

ESCENARIOS TRANSFRONTERIZOS DE RIESGO SÍSMICO EN EL PIRINEO ORIENTAL

J. Irizarry⁽¹⁾, P. Roussillon⁽²⁾, M. González⁽³⁾, B. Colas⁽²⁾, O. Sedan⁽²⁾, y T. Susagna⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Institut Geològic de Catalunya*

⁽²⁾ *BRGM, Orleans, France*

⁽³⁾ *CENMA, Andorra*

jirizarry@igc.cat

RESUMEN

La región de los Pirineos es una de las zonas sísmicas más activas tanto de España como de Francia. Su sismicidad histórica y los datos tectónicos recientes indican un nivel de peligrosidad significativo. Desde 2003, el proyecto Interreg IIIa ISARD (Información Sísmica Automática Regional de Daños) ha estudiado la peligrosidad y vulnerabilidad sísmica en la parte oriental de los Pirineos para desarrollar un esquema común que facilite generar escenarios de riesgo que sobrepase las fronteras de la región y aporte información preventiva y operacional sobre el riesgo sísmico a las organizaciones locales para el manejo de la emergencia. Este trabajo presenta el desarrollo de los escenarios de riesgo sísmico en el valle de la Cerdaña, una de las zonas piloto del proyecto ISARD, situado en territorio francés y español. Para los escenarios de riesgo sísmico se evalúa la vulnerabilidad de los edificios de vivienda mediante métodos basados en las clases de vulnerabilidad y los índices de vulnerabilidad usando la escala EMS-98 (Grünthal, 1998). En estos escenarios se consideran los efectos de suelo de la región. Los escenarios de riesgo sísmico son finalmente expresados en términos de posibles edificios dañados y sus posibles consecuencias a la población.

Palabras clave: peligrosidad, vulnerabilidad, daños, pérdidas, intensidad, suelos

SUMMARY

The Pyrenees region is one of the most active seismic zones of both Spain and France. Its historical seismicity and recent tectonic data indicate a significant level of seismic hazard. Since 2003, the Interreg IIIa ISARD project (Information of Seismic Automatic Regional Damages) has studied both the seismic hazard and vulnerability of the eastern Pyrenees in order to develop a common scheme for generating seismic risk scenarios that surpasses the countries' borders and provide preventive and operational information on the seismic risk to the local first-aid and crisis management organizations. This paper presents the seismic risk scenarios obtained for the Cerdaña Valley, one for ISARD's pilot zones, located both in French and Spanish territory. For the seismic risk scenarios, the vulnerability of dwelling buildings is evaluated using methods based on the EMS-98 (Grünthal, 1998) vulnerability classes and vulnerability indexes. These scenarios consider the soil effects of the region. The final seismic risk scenarios are expressed in terms of the possible damaged buildings and its consequences to the population.

Keywords: hazard, vulnerability, damage, losses, intensity, soils

Introducción

El proyecto ISARD (Información Sísmica Automática Regional de Daños), financiado

por el programa Interreg IIIa, propone el desarrollo de una metodología común para el cálculo de escenarios de riesgo sísmico que logra sobreponer las diferencias existentes en las fronteras de España, Andorra y Francia. De esta manera podrá brindar información preventiva y operacional sobre el riesgo sísmico a los encargados del manejo de las emergencias en la región. Como parte de estos trabajos se ha realizado una evaluación unificada de la peligrosidad sísmica de la región de los Pirineos en la que se han unificado una zonación sísmica y un catálogo sísmico para la región (Secanell et al, 2007a; 2007b).

Las fases de la caracterización de los efectos de suelos y la evaluación de los escenarios de riesgo sísmico se han realizado en una zona piloto formada por la Cerdaña francesa, Andorra y la Cerdaña española. Macau et al., (2006; 2007) presentan los efectos de suelos asociados a la microzonación realizada para el Valle de la Cerdaña y la cubeta de Andorra dentro del marco del proyecto ISARD. El presente trabajo muestra la evaluación de la vulnerabilidad y escenarios de daños realizada dentro del proyecto para la región de la Cerdaña, tanto española como francesa. González et al. (2007) presenta los resultados tanto de vulnerabilidad como de escenarios de daños para el Principado de Andorra.

Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es evaluar escenarios de riesgo sísmico para la región de la Cerdaña. La vulnerabilidad de sus edificios de vivienda será analizada mediante métodos estadísticos basados en las clases de vulnerabilidad y en los índices de vulnerabilidad usando la escala EMS-98. Los escenarios de daños y sus pérdidas asociadas se obtendrán para dos escenarios de peligrosidad sísmica. El primero de éstos se basa en la ocurrencia de un sismo similar al que afectó la región en 1428, y el segundo se define según la evaluación de la peligrosidad obtenida para la región para un periodo de retorno de 475 años (Secanell et al, 2007a; 2007b).

Se utilizarán dos métodos para evaluar los escenarios de daños cada uno asociado a una unidad de trabajo diferente. El primer método estará basado en las clases de vulnerabilidad y el método de las matrices de probabilidad de daño y será aplicado a los municipios de la región sin considerar los efectos de suelos. El segundo método utiliza el índice de vulnerabilidad aplicado a las unidades de población identificadas en cada municipio para mejorar la consideración de los efectos de suelos de la región. Finalmente, los resultados de ambas metodologías serán comparados.

Área de Estudio

La Figura 1 muestra el área de estudio de este trabajo, formada por la parte española de la Cerdaña así como de la parte francesa. La región consta de un total de 49 municipios, de los cuales 17 son españoles y 32 son franceses. En la Figura 1 también se muestran los polígonos de población de cada municipio. En total, la región consta de 143 polígonos de población. Los polígonos de población de la Cerdaña española fueron definidos en base a las entidades de población oficialmente identificadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE). En la parte francesa de la Cerdaña, los polígonos de población fueron definidos mediante visitas de campo y consultando fotografías aéreas para identificar dos tipos de polígonos: la parte más antigua de cada municipio y su región periférica de más reciente construcción.

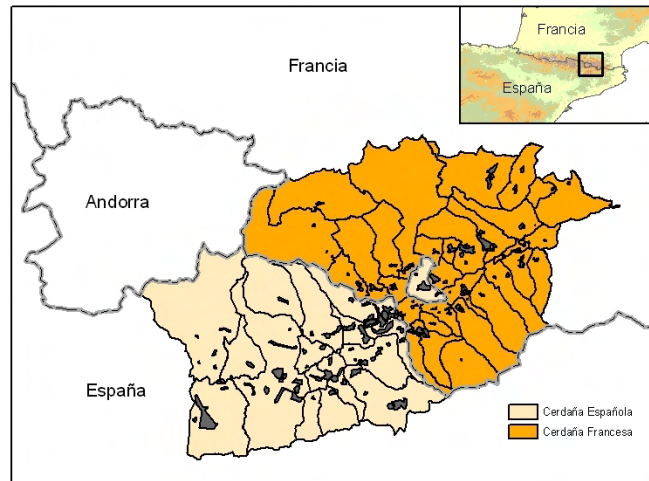


Figura 1 : Municipios y polígonos de población de la Cerdaña.

Peligrosidad Sísmica de la Región

Al estar localizada en los Pirineos, la Cerdaña es afectada por una de las zonas sísmicas más activas de Francia y España. Los datos tectónicos y al sismicidad histórica de la región pirenaica muestran que la peligrosidad sísmica de los Pirineos es considerable teniendo su mayor actividad sísmica en la parte oeste como se puede observar en la Figura 2. En la sismicidad histórica destacan sismos fuertes como el de 1373 en la parte central del Pirineo con una intensidad epicentral de VIII-IX, y la serie sísmica con intensidad máxima de IX que ocurrió entre 1427 y 1428 en el Pirineo Oriental (Olivera et al., 2006; 2007). Durante el siglo XX, los sismos de 1923 y 1967, ambos con una intensidad epicentral de VIII, causaron daños importantes. Recientemente la región ha sido afectada por sismos de magnitud moderada como lo son; Saint Paul de Fenouillet (M5.2) de 1996, Hautes Pyrénées (M4.7) de 2002 y Ripollès (M4.0) de 2004, que han causado pérdidas económicas en la región.

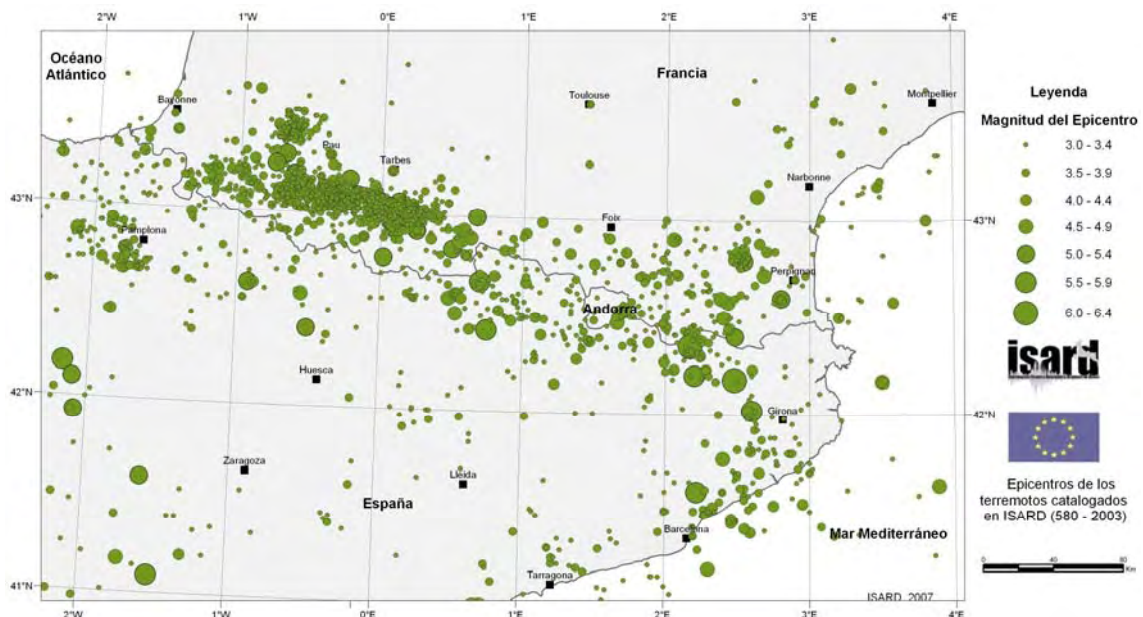


Figura 2 : Catálogo unificado como parte del proyecto ISARD.

Escenario Sísmico basado en el Terremoto de 1428

El primer escenario sísmico que se utilizará para obtener escenarios de daños para la región de Cerdaña está basado en la ocurrencia de un terremoto similar al de 1428 en la región del Ripollès. Olivera et al. (2006; 2007) estudió los datos de las intensidades observadas debido a este terremoto (Figura 3) caracterizándolo con una intensidad epicentral de IX, una magnitud momento de 6.5 y una profundidad aproximada de 9 km. Con los datos de intensidad se ajustó una relación de atenuación del tipo Sponheuer (1960) con el propósito de estimar las intensidades que probablemente se sintieron en los municipios de Cerdaña debido al terremoto de 1428. Las intensidades para un suelo medio obtenidas para la región de estudio se muestran en la Figura 4 donde se puede ver como las mismas varían entre VI-VII y VII-VIII, decreciendo la intensidad de este a oeste.

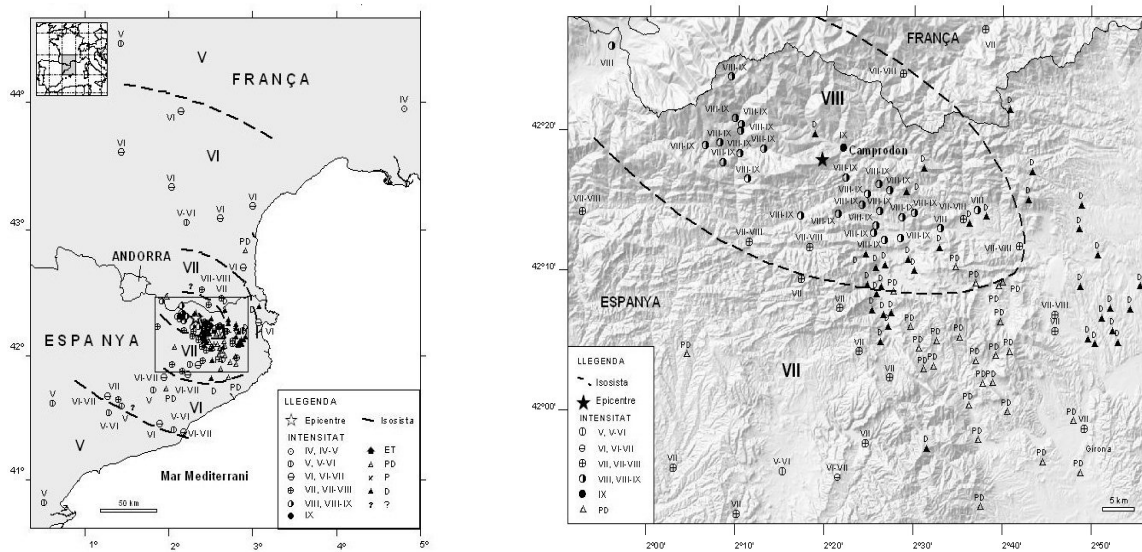


Figura 3 : Intensidades observadas en España y Francia debido al terremoto de Ripollès de 1428 (Olivera et al., 2006).

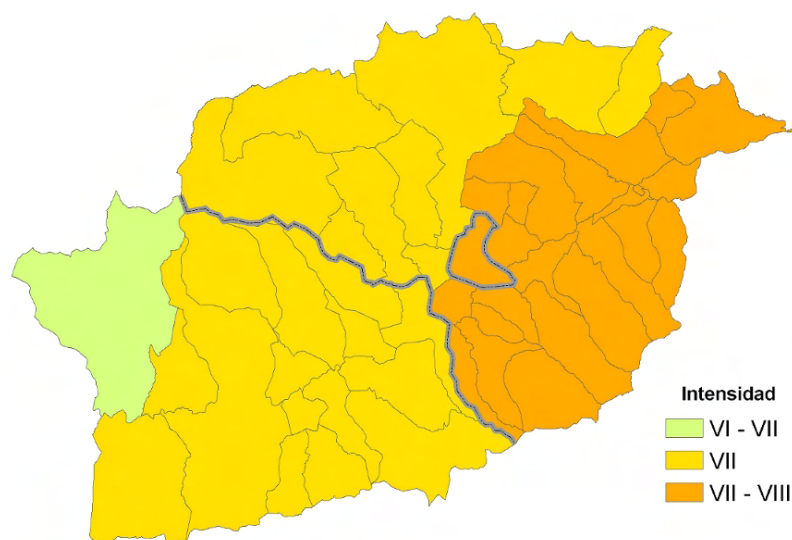


Figura 4 : Intensidades en suelo medio según el escenario de un terremoto análogo al de 1428.

Escenario Sísmico para un Periodo de Retorno de 475 años

Secanell et al. (2007a; 2007b) evaluó la peligrosidad unificada de la región del Pirineo luego de haber unificado un catálogo y una zonación sísmica para la región. Esta evaluación se realizó tanto en términos de intensidad como de aceleraciones espectrales y para varios periodos de retorno. Para el segundo escenario sísmico se considera el análisis de peligrosidad para un periodo de retorno de 475 años en términos de intensidad que se muestra en la Figura 5. Según el mismo, la Cerdaña se vería afectada por una intensidad de VII grados para un suelo medio. Al comparar esta intensidad con las esperadas a partir de un sismo similar al de 1428, se observa que para algunos municipios de la Cerdaña las intensidades probablemente sentidas durante el terremoto de 1428 son mayores que las del escenario probabilista para un periodo de retorno de 475 años.

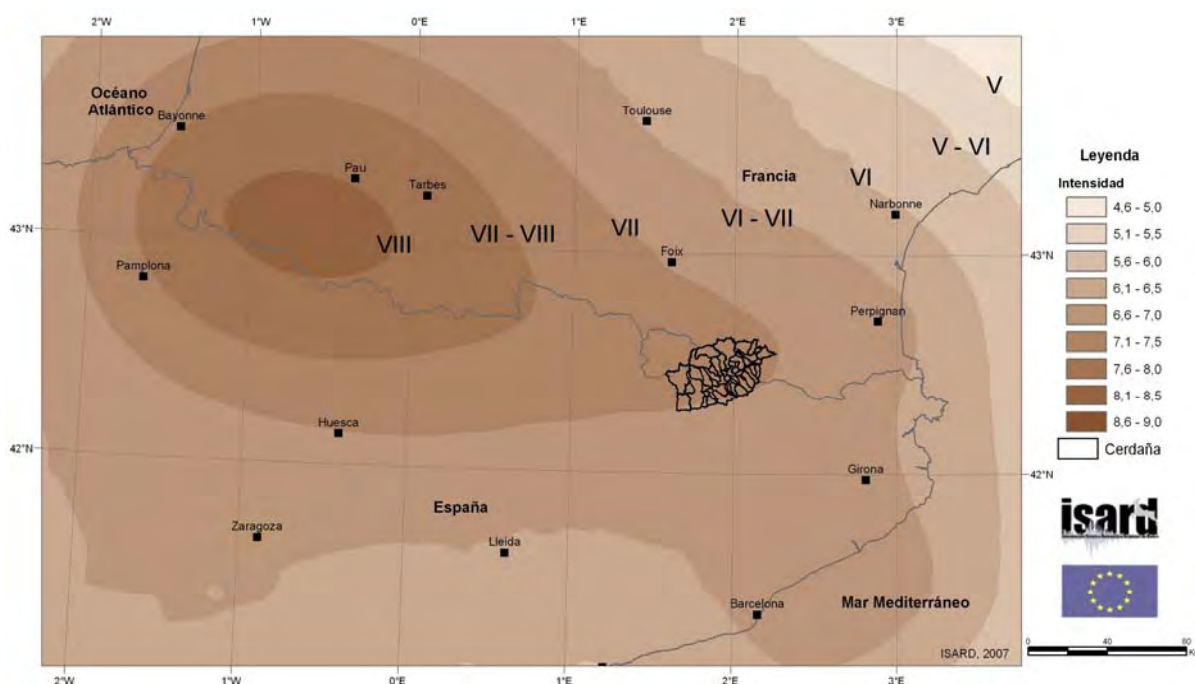


Figura 5 : Peligrosidad probabilista en términos de intensidad para un suelo medio y un periodo de retorno de 475 años.

Consideración de los Efectos de Suelos

Los efectos de suelos solo se tomarán en cuenta en la evaluación del escenario de daños mediante el método del índice de vulnerabilidad aplicado a los polígonos de población en cada uno de los municipios. Los mismos están basados en la microzonación sísmica obtenidas por Macau et al. (2006; 2007) para el Valle de la Cerdaña que se muestra en la Figura 6. Para cada una de las zonas Macau et al. (2006; 2007) calcularon el incremento de intensidad que se puede esperar dadas las características de la respuesta sísmica de las zonas. Siguiendo esta microzonación se aplican en la región incrementos de intensidad de 0.5 y 1.0 según la zona de suelos donde se encuentre el polígono de población. De esta manera, las intensidades con efectos de suelos en el escenario probabilista varían entre VI y VIII grados, mientras que para el escenario determinista las mismas varían entre VI-VII y VIII-IX grados.

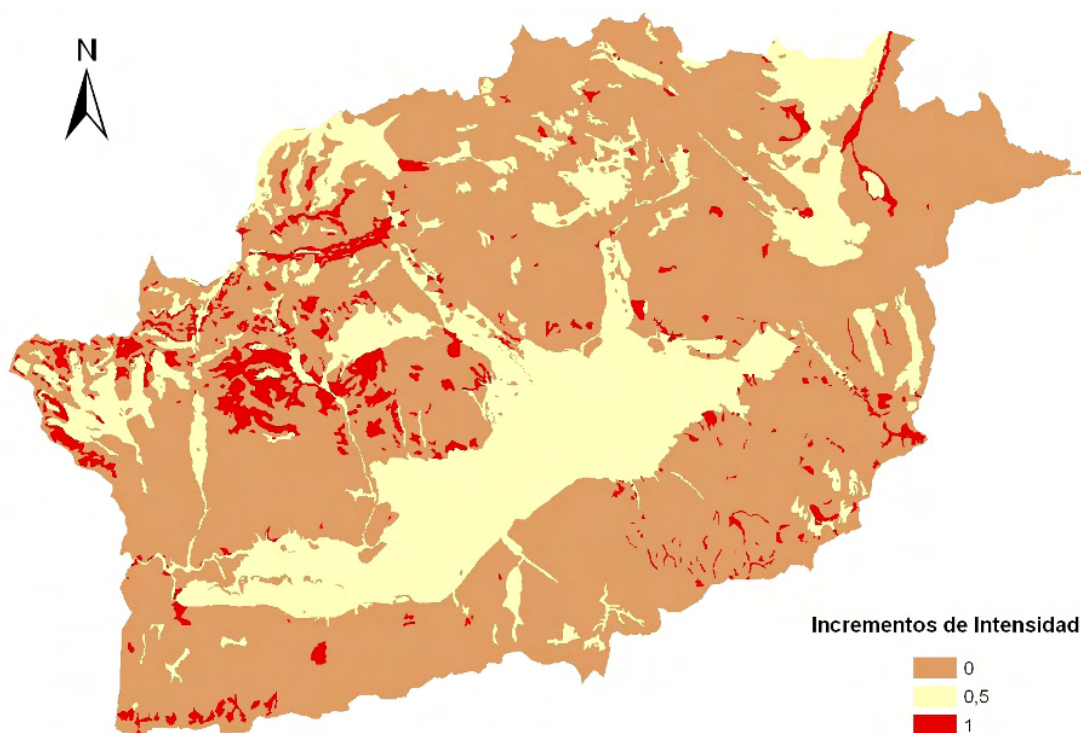


Figura 6 : Incrementos de intensidad asociados a la microzonación sísmica del valle de la Cerdaña.

Metodología para la Evaluación de Escenarios de Daños basados en las Clases de Vulnerabilidad de la Escala EMS-98

El primer método utilizado para la evaluación de los escenarios de daños es el método de las matrices de probabilidad de daño que Roca et al. (2006) aplicaron a la región de Cataluña. Ésta se basa en las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 y en las matrices de probabilidad de daño para cada clase de vulnerabilidad desarrolladas por Chávez (1998) a partir de datos de daños en terremotos italianos. Esta metodología se aplica a nivel de municipios y los escenarios de daños calculados mediante la misma no incluirán efectos de suelos.

La Tabla 1 muestra las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 donde las tipologías estructurales más frecuentes son caracterizadas en función de su susceptibilidad a sufrir daño sísmico. Esta susceptibilidad se define mediante las clases de vulnerabilidad que puede variar desde la A hasta la F. La clase de vulnerabilidad A representa a los edificios más propensos a sufrir daños, mientras que la clase F incluye las estructuras más aptas para resistir las acciones sísmicas. En los trabajos de Roca et al. (2006) y Chávez (1998) se desarrolló una distribución de las clases de vulnerabilidad adaptada a la región de Cataluña en función del año de construcción y el número de plantas de los edificios que se presenta en la Tabla 2.

Con esta distribución se obtiene el número de edificios asociados a cada clase de vulnerabilidad. La distribución de daños total se obtiene al distribuir los edificios de cada clase de vulnerabilidad utilizando la distribución de daño asociada a la intensidad correspondiente que se indica en las matrices de daño. La Tabla 3 muestra un ejemplo de

la matriz de probabilidad de daño para los edificios con vulnerabilidad clase B junto a las descripciones de las condiciones de daño asociadas a los grados de daño.

Type of Structure	Vulnerability Class A B C D E F								
		Hasta 1950		1951-1970		Después de 1970			
		Número de Plantas	Clase de Vulnerabilidad	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
MASONRY rubble stone, fieldstone adobe (earth brick) simple stone massive stone unreinforced, with manufactured stone units unreinforced, with RC floors reinforced or confined	A	20	30	5	15	0	5		
	B	80	70	50	70	0	20		
	C	0	0	45	15	85	65		
	D	0	0	0	0	15	10		
REINFORCED CONCRETE (RC) frame without earthquake-resistant design (ERD) frame with moderate level of ERD frame with high level of ERD walls without ERD walls with moderate level of ERD walls with high level of ERD	A	20	40	10	20	5	10		
	B	80	60	60	70	20	30		
	C	0	0	30	10	65	55		
	D	0	0	0	0	10	5		
STEEL steel structures	A	40	60	15	30	8	15		
	B	60	40	70	65	27	45		
	C	0	0	15	5	60	40		
	D	0	0	0	0	5	0		
WOOD timber structures									

○ most likely vulnerability class; — probable range; - - - - - range of less probable, exceptional cases

Tabla 1: Clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98.

Tabla 2: Distribución de las clases de vulnerabilidad para la región de Cataluña (Chávez, 1998).

Intensidad	Grados de Daño para Edificios de Clase B					
	0	1	2	3	4	5
V	0.67	0.279	0.047	0.004	0	0
V-VI	0.5555	0.3355	0.0935	0.0145	0.001	0
VI	0.441	0.392	0.14	0.025	0.002	0
VI-VII	0.325	0.388	0.211	0.064	0.011	0.001
VII	0.209	0.384	0.283	0.104	0.019	0.001
VII-VIII	0.145	0.323	0.314	0.165	0.047	0.006
VIII	0.08	0.263	0.346	0.227	0.074	0.01
VIII-IX	0.045	0.169	0.287	0.286	0.168	0.045
IX	0.01	0.075	0.227	0.346	0.262	0.08
IX-X	0.005	0.04	0.136	0.268	0.336	0.215
X	0	0.005	0.044	0.191	0.409	0.351

Grado de Daño	Descripción
0	Sin Daño
1	Leve
2	Moderado
3	Severo
4	Muy Severo
5	Colapso

Tabla 3: Matriz de probabilidad de daño para los edificios de vulnerabilidad clase B (Chávez, 1998).

La distribución de los edificios de los municipios de la Cerdaña española según año de construcción y número de plantas se obtuvo de los datos censales de 1990 del Instituto Nacional de Estadística (INE), mientras que estos mismos datos para la Cerdaña francesa provienen las bases de datos del Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) y el Institut Géographique National (IGN). Los datos de la Cerdaña española estaban disponibles para las áreas urbanas y diseminadas de cada municipio, pero no fue así para los datos de la Cerdaña francesa. En este caso, se aplicó la distribución de clases de vulnerabilidad para la condición urbana a todos los municipios franceses.

Metodología para la Evaluación de Escenarios de Daños basados en Índices de Vulnerabilidad

El método del índice de vulnerabilidad (Corsanego y Petrini, 1994; Bernardini, 2000; Giovinazzi y Lagomarsino, 2004; Giovinazzi, 2005) es el segundo método con el cual se evaluarán los daños esperados en la Cerdaña. Esta metodología consiste en caracterizar

las tipologías constructivas mediante un índice de vulnerabilidad que describe su susceptibilidad a sufrir daños mediante una función de vulnerabilidad permite calcular el daño medio esperado para cierta intensidad.

Los índices de vulnerabilidad han sido definidos para un sin número de tipologías por diversos autores (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004; Giovinazzi, 2005) y principalmente dentro del marco del proyecto RISK-UE (Mouroux y Lebrun, 2006). Para cada tipología recomiendan un máximo, un mínimo y un valor promedio para el índice de vulnerabilidad. El índice de vulnerabilidad inicial de cada tipología puede modificarse para considerar ciertas características específicas de los conjuntos de edificios como pueden ser, su altura, transformaciones recientes, mantenimiento, condición de piso blando, nivel del código sísmico usado en su construcción, etc. (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004).

Una vez modificado según las características del conjunto de edificios, el índice de vulnerabilidad, junto a la intensidad que afecta al conjunto, sirve para calcular la distribución de daño esperado para ese conjunto de edificios. Para calcular la distribución de daño esperado se utiliza la función de vulnerabilidad (Ecuación 1) propuesta por Sandi y Floricel (1995) y usada por Giovinazzi y Lagomarsino (2002) para la evaluación estadística de daños a edificios ordinarios. Esta función permite evaluar el grado de daño promedio, μ_d , esperado dado los valores de índice de vulnerabilidad, V_i , de un conjunto de edificios y la intensidad, I , que los afecta. Las probabilidades de daño asociadas a cada grado de daño y su correspondiente número de edificios se obtienen al distribuir el grado de daño promedio, μ_d , utilizando la distribución beta (Giovinazzi, 2005).

$$\mu_d = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V_i - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (1)$$

El método del índice de vulnerabilidad se aplica en la Cerdaña a nivel de los polígonos de población identificados en cada municipio con el propósito de mejorar la consideración de los efectos de suelos que afectan a la población. Así que para poder implementar la metodología se debe desarrollar para cada polígono una distribución de sus tipologías estructurales más representativas. Esta distribución de tipologías estructurales se desarrolló en función de los rangos de años de construcción y números de plantas para los cuales se disponía de información estadística sobre los edificios, para así, calcular el número de edificios asociados a cada tipología estructural.

Las tipologías estructurales más representativas de la región se definieron mediante visitas de campo y reuniones con los arquitectos locales. La Tabla 4 muestra las tipologías estructurales de la Cerdaña. En la misma se indica la región en la cual se presenta cada tipología: CERD indica que está presente en toda la Cerdaña, mientras que ES y FR indican que están presentes solo en la parte española o francesa, respectivamente. En esta misma tabla se asocian las tipologías de la Cerdaña con las presentadas en el proyecto RISK-UE para así asignarle un índice de vulnerabilidad a cada una. La tipología 7, una estructura de madera cuyos bajos son de mampostería no reforzada, no estaba contemplada en el proyecto RISK-UE por lo que su índice de vulnerabilidad se escogió como el promedio de los índices promedios propuestos para las estructuras de madera y las de mampostería no reforzada.

La definición de la distribución de las tipologías en la Cerdaña española se llevó a cabo mediante entrevistas con los arquitectos de la región. Durante estas entrevistas, los arquitectos locales remarcaron la homogeneidad de la distribución de tipologías en la Cerdaña española y diferenciando únicamente al municipio de Puigcerdà. Por esta razón se

obtuvieron dos distribuciones como se muestra en la Tabla 5. Una para Puigcerdà caracterizada por dos rangos de número de plantas, y otra definida sólo para edificios de 5 plantas o menos que se aplica para el resto de los municipios de la Cerdaña española.

En el caso de la Cerdaña Francesa, el desarrollo de la distribución de las tipologías estructurales en función del año de construcción y el número de plantas de los edificios requirió de visitas de campo por los municipios, datos estadísticos de la base INSEE e información geográfica en la IGN BD-Topo francesa. De esta manera se desarrolló una distribución de tipologías para cada municipio francés.

Tipología		Descripción	Risk-UE	Vi Promedio	Región
Mampostería No Reforzada (URM)	T1	Estructuras con Muros de Piedra	M1.1	0.873	CERD
	T2	Mampostería no reforzada con forjados de madera	M3.1	0.740	CERD
	T3	Mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado	M3.4	0.616	CERD
Hormigón Armado (RC)	T4	Pórticos de hormigón armado con muros de relleno de mampostería	RC3.1	0.402	CERD
	T5	Muros a cortante de hormigón armado	RC2	0.386	FR
Acero	T6	Pórticos de acero con muros de relleno de mampostería	S3	0.484	CERD
Madera a + URM	T7	Estructura de madera sobre una estructura de mampostería no reforzada	N/A	0.500	FR
Adobe	T8	Estructuras de Adobe	M2	0.840	ES

Tabla 4: Tipologías estructurales de la Cerdaña con sus índices de vulnerabilidad.

Plantas	Tipología	Puigcerdà			Demás municipios de la Cerdaña española			Plantas	Tipología	Puigcerdà		
		Antes de 1950	1950 - 1970	Después de 1970	Antes de 1950	1950-1970	Después de 1970			Antes de 1950	1950-1970	Después de 1970
<= 5	T1	15	10	0	15	10	0	> 5	T1	0	0	0
	T2	75	15	5	75	25	5		T2	100	0	0
	T3	0	75	55	0	65	60		T3	0	80	80
	T4	0	0	30	0	0	25		T4	0	0	0
	T5	0	0	0	0	0	0		T5	0	0	0
	T6	0	0	10	0	0	10		T6	0	20	20
	T7	0	0	0	0	0	0		T7	0	0	0
	T8	10	0	0	10	0	0		T8	0	0	0
	T9	0	0	0	0	0	0		T9	0	0	0

Tabla 5: Distribución de las tipologías estructurales de la Cerdaña española.

Basados en los datos disponibles relacionados a los edificios en los polígonos de población, se escogieron los modificadores de la vulnerabilidad basados en los índices recomendados en el proyecto RISK-UE. Estos modificadores del índice de vulnerabilidad se muestran en la Tabla 6 y toman en consideración el número de plantas, la condición de planta débil o piso blando y el nivel del código sismorresistente utilizado en el diseño. En el caso de la Cerdaña sólo los municipios más importantes en población han sido modificados

por la condición de planta débil. Para la región se considera que las estructuras recientes cumplen con una normativa sismorresistente de nivel bajo, por lo que se aplica el modificador para la condición de ausencia de código o aplicación de un código bajo.

Modificador de Vulnerabilidad	Tipología	Indicador	Valores
Número de Plantas	Mampostería	Bajo - Medio (1 a 5)	0.00
		Alto (6 o más)	+0.06
	Hormigón Armado (RC)	Bajo - Medio (1 a 5)	0.00
		Alto (6 o más)	+0.08
Planta Débil	Todas	Transparencia	+0.04
Nivel de Código de Diseño	Hormigón Armado (RC)	Ninguno o Bajo	+0.16
		Medio	0.00
		Alto	-0.16

Tabla 6: Modificadores del índice de vulnerabilidad que serán aplicados.

Vulnerabilidad Sísmica de la Cerdaña

La vulnerabilidad sísmica de la Cerdaña se evaluó utilizando las dos metodologías expuestas en las secciones anteriores. Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica mediante la metodología basada en las clases de vulnerabilidad para los municipios como para cada parte de la Cerdaña se muestran en la Figura 7. Un dato importante de esta evaluación es que ambas partes de la Cerdaña se evalúan con una misma distribución de clases de vulnerabilidad lo que permite comparar el nivel de vulnerabilidad en las mismas. De esta manera se observa que los edificios de la Cerdaña francesa son menos vulnerable que los de la Cerdaña española, dado que poseen mayores porcentajes de edificios con clases de vulnerabilidad C y D y menores porcentajes de edificios con clases A y B. Aún así la vulnerabilidad de ambas partes se puede clasificar como baja.

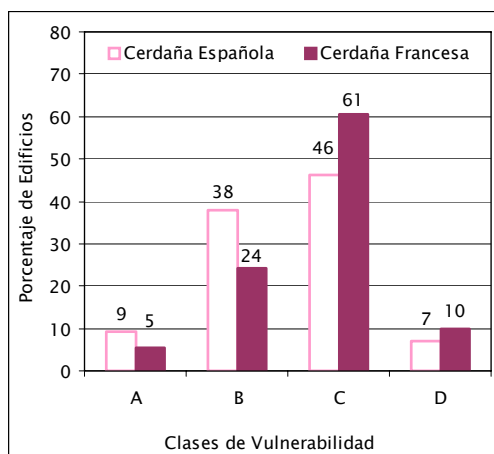


Figura 7 : Vulnerabilidad de Cerdaña según las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98.

En el mapa de la distribución de las clases de vulnerabilidad obtenida en cada municipio de la Cerdaña (Figura 7) se observa que la clase de vulnerabilidad C domina la distribución de vulnerabilidad para la gran mayoría de los municipios de la Cerdaña francesa, mientras que para algunos de los municipios franceses prevalece la clase de vulnerabilidad B. La distribución de la vulnerabilidad es más variada en la Cerdaña

española de la Cerdaña donde la distribución de vulnerabilidad en algunos municipios es dominada por la clase de vulnerabilidad C, en otros prevalece la clase de vulnerabilidad B y en algunos los porcentajes de estas dos clases son similares.

La distribución de la vulnerabilidad obtenida mediante el método del índice de vulnerabilidad se ha expresado utilizando unos rangos de índice de vulnerabilidad que se aproximan a las clases de vulnerabilidad para facilitar la comparación de resultados de las dos metodologías. Esta equivalencia ha sido inferida a partir de Giovinazzi y Lagomarsino (2004) y Giovinazzi (2005) puesto que en su definición original un índice de vulnerabilidad puede indicar la pertenencia a una de dos clases de vulnerabilidad como se puede ver en la Figura 8.

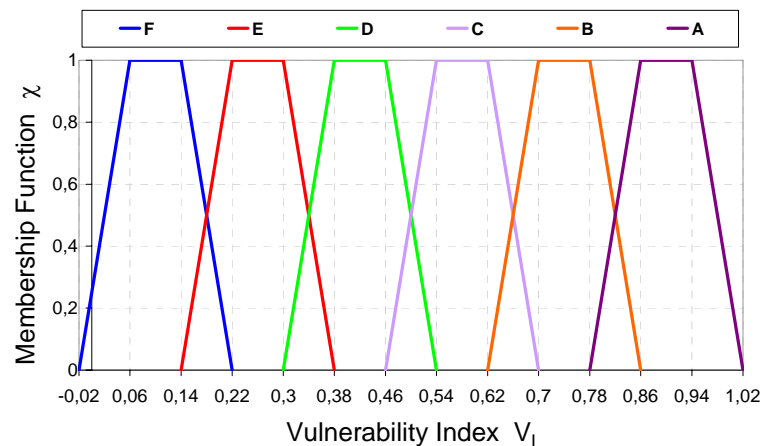


Figura 8 : Equivalencia entre las clases de vulnerabilidad y los índices de vulnerabilidad (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004; Giovinazzi, 2005).

Utilizando el método del índice de vulnerabilidad se obtiene una distribución del índice de vulnerabilidad para cada polígono de población dentro del municipio. La distribución del índice de vulnerabilidad global para Cerdaña y para cada municipio se muestra en la Figura 9. En este caso, la distribución de la vulnerabilidad de cada parte de la Cerdaña viene influenciada por una distribución de tipologías estructurales que es propia de cada región, por lo que las diferencias en los resultados son más marcadas. Como se puede apreciar la distribución del índice de vulnerabilidad obtenida para la Cerdaña española es similar a la obtenida usando el método basado en las clases de vulnerabilidad aunque con el método del índice de vulnerabilidad el porcentaje asociado a la clase de vulnerabilidad A es mayor, mientras que el asociado a la clase de vulnerabilidad D es menor.

La distribución de vulnerabilidad para la Cerdaña francesa según el método del índice de vulnerabilidad difiere bastante de la obtenida con el método basado en clases de vulnerabilidad pues en este último la distribución de clases que se usó desarrollada por Chávez (1998) estaba especialmente adaptada a la región del Cataluña y no necesariamente representa las características de la Cerdaña francesa. Al compararse con la proveniente del método basado en clases de vulnerabilidad, la distribución para la Cerdaña francesa obtenida mediante la aplicación del método del índice de vulnerabilidad refleja un mayor porcentaje de edificios asociados a la clase de vulnerabilidad A y porcentajes menores para los asociados a las clases de vulnerabilidad B y D.

La Figura 9 también muestra el índice de vulnerabilidad promedio obtenido para cada uno de los municipios de la Cerdaña. El índice de vulnerabilidad promedio se calcula como el promedio ponderado en función del número de edificios asociado a cada valor del índice de vulnerabilidad disponible en el municipio. Como se puede observar los municipios con el

mayor índice de vulnerabilidad promedio están en lado francés de la Cerdaña y la mayoría de los municipios de la Cerdaña tienen un índice de vulnerabilidad promedio entre 0.67 y 0.81.

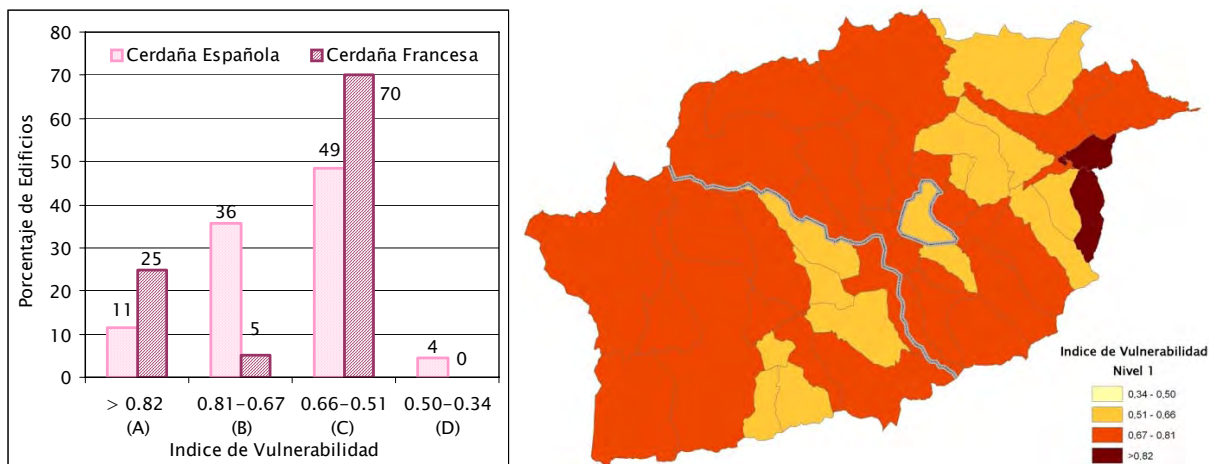


Figura 9 : Vulnerabilidad de Cerdaña según el método del índice de vulnerabilidad.

La Figura 10 presenta las dos distribuciones de la vulnerabilidad obtenidas para todo el conjunto de la Cerdaña mediante las dos metodologías expuestas. Ambas distribuciones coinciden en que la región está caracterizada por una mayoría de edificios asociados a la clase de vulnerabilidad C y/o índices de vulnerabilidad entre 0.66 y 0.51. Las dos distribuciones tienden a asemejarse a la distribución obtenida para la Cerdaña francesa dado que posee el 65% de los edificios de la región. El índice de vulnerabilidad promedio obtenido para la región completa es de 0.6734, considerándose como una región de vulnerabilidad baja. Este nivel bajo de vulnerabilidad es normal para la región dado que se caracteriza por edificaciones de pocas plantas que en su mayoría han sido construidas en los últimos 40 años.

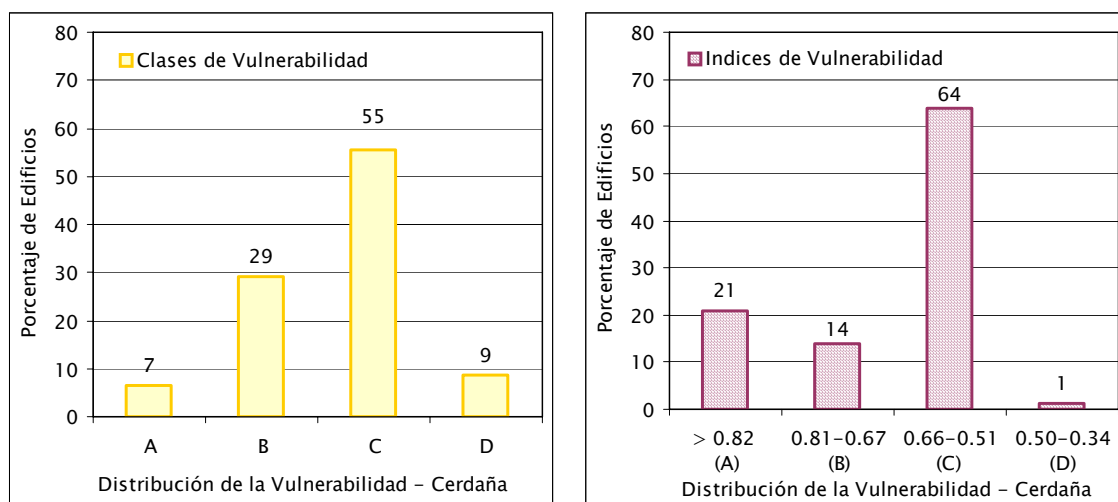


Figura 10 : Vulnerabilidad de la Cerdaña según las dos metodologías consideradas.

Escenario Determinista de Daños basado en el Terremoto de 1428

En la Figura 11 se muestran las distribuciones de daño obtenidas para la Cerdaña usando las metodologías consideradas en el escenario determinista. La distribución de daño

obtenida mediante el método basado en las clases de vulnerabilidad (izquierda) no considera los efectos de suelos definidos para la región por Macau et al. (2007), mientras que la distribución de daños según el método del índice de vulnerabilidad si los incluye.

Como se puede observar ambas distribuciones están centradas en los grados de daños 0 y 1 asociados a la condición de no daño y daños leves, respectivamente. Aun siendo un área de baja vulnerabilidad, las intensidades de este escenario basado en el terremoto de 1428 hacen que se obtengan porcentajes de edificios asociados a grados de daños 3, 4 y 5 asociados a daños severos, muy severos y colapsos. Al incluir los efectos de suelos en el cálculo de la distribución de daño esperada para la Cerdaña se obtienen porcentajes mayores de estos grados de daños por lo que algunos edificios de la región podrían verse muy afectados. Un 11% de los edificios de la Cerdaña podrían experimentar daños severos, mientras que un 4% estarían afectados por daños muy severos. El porcentaje asociado a edificios colapsados es inferior a 1, pero dado que la Cerdaña tiene más 16,000 edificios este bajo porcentaje podría representar que cerca de 50 edificios podrían colapsar.

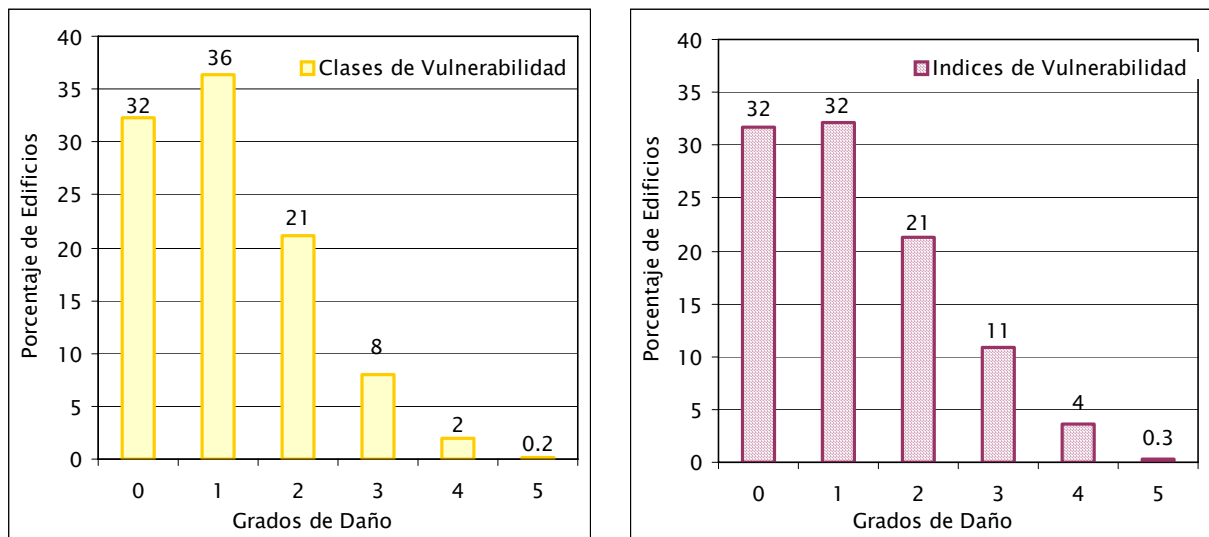


Figura 11 : Distribuciones de daños en la Cerdaña para el escenario determinista basado en el terremoto de 1428.

Mapa Probabilista de Daños para un Periodo de Retorno de 475 Años

Las distribuciones de daño calculadas para la Cerdaña usando el escenario probabilista para un periodo de retorno de 475 años se presentan en la Figura 12. Al comparar estas distribuciones de daños con las obtenidas para el escenario de determinista basado en el terremoto de 1428 podemos observar que los daños esperados son inferiores para el escenario probabilista. Esto es así porque el escenario probabilista considera que toda la región se ve afectada por una intensidad en suelo medio de VII grados, mientras que el escenario determinista la intensidad un suelo medio varía de VI-VII grados en un municipio del oeste de la Cerdaña hasta VII-VIII en los municipios de la parte este de la Cerdaña francesa.

En este escenario probabilista, con un periodo de retorno de 475 años e incluyendo efectos de suelo, un 9% de los edificios podrían sufrir daños severos y un 3% de los mismos tienen la probabilidad de experimentar daños muy severos. Según los resultados del escenario de daños, se puede esperar que el porcentaje de edificios colapsados sea

prácticamente nulo aunque existe la probabilidad de que alrededor de 20 edificios puedan colapsar.

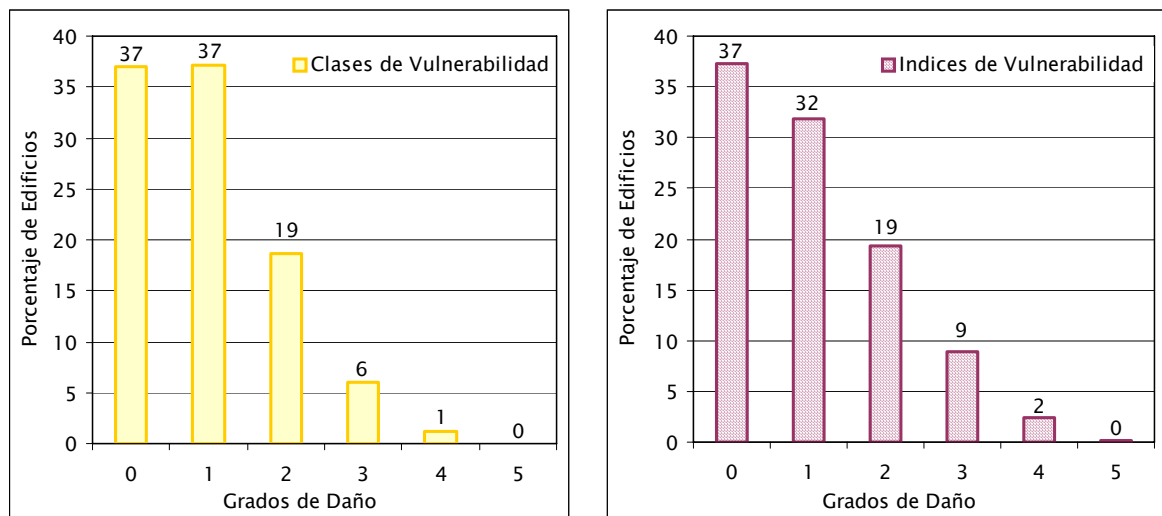


Figura 12 : Distribuciones de daños en la Cerdaña debido al escenario probabilista para un periodo de retorno de 475 años.

Evaluación de las Pérdidas Asociadas a los Escenarios Considerados

Las pérdidas asociadas a los escenarios determinista y probabilista se han expresado en términos de edificios inhabitables, personas sin hogar, heridos y víctimas mortales. Los edificios inhabitables se calcularon sumando la mitad de los edificios con grado de daño 3 más el total de edificios con grados de daño 4 y 5. El número de personas sin hogar se obtiene estimando el número de personas asociado a los edificios inhabitables. El número de heridos leves, heridos graves y víctimas fatales se han calculado utilizando los coeficientes provistos por el ATC-13 (1985). Como los daños obtenidos para los dos escenarios considerados incluyendo efectos de suelos son similares, las pérdidas se presentan de manera conjunta en la Tabla 7.

Debido a estos escenarios podría haber entre 1000 y 1600 edificios inhabitables que tomando en consideración la población residencial de la Cerdaña podrían dejar entre 2000 y 3000 personas sin hogar, hasta 600 personas heridas e incluso podría causar algunas víctimas mortales. La distribución de los edificios inhabitables esperados en el escenario determinista se muestra en la Figura 13. La Cerdaña es una región con poca población residencial que en época de vacaciones o en la temporada de esquí puede incluso triplicar su población por lo que en tiempos de ocupación máxima el número de personas afectadas por estos escenarios podría aumentar considerablemente.

Edificios Inhabitables	1000-1600
Personas Sin Hogar	2000-3000
Heridos Leves	300-500
Heridos Graves	50-100
Victimas Mortales	15-30

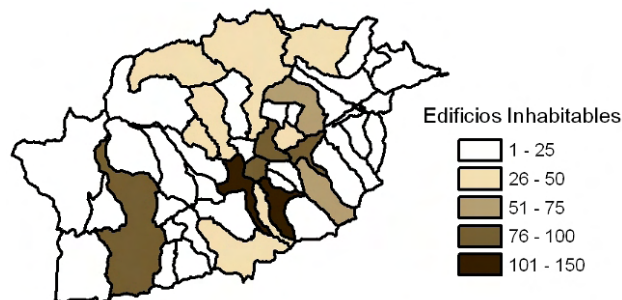


Tabla 7: Pérdidas asociadas a los escenarios considerados.

Figura 13 : Distribución de los edificios inhabitables asociados al escenario determinista.

Conclusiones

La región de la Cerdaña es un área de carácter rural donde los centros de población son pequeños y la densidad de población residente es más bien baja. La Cerdaña se encuentra localizada en la región de los Pirineos una de las zonas sísmicas más activas tanto de España como de Francia por lo que puede verse afectada por sismos importantes como los que ha ocurrido en el pasado en esta región. La mayoría de sus centros de población están localizados a lo largo del valle, haciéndolos más propensos a sufrir las consecuencias de los efectos de suelos expuestos en Macau et al. (2006, 2007).

Dos escenarios sísmicos se consideran para la evaluación de los escenarios de daño. El escenario determinista está basado en la ocurrencia de un terremoto similar al del año 1428 con una intensidad epicentral de IX, mientras que el escenario probabilista consta de las intensidades obtenidas en Secanell et al. (2007a; 2007b) para la región del Pirineo. Al incluir los efectos de suelo en estos escenarios, las intensidades en el escenario determinista varían entre VI-VII y VIII-IX grados, mientras que en el escenario probabilista varían entre VI y VIII grados. Varios municipios de la Cerdaña percibirían la misma intensidad en estos dos escenarios sísmicos.

Los edificios de la región se distinguen por ser en su mayoría de pocas plantas y de reciente construcción lo que contribuye a la baja vulnerabilidad sísmica obtenida mediante las dos metodologías consideradas. La evaluación de la vulnerabilidad basada en las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 utilizó una misma distribución de clases de vulnerabilidad para toda la Cerdaña permitiendo determinar que la parte francesa de la Cerdaña es menos vulnerable que la parte española. Durante la evaluación de la vulnerabilidad mediante el método del índice de vulnerabilidad se desarrolló una distribución de las tipologías estructurales más representativas según número de plantas y año de construcción para cada lado de la Cerdaña constatando las diferencias en vulnerabilidad entre la Cerdaña francesa y española observadas en el primer método. Los resultados de aplicar ambas metodologías indican que la región posee una vulnerabilidad sísmica baja pues la distribución de vulnerabilidad está centrada en la clase de vulnerabilidad C y se ha obtenido un índice de vulnerabilidad promedio de 0.673 mediante el método del índice de vulnerabilidad.

Las distribuciones de daño obtenidas utilizando el método basado en las clases de vulnerabilidad no incluyen los efectos de suelo mientras que las obtenidas con el método del índice de vulnerabilidad si los incluyen. Por esta razón las distribuciones obtenidas con el método del índice de vulnerabilidad presentan daños mayores que las distribuciones de daño basadas en las clases de vulnerabilidad. Los resultados obtenidos muestran que los dos escenarios sísmicos están asociados a distribuciones de daño muy similares, siendo

ligeramente mayores los daños esperados en el escenario determinista basado en el terremoto de 1428. La distribución de daño del escenario probabilista para un periodo de retorno de 475 años revela que un 9% de los edificios de la Cerdaña podrían sufrir daños severos, el 2% podrían afectarse con daños muy severos y hasta existe la probabilidad de que unos 20 edificios puedan colapsar. Estas cifras aumentan para el escenario determinista en el cual un 11% de los edificios de la región serían afectados por daños severos, un 4% podrían presentar daños muy severos y unos 50 edificios podrían colapsar.

Las pérdidas estimadas muestran que estos dos escenarios podrían causar unos 1600 edificios inhabitables, unas 3000 personas sin hogar, alrededor de 600 heridos y hasta unas decenas de víctimas mortales. Hay que tomar en consideración que las cifras de personas afectadas corresponden a condiciones normales de ocupación de la Cerdaña, por lo que, estas cifras indudablemente aumentarían si el escenario ocurre en la época de mayor afluencia de turistas cuando la población de la región puede incluso triplicarse.

Ambas metodologías para la evaluación del daño sísmico han probado ser métodos sencillos que pueden ser fácilmente aplicadas para el desarrollo de escenarios de daños a nivel regional requiriendo un conocimiento estadístico de las características del conjunto de edificios de la región. Estas metodologías se están implantando en un sistema automático de información sísmica desarrollado dentro del proyecto ISARD que enviará una nota informativa minutos después de que ocurra un terremoto, que incluirá una estimación de los posibles daños y estará dirigida a los responsables de Protección Civil (Goula et al., 2007).

Referencias:

- ATC-13, (1985), "Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13". Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Bernardini, A. (2000), "The vulnerability of buildings - Evaluation on the national scale of the seismic vulnerability of ordinary buildings". CNR-GNDT, Rome.
- Chávez, J. (1998), "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional. Aplicación a Cataluña". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, 343 pp.
- Corsanego, A. y Petrini, V. (1994), "Evaluation of criteria of seismic vulnerability of the existing building patrimony on the national territory". Seismic Engineering, Vol. 1 Patron Ed., pp. 76-106.
- Giovinazzi, S., (2005), "The vulnerability assessment and damage scenario in seismic risk analysis". Tesis Doctoral, Technical University of Braunschweig. Alemania, 300 pp.
- Giovinazzi, S. y Lagomarsino, L. (2002), "A methodology for the vulnerability analysis of built-up areas". Proceedings of the International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction, Bucharest, DVD-Rom
- Giovinazzi, S. y Lagomarsino, S. (2004), "A macroseismic method for vulnerability assessment of buildings". Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper ID 896.
- González, M., Irizarry, J., Susagna, T., Goula, X. y Pujades, Ll., (2007), "Realización de escenarios de daños en el Principado de Andorra: Aplicación a la zona más poblada del País". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
- Goula, X., Colas, B., Jara, J.A., Romeu, N., Dominique, P., Susagna, T., Irizarry, J., Sedan, O., Figueras, S., Olivera, C. y Roca, A., (2007), "Sistema de respuesta rápida después de un terremoto en el Pirineo oriental". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.

- Grünthal, G. (editor) (1998), "European Macroseismic Scale 1998". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 7, Luxembourg, 99 pp.
- Macau, A., Figueras, S., Colas, B., Lebrun, B., Bitri, A., Susagna, T., Cirés, J., González, M., y Roullé, A. (2006). "Seismic microzonation in two valleys of the Eastern Pyrenees: Andorra and the Cerdanya". First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, Septiembre 2006.
- Macau, A., Figueras, S., Susagna, T., Colas, B., Le Brun, B., Bitri, A., Cirés, J., González, M., y Roullé, A., (2007), "Microzonación sísmica en el Pirineo Oriental en términos de aceleración y intensidad macrosísmica". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
- Mouroux, P. y Lebrun, B. (2006), "RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns". In: C. S. Oliveira, A. Roca and X. Goula, (Editors), *Assessing and Managing Earthquake Risk*, pp 479 - 508, Springer.
- 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, 407 pp
- Olivera, C., Redondo, E., Lambert, J., Riera Melis, A. y Roca, A. (2007), "Los terremotos de los siglos XIV y XV en el ne de la península ibérica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
- Roca A., Goula X., Susagna T, Chávez J., González M. y Reinoso, E. (2006), "A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Spain". *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol 4, pp 141 -158.
- Sandi H., y Floricel I., (1995), "Analysis of seismic risk affecting the existing building stock". *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp 1105-1110.
- Secanell, R., Martin, Ch. Goula X., Susagna T, Tapia M., Bertil D., Dominique P., Carbon D. and Fleta J. (2007a), "Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region". *Journal of Seismology*, (Accepted).
- Secanell, R., Martin, Ch. Goula X., Susagna T, Tapia M., Bertil D., Dominique P., Carbon D. and Fleta J. (2007b), "Evaluación Probabilista de la Peligrosidad Sísmica de la Region Pirenaica". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona, 16 pp.
- Sponheuer, W. (1960), "Methoden zur Herdtirefenbestimmung in der Makroseismic". *Freiberger Forschungshefte*, C88, 117 pp.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto interreg ISARD (Información Sísmica Automática 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).