno de 475 años en aceleraciones y en intensidades (mapa de peligrosidad a escala local), y un escenario determinista en intensidades definido por un sismo análogo al ocurrido el 2 de Febrero de 1428 (escenario sísmico). En el estudio de este terremoto se han determinado los siguientes parámetros focales (Olivera et al., 2006): $M_w=6.5$, profundidad epicentral de 9km, intensidad epicentral de IX grados y intensidad en Puigcerdà de VIII grados. Partiendo de estos datos se proponen valores de la intensidad, para la Cerdanya y Andorra, utilizando una relación de atenuación (Sponheuer, 1960). Se obtienen valores de intensidad, para un suelo de tipo medio, que están comprendidos entre VI-VII en Andorra y VII-VIII en el extremo oriental de la Cerdanya (figura 13).

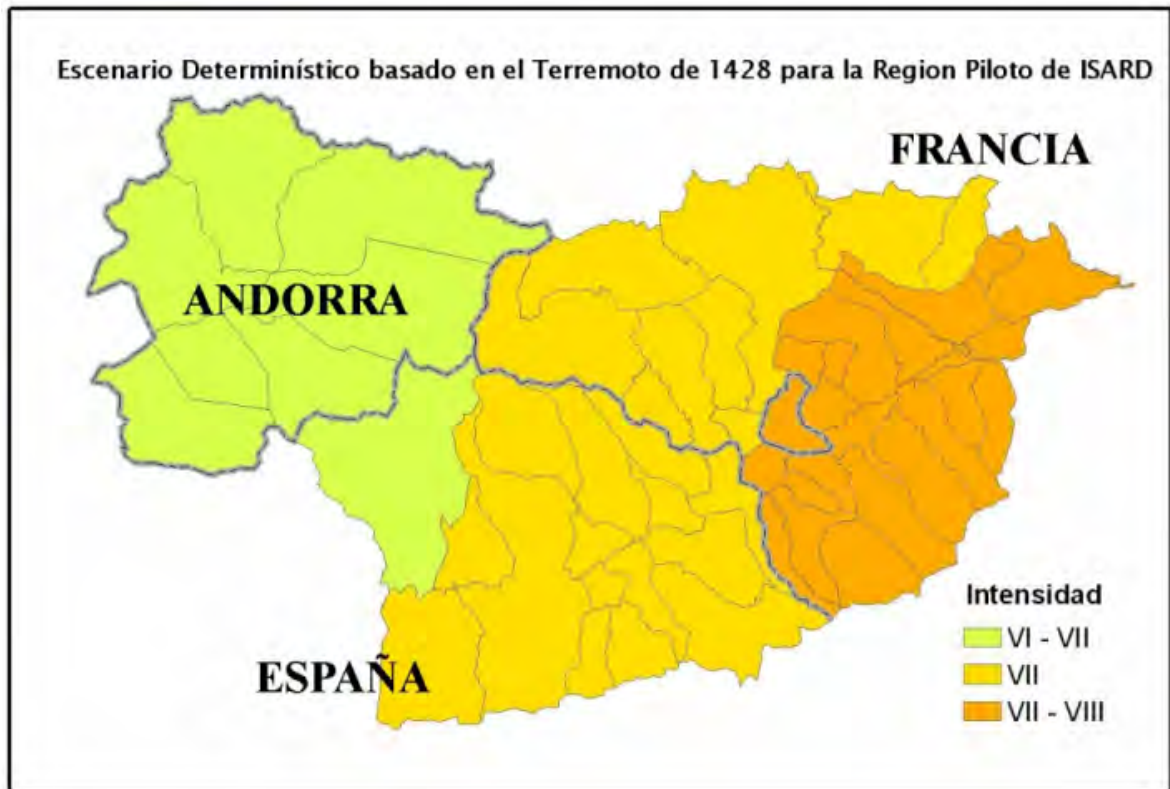


Figura 13: Escenario determinista propuesto en el proyecto ISARD para la Cerdanya y Andorra basado en el sismo de 2 de Febrero de 1428.

6.1. Cubeta de Andorra la Vella

Para diseñar el mapa de peligrosidad a escala local se ha partido del escenario probabilista con un periodo de retorno de 475 años, que estima para la zona de Andorra una aceleración máxima de 0.12g y una intensidad macrosísmica de VII grados MSK. Partiendo de los cálculos de los espectros de respuesta en aceleración (SA) en las diferentes columnas de suelo de la cubeta de Andorra la Vella se ha realizado una zonación de la cubeta, agrupando aquellas columnas que tengan un espectro de respuesta similar para un periodo de retorno de 475 años. Se han considerado un total de cinco zonas diferentes, que se muestran en la figura 14. Por último, los puntos que no se encuentran dentro de alguna de estas cinco zonas se consideran emplazamientos en roca, y se les asocia el espectro de respuesta en aceleración (SA) de referencia. En la figura 15 se muestran los espectros de respuesta propuestos para cada una de las zonas definidas en la figura 14.

Conocida la intensidad esperada en Andorra para un periodo de retorno de 475 años para un suelo de referencia y el incremento de intensidad producido por efecto de suelo se puede elaborar una zonación de la cubeta de Andorra la Vella con los valores de intensidad macrosísmica esperada en cada zona de la cubeta. En la tabla 4 se muestran los valores de la intensidad macrosísmica esperada en la cubeta de Andorra la Vella para un periodo de retorno de 475 años.

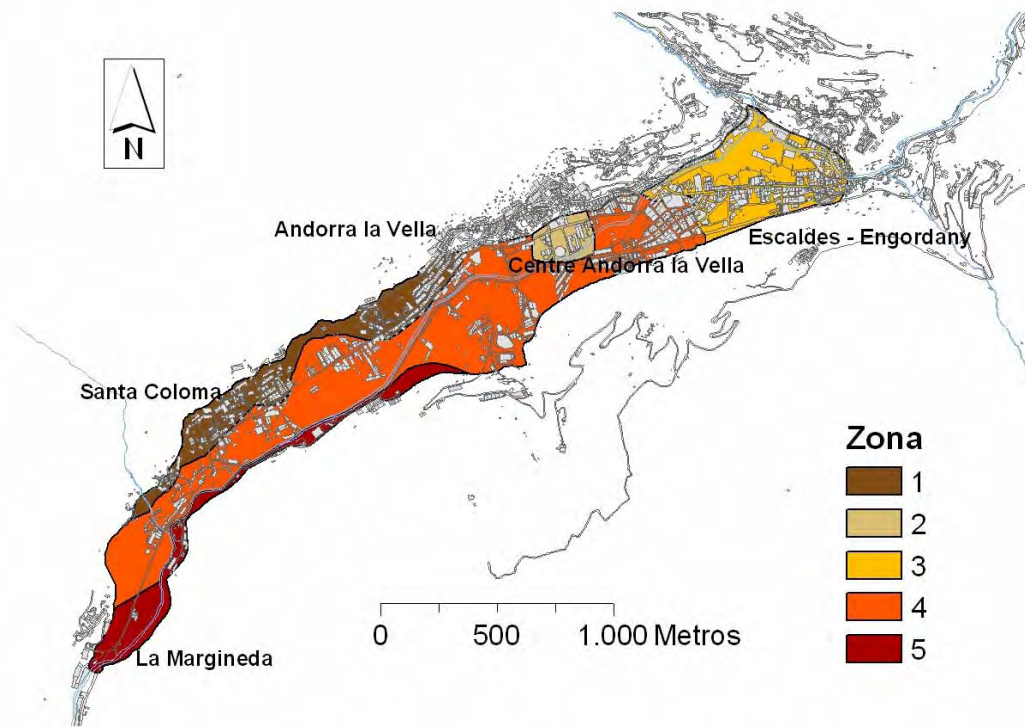


Figura 14: Mapa de peligrosidad sísmica local en la cubeta de Andorra la Vella en función de los espectros de respuesta en aceleración (SA) para un periodo de retorno de 475 años.

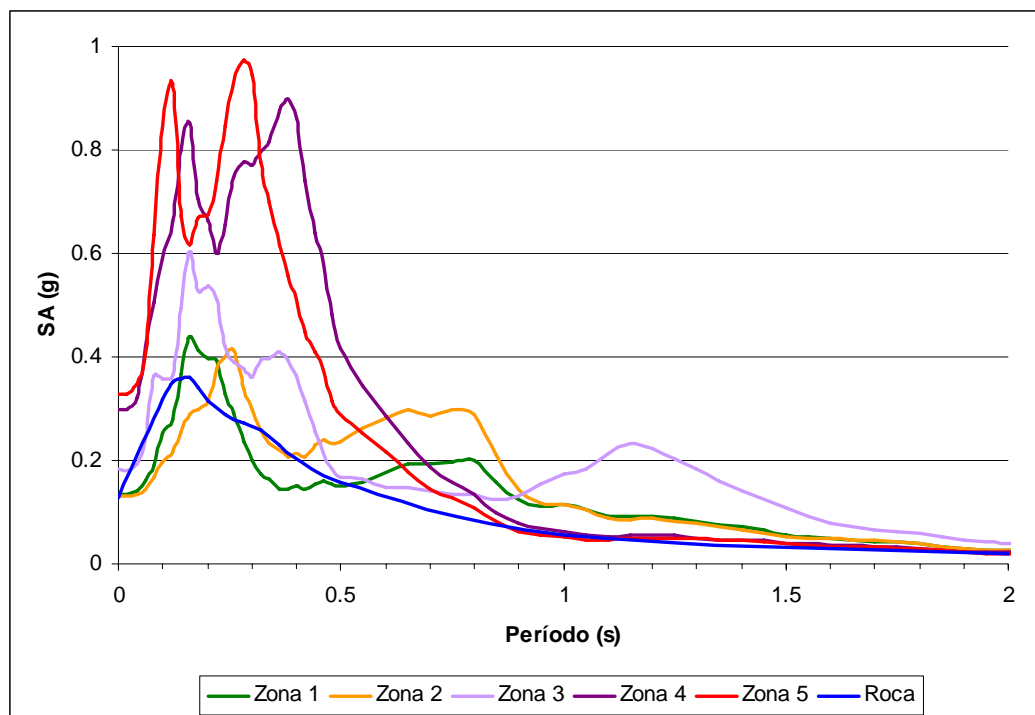


Figura 15: Espectros de respuesta en aceleración (amortiguamiento 5%) calculados en cada una de las zonas definidas en la figura 14.

Zona	Intensidad
1	VII
2	VII-VIII
3	VIII
4	VIII
5	VIII-IX

Tabla 4: Valores de la intensidad macrosísmica esperada para un periodo de retorno de 475 años para las zonas definidas en la figura 14.

Para diseñar un escenario sísmico se ha partido del escenario determinista que reproduce el sismo de Febrero de 1428. Según este escenario la intensidad probablemente percibida en todos los municipios de Andorra fue de VI-VII grados. Conocida la intensidad probablemente percibida en el sismo de 1428 y el incremento de intensidad producido por efecto de suelo se puede elaborar una zonación de la cubeta de Andorra la Vella en función de la intensidad (figura 16).

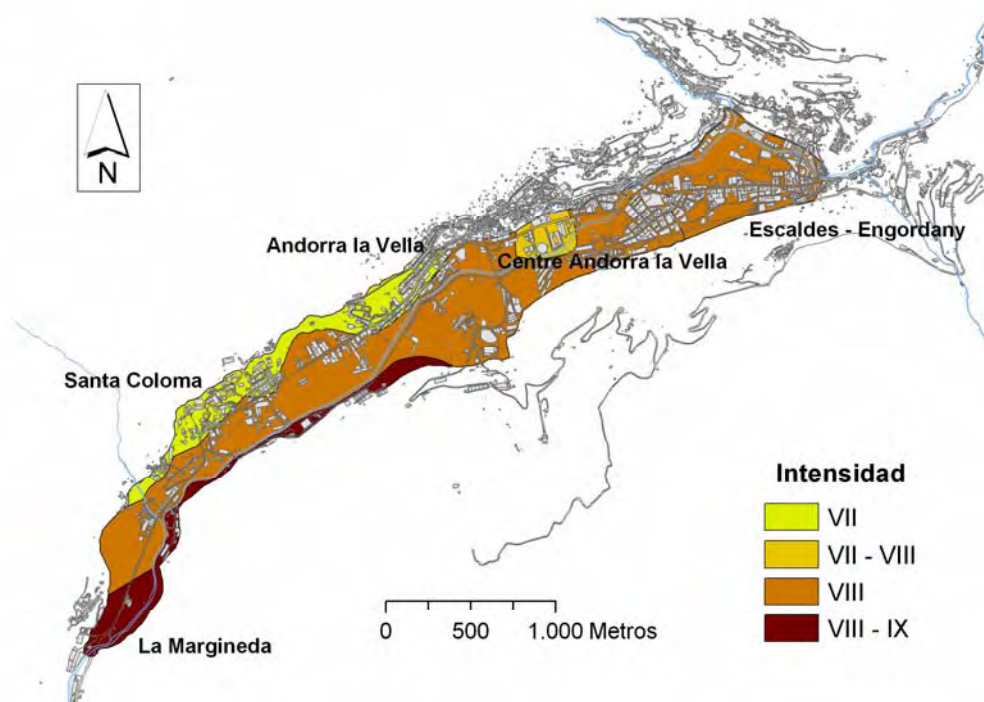


Figura 16: Zonación de la cubeta de Andorra la Vella en función de la intensidad probablemente percibida durante el sismo de 1428 considerando efectos locales.

6.2. Valle de la Cerdanya

Para diseñar el mapa de peligrosidad a escala local de la Cerdanya se ha seguido una metodología análoga a la seguida en la cubeta de Andorra la Vella (apartado 6.1). Se han considerado un total de cuatro zonas, que se muestran en la figura 17. En la figura 18 se muestran los espectros de respuesta propuestos para cada una de las zonas definidas.

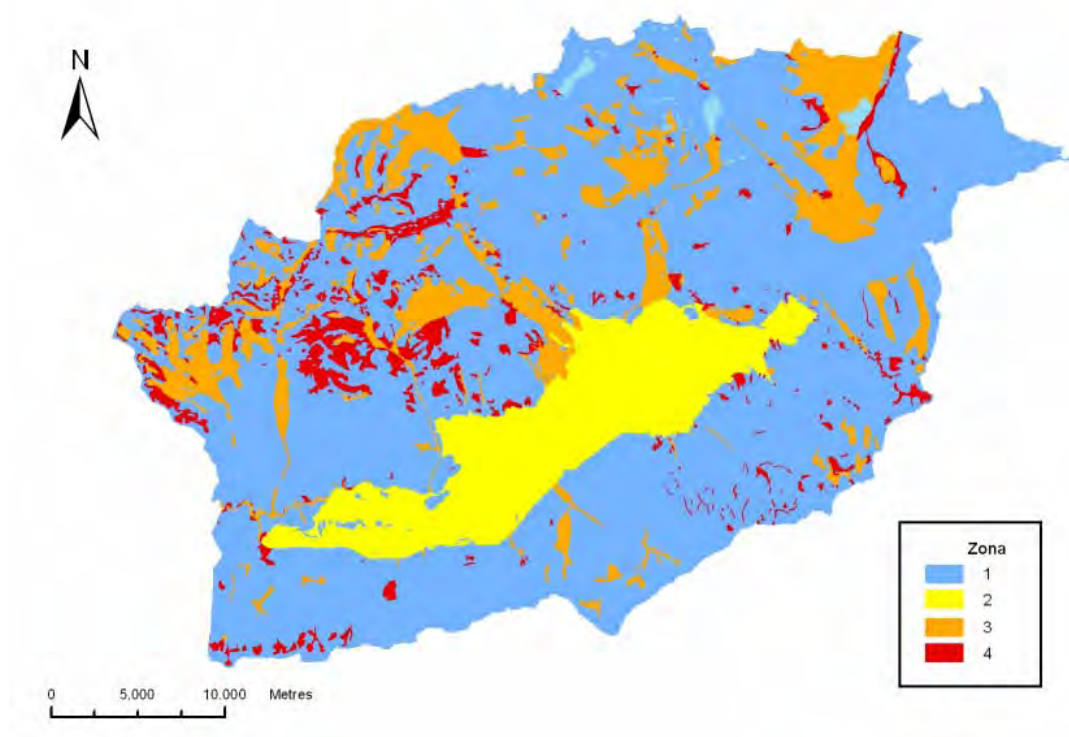


Figura 17: Mapa de peligrosidad sísmica local en el valle de la Cerdanya en función de los espectros de respuesta en aceleración (SA) para un periodo de retorno de 475 años.

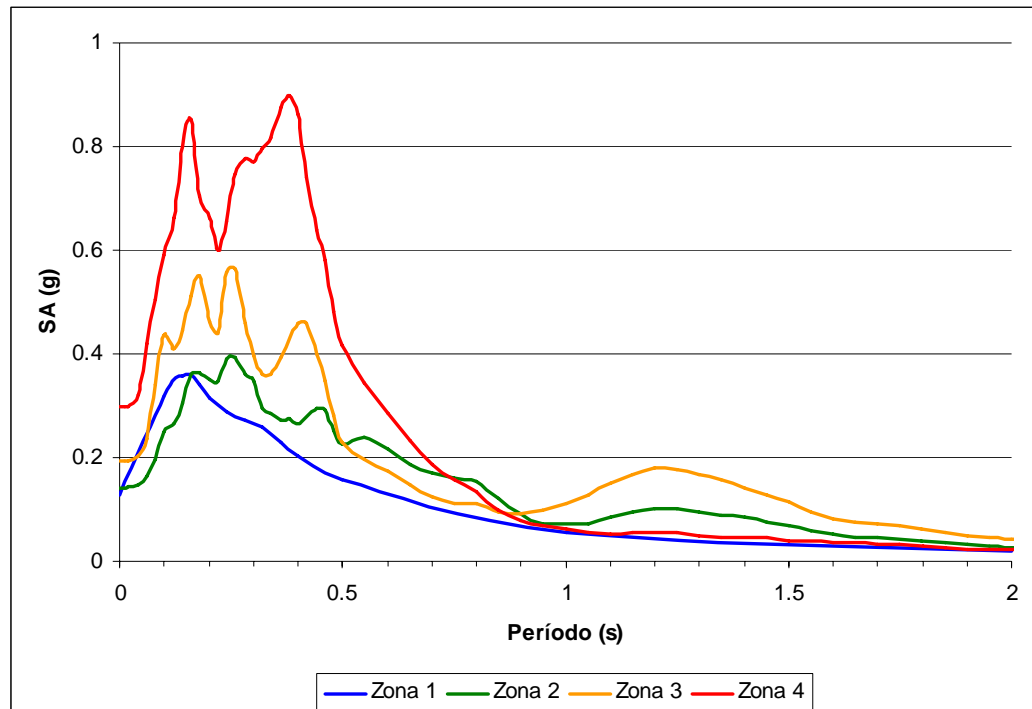


Figura 18: Espectros de respuesta en aceleración (amortiguamiento 5%) calculados en cada una de las zonas definidas en la figura 17.

Análogamente a la metodología seguida en el apartado 6.1, se ha elaborado una zonación del valle de la Cerdanya con valores de intensidad macrosísmica esperada en cada zona del valle. En la tabla 5 se muestran los valores de la intensidad macrosísmica esperada en el valle de la Cerdanya para un periodo de retorno de 475 años

Zona	Intensidad
1	VII
2	VII-VIII
3	VII-VIII
4	VIII

Tabla 5: Valores de la intensidad macrosísmica esperada para un periodo de retorno de 475 años para las zonas definidas en la figura 17.

Para diseñar un escenario sísmico en el valle de la Cerdanya se ha seguido una metodología análoga a la aplicada en la cubeta de Andorra la Vella (apartado 6.1). Según el escenario determinista, la intensidad probablemente percibida en los municipios de la Cerdanya en el sismo de 1428 varió entre VI-VII y VII-VIII, en función de la proximidad al epicentro del terremoto. En la figura 19 se muestra el mapa con la zonación del valle de la Cerdanya en función de la intensidad probablemente percibida en cada zona del valle durante el sismo de 2 de Febrero de 1428 considerando los efectos locales.

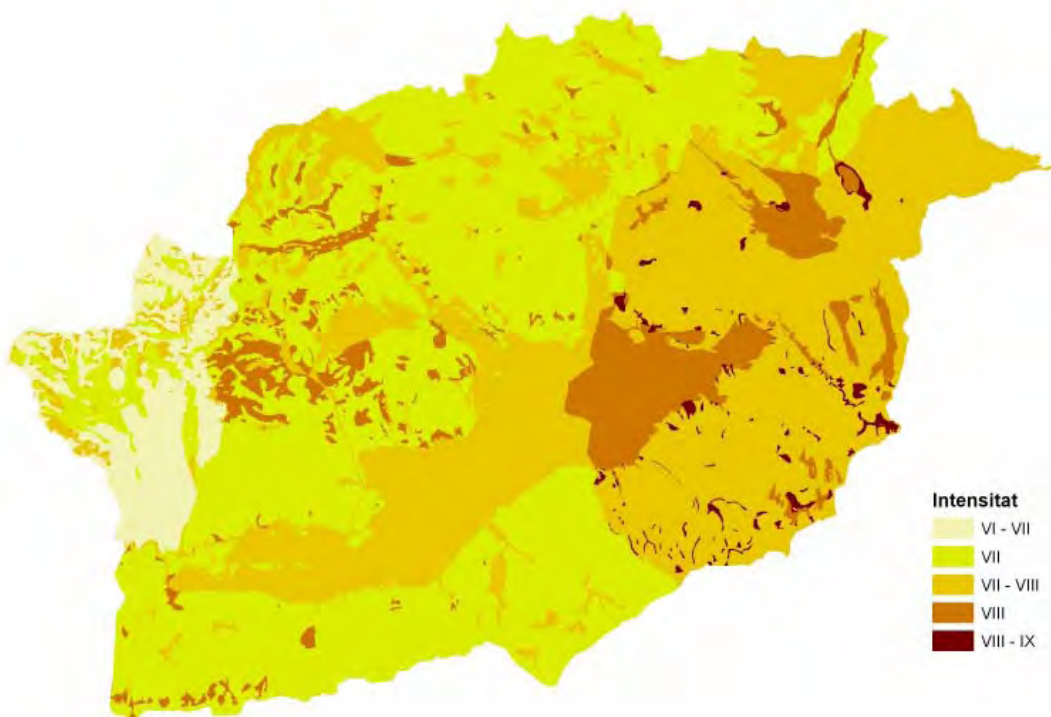


Figura 19: Zonación del valle de la Cerdanya en función de la intensidad probablemente percibida durante el sismo de 1428 considerando efectos locales.

7. Conclusiones

Aplicando un método lineal equivalente 1D en las columnas de suelo definidas en la cubeta de Andorra la Vella y en el valle de la Cerdanya se han obtenido las funciones de transferencia y el movimiento del suelo para un escenario probabilista correspondiente a un periodo de retorno de 475 años. Partiendo de estos resultados se ha calculado para cada columna de suelo el espectro de respuesta en aceleraciones (SA) y la Intensidad de Arias. Con estos valores se ha propuesto una zonación sísmica de la cubeta de Andorra la Vella y del valle de la Cerdanya.

Las amplificaciones calculadas en la cubeta de Andorra la Vella son mayores que las obtenidas en el valle de la Cerdanya. Las frecuencias fundamentales obtenidas en la cubeta de Andorra la Vella varían entre 1.0 y 4.6Hz, mientras que las frecuencias fundamentales en el valle de la Cerdanya varían entre 0.20 y 0.65Hz. En términos del incremento de la intensidad macrosísmica, al considerar los efectos de suelo, los resultados obtenidos en la cubeta de Andorra la Vella son mayores que los resultados en el valle de la Cerdanya.

Se ha diseñado un mapa de peligrosidad local para ambas zonas partiendo de un escenario probabilista con un periodo de retorno de 475 años y de los efectos de sitio calculados en cada región. En la cubeta de Andorra la Vella se han obtenido aceleraciones máximas de 0.38g y intensidades hasta VIII-IX grados. En el valle de la Cerdanya se han obtenido aceleraciones máximas de 0.19g y intensidades hasta VIII grados.

Por otro lado se ha diseñado un escenario sísmico para ambas zonas partiendo del escenario determinista que reproduce el sismo de 2 de Febrero de 1428. Tanto en la cubeta de Andorra la Vella como en el valle de la Cerdanya se han obtenido intensidades hasta VIII-IX.

La amplificación debida a efectos locales obtenida en ambas zonas se ha considerado en términos de aceleración espectral y de intensidad macrosísmica. Estos resultados, conjuntamente con las evaluaciones de la vulnerabilidad de los edificios, serán utilizados para la evaluación del riesgo sísmico y la realización de escenarios de daños en ambas zonas de estudio.

Referencias:

- Ambraseys, N. N., Smit, P., Berardi, R., Rinaldis, D., Cotton, F. y Berge-Thierry, C. (2000), "European Strong-Motion Database", CD-ROM collection European Council, Environment and Climate Research Programme.
- Bitri, A., Chardon, A. y Richalet, G. (2004), "Micro Zonage sismique de la vallée de la Cerdagne et de la principauté d'Andorre. Évaluation de répartition en profondeur de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement par la méthode SASW". Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Report.
- Bitri, A., Le Bégat, S. y Balthassat, J.M. (1997), "Détermination des vitesses de cisaillement des sols à partir de la dispersion des ondes de Rayleigh", Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Report n° R39877.
- Cabañas, L., Benito, B. y Herráiz, M. (1997), "An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motion". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, N° 26, pp. 79-92.

- Cirés, J., Domingo, D., Casas, J. M^a, Fernández, O., Picart, J., Soler, A., Alías, G., Soriano, C., Valenzuela, J.I., Roca, E., Copons, R., Casanovas, J. y Bordonau, J. (en edición), "Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 Hoja 216 Bellver de Cerdanya". IGME.
- Colas, B., Cirés, J., Figueras, S., Roullé, A., Macau, A. y Fleta, J. (2006), "Geological and Lithological characterization for a seismic zonation in a border region (Cerdanya, Spain-France)". European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, Barcelona.
- CRECIT. (2001), "Base de Dades Geotècniques d'Andorra", Institut d'Estudis Andorrans, Andorra.
- CRECIT. (2002), "Mapa geològic d'Andorra 1:50.000", Institut d'Estudis Andorrans, Andorra.
- Nakamura, Y. (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface". Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, N° 30-1, pp. 25-33.
- Olivera, C., Redondo, E., Lambert, J., Riera Melis, A. y Roca, A. (2006), "Els terratrèmols dels segles XIV i XV a Catalunya". Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona.
- Rivero, Ll. (1993), "Estudio Gravimétrico del Pirineo Oriental", Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona, pp 103 - 117.
- Secanell, R., Martín, C., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Bertil, D., Dominique, P., Carbon, D. y Fleta, J. (2007a), "Evaluación probabilista de la peligrosidad sísmica de la región pirenaica". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
- Secanell, R., Martín, C., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Bertil, D., Dominique, P. y Fleta, J. (2007b), "Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region". Journal of Seismology, (Submitted).
- Sponheuer, W. (1960), "Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der macroseismic /Freiberger Forschungshefte, C88". Akademie Verlag. Berlín, pp. 181-202.
- Susagna, T. y Goula, X. (1999), "Catàleg de sismicitat, Atlas sísmic de Catalunya", Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona.
- Teixidó, T., Palomeras, I., Valls, P. y Martínez, P. (2003), "Prospecció sísmica a la cubeta d'Andorra la Vella-Escaldes-Engordany". Horitzó, N° 4, pp. 3-25.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto interreg ISARD (Información Sísmica Automática Regional de Daños) y por el proyecto ERSE (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España) (REN2003-5178-C03-01), del Ministerio de Ciencia y Tecnología (en la actualidad Ministerio de Educación y Ciencia).