

## CAPÍTULO 11

### ANÁLISIS DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL SISTEMA SANITARIO DE CATALUÑA

#### 11.1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la respuesta sísmica de un sistema esencial consiste en la calificación de su capacidad de atender los niveles de demanda impuestos por una crisis sísmica, de manera que permita identificar y diagnosticar situaciones que comprometan la efectividad de su funcionamiento, facilitando la toma de decisiones relativas a la optimización de sus funciones. En el caso específico del sistema sanitario, se persigue calificar la capacidad que tiene el sistema y en particular los hospitales que lo integran, para atender la demanda del servicio sanitario por parte de las víctimas que surgen como consecuencia del evento sísmico.

Desde este punto de vista, el problema creado por el binomio capacidad-demanda exige la apropiada caracterización de ambos elementos, donde la capacidad del sistema es función de la demanda y la demanda es función de la capacidad, por lo tanto el problema de evaluar la capacidad de respuesta sísmica del sistema sanitario no es fácilmente soluble y exige el establecimiento de una serie de suposiciones que permita analizar el desempeño sísmico de un sistema sanitario concreto bajo unas situaciones de demanda razonable.

El presente capítulo tiene como objeto la evaluación de la respuesta sísmica del sistema sanitario de Cataluña, con miras a calificar y diagnosticar el desempeño sísmico del sistema en general y de cada uno de sus hospitales integrantes en particular. El mismo será desarrollado sobre la base del estudio de diferentes situaciones que son extrapolables a otros escenarios y sistemas. Siguiendo la propuesta de Coburn y Spence (1992), el análisis del comportamiento del sistema se ha desarrollado sobre la base del estudio de tres situaciones concretas; el estudio de escenarios (históricos y simulados), el estudio de pérdidas potenciales y el análisis de riesgo. Aunque los resultados aportados por cada una de estas situaciones son complementarios entre sí, la filosofía que rige esta simulación se fundamenta en el sometimiento del sistema a una demanda concreta para examinar la evolución temporal de la resolución de la emergencia sanitaria planteada.

El caso más sencillo consiste en el *estudio de escenarios sísmicos*. En este caso se han utilizado dos tipos de ejemplos: los sismos históricos más fuertes ocurridos o que han afectado Cataluña y otros sismos simulados que permiten probar el desempeño del sistema bajo condiciones de interés adaptadas a la configuración actual de la distribución de población y sistema de comunicaciones. La aplicación realizada se fundamenta en el enfoque de *vulnerabilidad sistémica*, descrito en los capítulos 7 y 8, que encierra una complejidad notable pues, aún con las simplificaciones introducidas, requiere de una gran cantidad de información concretamente sobre las leyes de atenuación de la intensidad, los edificios, población, hospitales, vías de comunicación y una gestión interrelacionada. Las hipótesis y parámetros propuestos permiten resolver el problema de una forma operativa y capaz de identificar y caracterizar el desempeño sísmico del sistema.

Resuelto el problema individual de una crisis sísmica, se trata de analizar la capacidad de respuesta del sistema sanitario a los niveles de peligrosidad sísmica propios de la región. Para ello se efectúan dos análisis adicionales. El primero es un *estudio de*

*pérdidas potenciales* que consiste en materializar los sismos esperados para períodos medios de retorno de aproximadamente 75, 500 y 1000 años. Para cada punto de una malla de 1476 nodos que cubren el área de Cataluña con celdas de 10x10 Km., se ha establecido el sismo característico del período medio de retorno considerado, correspondiente a la zona sismogénica en la que se halla el punto (epicentro). Para este sismo se ha evaluado el comportamiento del sistema determinando los parámetros más significativos de la respuesta: número de heridos graves, número de camas perdidas, tiempo de atención de la emergencia, factor de respuesta del sistema y factor de respuesta normalizado. Estos resultados han sido asignados al punto de la malla e interpolados para proporcionar representaciones continuas de los efectos asociados a los sismos evaluados. De forma que ha sido posible el análisis de la solicitud y respuesta del sistema para estos escenarios probabilistas estableciendo las pérdidas potenciales del sistema para cada período medio de retorno considerado.

Finalmente, y con el objetivo de estimar y caracterizar el nivel de adecuación de cada hospital, se ha realizado un *análisis de riesgo* entendido como la probabilidad anual de pérdidas por causa sísmica. El algoritmo se basa en el análisis de sismos individuales. En este caso se ha considerado una malla formada por celdas de 5x5 Km., con un total de 17.199 puntos o nodos que cubren el área de influencia de Cataluña. El algoritmo consiste en identificar, para cada punto de evaluación, la zona sismogénica correspondiente y evaluar para dicho epicentro, una sucesión de escenarios sísmicos, con intensidades comprendidas entre  $i_{min}$  e  $i_{max}$ , características de la zona sismogénica (ver Tabla 9.6.), con incrementos de medio grado. Cada uno de estos sismos se caracteriza mediante la probabilidad anual de excedencia. Un total de 60940 escenarios sísmicos han sido considerados, y para cada uno se han acumulado sus posibles efectos o consecuencias sobre la comunidad y los diferentes elementos expuestos (edificaciones, víctimas, hospitales, etc.), a los fines de estimar los niveles probables de pérdidas debidos a todos los sismos en un período de tiempo determinado. Los resultados en este caso se dan en términos de probabilidades anuales de excedencia de parámetros específicos que caracterización el comportamiento sísmico de cada hospital.

Con los resultados de cada uno de los tres casos analizados se ha caracterizado el comportamiento global del sistema y el comportamiento de cada hospital dentro del mismo. Es importante destacar que a pesar de que el modelo implementado permite hacer consideraciones diversas sobre la materia, en todas las evaluaciones realizadas y presentadas en este capítulo se ha supuesto que tanto el sistema vial como el sistema de comunicaciones, permanecen completamente operativos, durante y después del evento sísmico. Esta consideración se ha mantenido a los fines de simplificar la interpretación de los resultados. Asimismo, es conveniente acotar, a los fines de lograr una correcta interpretación de los resultados, la referencia a *camas perdidas*, no implica necesariamente un daño estructural significativo del hospital y mucho menos un colapso estructural. Por el contrario, este parámetro refleja un limitación o degradación de la capacidad de prestar servicio del centro hospitalario, asociado al grado de daño GD2, que compromete el mantenimiento de la funcionalidad de la instalación, tal como se ha desarrollado en el apartado 8.3.2.2., del capítulo 8.

## 11.2. ESTUDIO DE ESCENARIOS

A continuación se describe el estudio de escenarios realizado sobre la base de sismos históricos de interés y de sismos simulados. Adicionalmente, se reproducen en

detalle y a título de ejemplo, los resultados obtenidos para tres de los escenarios simulados estudiados con epicentro en el Pirineo Aragonés. El Anexo III, reproduce los escenarios sísmicos correspondientes a cada uno de los sismos estudiados (históricos y simulados). En dichas representaciones, se ha mantenido una misma definición de la escala de intensidades y del número estimado de heridos graves, para facilidades comparativas. Todos los escenarios han sido obtenidos a partir del modelo implementado, con excepción de la distribución de intensidades de la Fig. A.3.1., que reproduce la distribución de intensidades correspondiente al mapa de isosistas del sismo de Ripollès de 1428. (Chávez, 1998)

### 11.2.1. Sismos históricos

De la revisión de los catálogos de sismos ocurridos en la región de Cataluña (IGN, 1982; Mezcuca y Martínez-Solares, 1983; Susagna y Goula, 1999), se han seleccionado algunos de los eventos más representativos ocurridos en cada provincia, con disponibilidad de información de isosistas, a los fines de reproducir el impacto de un sismo similar en las condiciones actuales, sobre todo en cuanto a la capacidad de respuesta sísmica del sistema sanitario de la región. La Tabla 11.1.a., reproduce las particularidades de los eventos considerados en esta evaluación. La Tabla 11.1.b., resume los principales resultados obtenidos, en términos de los parámetros descritos en el apartado 8.4., del capítulo 8., para la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica del sistema sanitario.

Tabla 11.1.a. Sismos históricos estudiados

<i>Provincia</i>	<i>Localidad</i>	<i>Ident.</i>	<i>Fecha</i>	<i>Intensidad</i>
Girona	Camprodon (Ripollès)	CAM9	2/2/1428	IX
Lleida	Vielha	VI8	19/11/1923	VIII
Tarragona	Tivisa	TI7	3/10/1945	VII
Barcelona	Sant Celoni	SC7	12/3/1927	VII
	NE de Garraf (Sitges)	SI6		VI
	Cabrils	CA6		VI
	Teia	TE6		VI

Tabla 11.1.b. Resumen resultados: Sismos históricos estudiados

<i>Ident.</i>	<i>CAM9</i>	<i>VI8</i>	<i>TI7</i>	<i>SC7</i>	<i>SI6</i>	<i>CA6</i>	<i>TE6</i>
<i>NHG</i>	10351	929	48	916	78	410	565
<i>TCP</i>	3566	53	20	207	57	83	0
<i>Tmax</i>	--	220	40	45	35	40	35
<i>FR</i>	C	10670	105	3491	346	1402	1184
<i>FRN</i>	O	11.48	2.19	3.81	4.44	3.42	2.10
<i>H1</i>	L	54	4	28	4	18	22
<i>H2</i>	A	3	1	2	2	1	0
<i>H3</i>	P	0	0	1	0	0	0
<i>Hsat</i>	S	9	1	11	2	6	5
<i>Hinop</i>	O	2	0	3	2	1	0

*NHG* - Número total de heridos graves

*Tmax* - Tiempo máximo de atención (minutos)

*H1* - Hospitales usados, sin daño

*H2* - Hospitales usados, con daño parcial.

*Hsat* - Hospitales saturados.

*TCP* - Total de camas perdidas.

*FR* - Factor de respuesta del sistema

*FRN* - Factor de respuesta normalizado del sistema

*H3* - Hospitales colapsados<sup>1</sup>.

*Hinop* - Hospitales inoperantes<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Por hospital colapsado se entiende, el que pierde el 100% de las camas, siendo imposible el mantenimiento de sus funciones, por daños estructurales, no estructurales o funcionales y por tanto, obligado a trasladar el total de sus pacientes ordinarios.

De los resultados obtenidos en la reproducción de los sismos históricos seleccionados, llama inmediatamente la atención, el colapso total del sistema sanitario de Cataluña, en caso de repetirse un evento con las mismas características del sismo de Ripollès del 02/02/1428 en Camprodon. De hecho, el número total de heridos graves esperados en este escenario (CAM9), superaría significativamente la capacidad del sistema, que cuenta con más de 2.900 camas disponibles. Más aún, el total de camas perdidas representaría el 22% de la capacidad instalada. Si bien este evento constituye una condición excepcional, asociada a un período medio de retorno del orden de 10000 años, no deja de ser un caso extremo que debe ser considerado en el momento de establecer comparaciones.

Del resto de los sismos históricos estudiados, resalta el escenario del sismo de Vielha (VI8) y del sismo de Sant Celoni (SC7), que a pesar de tener diferentes intensidades macrosísmicas epicentrales, conducen a un total de heridos graves similares. Los resultados obtenidos en la evaluación, muestran que la respuesta del sistema sanitario es completamente diferente en ambos casos, según lo refleja el factor de respuesta del sistema. Aunque en el sismo de Vielha (VI8), el total de camas perdidas es relativamente bajo, las limitaciones en la viabilidad existente y los largos recorridos de los traslados de pacientes entre hospitales tiende a prolongar el tiempo máximo de atención de heridos. Por otra parte, la limitada capacidad hospitalaria en dicha región, exige del apoyo de un mayor número de hospitales de referencia, bastante distantes de la zona epicentral, evidenciando una limitada capacidad de respuesta del sistema ante sismos en esta región, que por lo demás destaca como la zona de mayor actividad sísmica. Por su parte, para el sismo de Sant Celoni (SC7), el total de camas perdidas es mayor, pero la capacidad hospitalaria instalada en la región, unida a una red vial mucho más eficiente, permite cubrir la atención de los heridos graves en un tiempo relativamente corto, con lo cual la respuesta del sistema es más eficiente, a pesar de los costos directos asociados a las camas perdidas. Un análisis similar puede ser hecho al comparar el sismo de Cabrils (CA6) y el sismo de Teia (TE6).

Estos resultados ponen de manifiesto, el carácter no trivial de la interpretación de la respuesta sísmica del sistema sanitario ante diferentes escenarios potenciales y la importancia de la interrelación con otros sistemas, que ha sido reproducida gracias al enfoque sistémico implementado.

### 11.2.2. Sismos simulados

Sobre la base de los parámetros característicos que definen las zonas sismogénicas con influencia directa en la región de Cataluña, es posible examinar aquellas zonas con potencial de producir eventos sísmicos capaces de inducir niveles de daños apreciables tanto sobre la población como sobre el sistema sanitario. La evaluación de las mismas permite determinar que las zonas fuentes identificadas como 7, 8-V y 4-O representan las zonas con mayor potencial sísmico y sobre las cuales se han definido diferentes escenarios simulados de evaluación.

Los escenarios simulados estudiados se corresponden con los principales escenarios críticos ( $I_0 > V$ ), asociados a períodos medios de retorno de 1000, 500 y 75 años; es decir, con una probabilidad aproximada de excedencia de 5, 10 y 50% en 50 años. La ubicación del epicentro se corresponde con el principal poblado de la zona en cuestión. La definición

---

<sup>2</sup> Por hospital inoperante se entiende, el que pierde un número de camas mayor o igual que las disponibles y por tanto, no está en capacidad de recibir heridos graves adicionales y por el contrario, obligado a trasladar parte de sus pacientes ordinarios.

de la intensidad epicentral  $I_0$ , exige la imposición de un criterio que permita su definición. En este modelo, se ha adoptado de manera preliminar, para zonas fuentes extensas, la definición de un sector de la fuente de área constante, equivalente al área media epicentral asociada al radio  $R_0$  establecido en la ley de atenuación. Asimismo, se han simulado dos escenarios críticos con epicentros en la ciudad de Barcelona. La Tabla 11.2.a., reproduce las particularidades de los sismos simulados considerados en esta evaluación. La Tabla 11.2.b., resume los principales resultados obtenidos en términos de los parámetros descritos en el apartado 8.4., del capítulo 8., para la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica del sistema sanitario.

Tabla 11.2.a. Sismos simulados estudiados

Zona Fuente	Epicentro	Periodo retorno $Tr$ .	Ident.	Intensidad epicentral $I_0$
8	Pirineo Aragonés (25121)	1000	PA3	VIII-IX
		500	PA2	VII-VIII
		75	PA1	VI-VII
4-O	Olot (17114)	1000	O3	VI-VII
		500	O2	V-VI
8-V	Vielha (25243)	1000	V3	VI-VII
2	Barcelona (08019)	1000	BCN3	VI
		500	BCN2	V-VI

Tabla 11.2.b. Resumen resultados: Sismos simulados estudiados

$Tr$ (años)	1000				500			75
	PA3	O3	BCN3	V3	PA2	O2	BCN2	PA1
NHG	916	36	2721	28	159	9	855	4
TCP	40	0	1095	16	31	0	256	8
$T_{max}$	195	45	--	130	180	15	30	10
FR	13587	130	C	748	4400	17	2040	4
FRN	14.83	3.61	O	26.7	27.68	1.89	2.39	1
H1	54	4	L	3	7	1	23	0
H2	1	0	A	1	0	0	2	1
H3	1	0	P	0	1	0	0	0
Hsat	8	1	S	0	4	0	2	1
Hinop	2	0	O	1	1	0	2	0

De los resultados obtenidos en los escenarios de sismos simulados, llama la atención el colapso total del sistema sanitario de Cataluña, en caso de producirse un evento asociado a un período medio de retorno de 1000 años con epicentro en la ciudad de Barcelona. En este escenario (BCN3), el número total de heridos graves esperados superaría la capacidad remanente del sistema, luego de reducir el total de camas disponibles por el total de camas perdidas, que alcanza aproximadamente el 7% de la capacidad instalada. Si bien, este escenario está asociado a un sismo extremo o máximo, debe ser considerado al momento de calificar la capacidad de respuesta del sistema sanitario.

### 11.2.3. Sismo en el Pirineo Aragonés

A continuación se reproducen en detalle y a título de ejemplo, los resultados obtenidos para tres de los sismos simulados, con epicentro en el Pirineo Aragonés, asociados a un período medio de retorno  $Tr = 1000, 500$  y  $75$  años, identificados respectivamente como PA3, PA2 y PA1, y en correspondencia con las Figuras A.3.9.,

A.3.10. y A.3.11. del Anexo III. El interés de este caso obedece a que la zona sismogénica identificada como 7, presenta el mayor potencial sísmico de la región de Cataluña, (ver Fig. 9.15). Esta evaluación, persigue ilustrar los efectos sobre la población y el sistema sanitario de la región de un sismo en dicha zona, asociado a diferentes probabilidades de ocurrencia y comparar los resultados que pueden ser obtenidos para cada escenario estudiado.

La Fig. 11.1., reproduce la evolución temporal de atención de los heridos graves estimados en los tres escenarios considerados. Para el escenario PA3, tal como se observa de la Fig. A.3.9., se espera que prácticamente 2/3 partes de los heridos graves ocurran en Barcelona, sus alrededores y los principales municipios de la región<sup>3</sup>, quienes recibirán atención médica inmediata, pues la infraestructura hospitalaria de estos sectores será poco afectada. Sin embargo, el resto de afectados de la zona epicentral, deberán trasladarse a hospitales lejanos, ya que tanto el hospital Espitau Val d’Aran (7) y la Fundació Sant Hospital (9), permanecerán inoperantes. Manteniendo operativa la vialidad y los sistemas de comunicación, la evolución temporal de atención de heridos graves exige la participación de un total de 54 hospitales en la atención de la emergencia, de los cuales 8 hospitales saturarán su capacidad disponible y el total de heridos será atendido en un tiempo estimado superior a las 3 horas. Para el escenario PA2, se espera que prácticamente el 80% de los heridos pertenezcan a la zona epicentral, donde nuevamente el hospital Espitau Val d’Aran (7) quedará inoperante y la Fundació Sant Hospital (9), a pesar de mantenerse operativo, será poca su contribución debido a su limitada capacidad disponible. De manera que los heridos deben trasladarse hasta hospitales lejanos en busca de atención médica, involucrando un total de 7 hospitales, de los cuales 4 se saturarán y el tiempo estimado de atención se extenderá hasta 3 horas. Finalmente, para el escenario PA1, a pesar de sufrir algún nivel de degradación en su capacidad de prestar servicios, la capacidad remanente del hospital Espitau Val d’Aran (7), permitirá cubrir de manera inmediata, la pequeña demanda de heridos graves esperados en el sector.

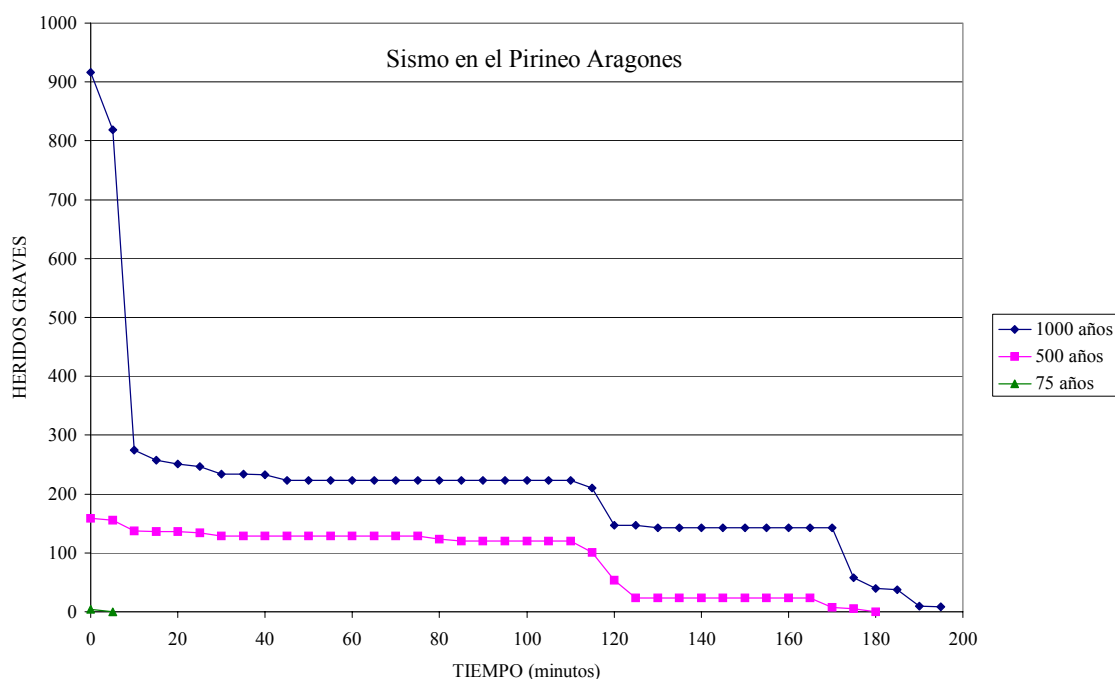


Fig. 11.1. Evolución temporal atención heridos graves

<sup>3</sup> Si bien este resultado parece un poco exagerado, surge como consecuencia de la ley de atenuación con la distancia asociada a dicha zona fuente

La Tabla 11.3., resume los principales resultados obtenidos en estos escenarios simulados. Llama la atención que para los escenarios PA3 y PA2, a pesar que el total de camas perdidas y el tiempo máximo de atención sean similares, el factor de respuesta del sistema del escenario PA3, sea significativamente mayor que el respectivo factor del escenario PA2. La normalización de este factor por el número de heridos graves (*FRN*), evidencia que la calificación de la respuesta sísmica del sistema es relativa a la demanda inicial del mismo como consecuencia del evento sísmico.

Tabla 11.3. Resumen de resultados obtenidos

<i>Ident.</i>	<i>PA3</i>	<i>PA2</i>	<i>PA1</i>
<i>Tr (años)</i>	1.000	500	75
<i>NHG</i>	916	159	4
<i>TCP</i>	40	31	8
<i>Tmax</i>	195	180	5
<i>FR</i>	13587	4400	4
<i>FRN</i>	14.83	27.68	1.00

Las Tablas 11.4.a., 11.4.b. y 11.4.c., resumen el desempeño de cada uno de los hospitales involucrados en la atención de la emergencia, asociada a cada uno de los tres escenarios estudiados. En particular, se reporta para cada hospital, el número de camas totales *NCtot*, el número de camas perdidas *NCper*, el número de camas efectivas *NCefec*, el número de camas ocupadas inicialmente *NCocup(i)*, el número de camas disponibles *NCdis(i)*, el número total de heridos graves que se trasladan hasta el centro hospitalario *NH*, el número de camas ocupadas al final del proceso *NCocup(f)*, el número de camas disponibles al final del proceso *NCdis(f)*, el tiempo de saturación<sup>4</sup> en minutos *Tsat*, un índice de uso<sup>5</sup> del hospital *Ind.Usa* y el factor de respuesta del hospital *FRH*, determinado según lo establecido en el apartado 8.4.2. del capítulo 8.

Tabla 11.4.a. Desempeño de los hospitales afectados – Escenario PA1 (*Tr* = 75 años)

ESCENARIO: PA1												
HOSP	<i>NCtot</i>	<i>NCper</i>	<i>NCefec</i>	<i>NCocup(i)</i>	<i>NCdis(i)</i>	<i>NH</i>	<i>NCocup(f)</i>	<i>NCdis(f)</i>	<i>Tsat</i>	<i>Ind.Usa</i>	<i>FRH</i>	
7	31	8	23	19	4	4	23	0	5	3	0.84	

Tabla 11.4.b. Desempeño de los hospitales afectados – Escenario PA2 (*Tr* = 500 años)

ESCENARIO: PA2												
HOSP	<i>NCtot</i>	<i>NCper</i>	<i>NCefec</i>	<i>NCocup(i)</i>	<i>NCdis(i)</i>	<i>NH</i>	<i>NCocup(f)</i>	<i>NCdis(f)</i>	<i>Tsat</i>	<i>Ind.Usa</i>	<i>FRH</i>	
7	31	31	0	0	0	129	0	0	0	4	28.14	
8	42	0	42	28	14	16	42	0	85	2	1.14	
9	36	0	36	28	8	2	30	6	-1	2	0.25	
10	132	0	132	76	56	59	132	0	125	2	1.05	
11	125	0	125	107	18	21	125	0	120	2	1.17	
12	434	0	434	390	44	63	434	0	120	2	1.43	
21	64	0	64	52	12	1	53	11	-1	2	0.08	
25	273	0	273	191	82	24	215	58	-1	2	0.29	

<sup>4</sup> el tiempo de saturación indicado como -1, representa que el hospital no alcanza a saturarse, manteniendo disponibilidad de camas hasta el final del proceso. El valor 0, refleja un hospital inoperante.

<sup>5</sup> el índice de uso se corresponde con la siguiente convención; 2 – hospital usado sin daño, 3 – hospital usado con daño parcial y 4 – hospital colapsado.

Tabla 11.4.c. Desempeño de los hospitales afectados – Escenario PA3 (Tr = 1000 años)

ESCENARIO: PA3											
HOSP	NCtot	NCper	NCefec	NCocup(i)	NCdis(i)	NH	NCocup(f)	NCdis(f)	Tsat	Ind.Uso	FRH
1	120	0	120	74	46	1	75	45	-1	2	0.02
4	355	0	355	273	82	13	286	69	-1	2	0.16
5	170	0	170	117	53	4	121	49	-1	2	0.08
6	266	0	266	212	54	5	217	49	-1	2	0.09
7	31	31	0	0	0	219	0	0	0	4	46.74
8	42	0	42	28	14	31	42	0	30	2	2.21
9	36	9	27	27	0	11	27	0	0	3	2.25
10	132	0	132	76	56	61	132	0	120	2	1.09
11	125	0	125	107	18	29	125	0	120	2	1.61
12	434	0	434	390	44	75	434	0	115	2	1.70
14	29	0	29	27	2	1	28	1	-1	2	0.50
16	82	0	82	62	20	1	63	19	-1	2	0.05
17	149	0	149	104	45	2	106	43	-1	2	0.04
18	131	0	131	86	45	1	87	44	-1	2	0.02
19	423	0	423	329	94	9	338	85	-1	2	0.10
20	101	0	101	90	11	5	95	6	-1	2	0.45
21	64	0	64	52	12	3	55	9	-1	2	0.25
22	330	0	330	280	50	21	301	29	-1	2	0.42
23	120	0	120	84	36	4	88	32	-1	2	0.11
24	110	0	110	88	22	1	89	21	-1	2	0.05
25	273	0	273	191	82	82	273	0	195	2	1.00
26	466	0	466	419	47	2	421	45	-1	2	0.04
27	224	0	224	212	12	12	224	0	180	2	1.00
28	116	0	116	87	29	3	90	26	-1	2	0.10
29	210	0	210	199	11	6	205	5	-1	2	0.55
30	587	0	587	557	30	41	587	0	5	2	1.37
31	276	0	276	234	42	26	260	16	-1	2	0.62
32	485	0	485	412	73	33	445	40	-1	2	0.45
33	34	0	34	27	7	7	34	0	5	2	1.00
34	548	0	548	411	137	27	438	110	-1	2	0.20
35	203	0	203	172	31	6	178	25	-1	2	0.19
36	179	0	179	134	45	3	137	42	-1	2	0.07
37	60	0	60	48	12	1	49	11	-1	2	0.08
38	127	0	127	95	32	11	106	21	-1	2	0.34
39	158	0	158	118	40	7	125	33	-1	2	0.18
41	290	0	290	261	29	25	286	4	-1	2	0.86
42	923	0	923	830	93	58	888	35	-1	2	0.62
43	259	0	259	194	65	8	202	57	-1	2	0.12
44	115	0	115	71	44	2	73	42	-1	2	0.05
45	254	0	254	241	13	9	250	4	-1	2	0.69
46	369	0	369	332	37	7	339	30	-1	2	0.19
48	111	0	111	73	38	14	87	24	-1	2	0.37
49	355	0	355	319	36	11	330	25	-1	2	0.31
50	762	0	762	624	138	45	669	93	-1	2	0.33
51	95	0	95	57	38	9	66	29	-1	2	0.24
52	98	0	98	84	14	5	89	9	-1	2	0.36
54	175	0	175	105	70	1	106	69	-1	2	0.01
55	174	0	174	113	61	3	116	58	-1	2	0.05
56	246	0	246	172	74	2	174	72	-1	2	0.03
57	922	0	922	783	139	89	872	50	-1	2	0.64
59	198	0	198	188	10	3	191	7	-1	2	0.30
60	458	0	458	334	124	22	356	102	-1	2	0.18
61	777	0	777	528	249	83	611	166	-1	2	0.33
62	379	0	379	234	145	28	262	117	-1	2	0.19
63	409	0	409	306	103	14	320	89	-1	2	0.14
64	150	0	150	127	23	10	137	13	-1	2	0.43



Finalmente, la Tabla 11.5., compara el desempeño de tres hospitales (No. 7, Espitau Val d'Aran - No. 9, Fundació Sant Hospital - No. 12, Hospital Universitario Arnau de Vilanova de Lleida), que por su ubicación y características, están especialmente solicitados en escenarios sísmicos como los simulados. Destacan las significativas variaciones del factor de respuesta del hospital 7 para cada uno de los escenarios estudiados, especialmente para los escenarios PA3 y PA2.

Tabla 11.5. Comparación del desempeño de los hospitales 7, 9 y 12

HOSP 7												
Tr	NCtot	NCper	NCefec	NCocup(i)	NCdis(i)	NH	NCocup(f)	NCdis(f)	Tsat	Ind.Uso	F.R.	
75	31	8	23	19	4	4	23	0	5	3	0.84	
500	31	31	0	0	0	129	0	0	0	4	28.14	
1000	31	31	0	0	0	219	0	0	0	4	46.74	

HOSP 9												
Tr	NCtot	NCper	NCefec	NCocup(i)	NCdis(i)	NH	NCocup(f)	NCdis(f)	Tsat	Ind.Uso	F.R.	
500	36	0	36	28	8	2	30	6	-1	2	0.25	
1000	36	9	27	27	0	11	27	0	0	3	2.25	

HOSP 12												
Tr	NCtot	NCper	NCefec	NCocup(i)	NCdis(i)	NH	NCocup(f)	NCdis(f)	Tsat	Ind.Uso	F.R.	
500	434	0	434	390	44	63	434	0	120	2	1.43	
1000	434	0	434	390	44	75	434	0	115	2	1.70	

### 11.3. ESTUDIOS DE PÉRDIDAS POTENCIALES

Con el fin de cartografiar los efectos sobre la población, los hospitales y el sistema sanitario de Cataluña, se evaluaron un conjunto de escenarios sísmicos asociados a determinados valores prefijados del período medio de retorno Tr. Las evaluaciones se han realizado sobre una matriz de puntos equidistantes, distanciados entre sí  $\Delta x = \Delta y = 10$  Km y comprendidos entre las coordenadas UTM; E+200, N+4450 y E+550, N+4850, para un total de 1476 puntos de evaluación correspondientes a cada escenario estudiado.

Cada punto de evaluación se corresponde con un epicentro, al cual ha sido asignado un sismo de intensidad  $I_0$ , en correspondencia con la zona sismogénica al cual pertenece y asociado a un período medio de retorno determinado Tr. En particular, se reportan los resultados obtenidos para períodos medios de retorno de 1000, 500 y 75 años, correspondientes a sismos con probabilidad de excedencia aproximadamente del 5%, 10% y 50% en 50 años, respectivamente.

De manera operativa, el procedimiento consiste en estudiar para cada período medio de retorno considerado, un total de 1476 escenarios sísmicos. Cada escenario se corresponde con un epicentro cuyas coordenadas coinciden con un punto de evaluación de la matriz seleccionada y donde la intensidad epicentral se define de conformidad con los parámetros sismogénicos de la zona fuente que le contiene. Para cada escenario se determina la distribución de intensidades por municipio considerando los efectos de suelo, los daños potenciales sobre la población (daños en vivienda, número de heridos, etc.), los daños directos sobre los hospitales (número de camas perdidas, etc.). Se simula el proceso de atención sanitaria del escenario de daño para determinar el tiempo máximo de atención y los factores de respuesta del sistema y de respuesta normalizado.

Para fines representativos, se asigna a cada epicentro los valores totales de las consecuencias del escenario evaluado, en términos de número de heridos graves, número de camas perdidas, tiempo de atención de la emergencia, factor de respuesta del sistema y factor de respuesta normalizado.

Así por ejemplo, para un sismo con epicentro en el Pirineo Aragonés (PA3) con intensidad entre VIII-IX, asociado a un período medio de 1000 años, se obtiene (ver Tabla 11.3.) un total de 916 heridos graves en toda Cataluña, un total de 40 camas perdidas entre los hospitales afectados, se estima 195 minutos para atender la emergencia sanitaria para un valor del factor de respuesta del sistema igual a 13587 y un factor de respuesta normalizado de 14.83. Cada uno de estos valores se asigna al punto que designa las coordenadas del epicentro. Estos resultados, han sido interpolados para proporcionar representaciones continuas de los efectos asociados a los sismos evaluados. En todos los gráficos se ha mantenido las misma escala gráfica, a los fines de facilitar la comparación entre los diferentes escenarios estudiados.

Las Figuras 11.2.a., 11.2.b. y 11.2.c., representan en cada epicentro, el número total de heridos graves NHG esperados en Cataluña, para sismos con períodos medios de retorno de  $Tr = 1000, 500$  y  $75$  años respectivamente. Las Figuras 11.3.(a..d), 11.4.(a..d) y 11.5.(a..d), representan en cada epicentro, el número de camas perdidas NCP, el tiempo de atención de la emergencia  $T_{max}$  en minutos, el factor de respuesta del sistema FR y el factor de respuesta normalizado FRN, para sismos con períodos medios de retorno de  $Tr = 1000, 500$  y  $75$  años, respectivamente.

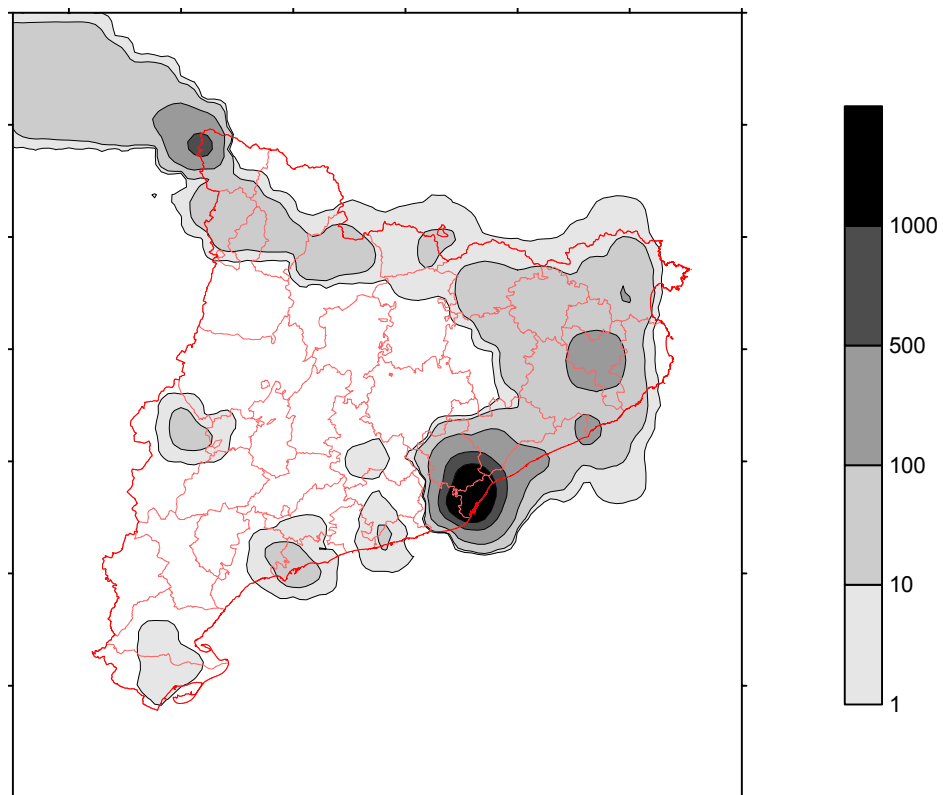


Fig. 11.2.a. Número de heridos graves NHG –  $Tr = 1000$  años

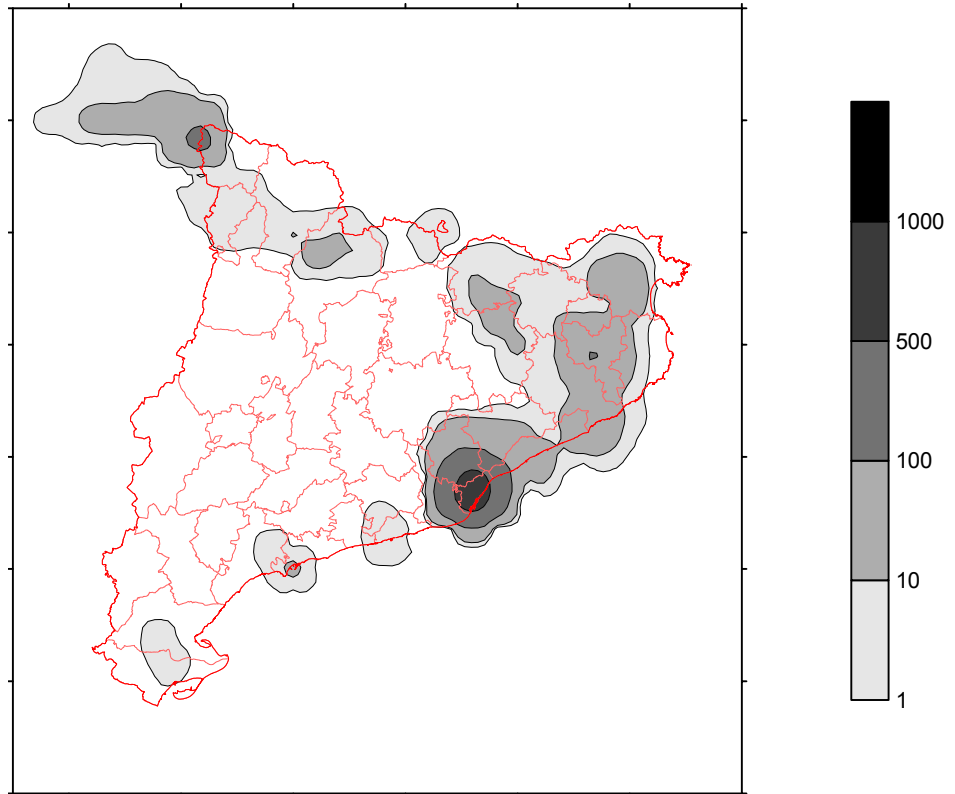


Fig. 11.2.b. Número de heridos graves NHG – Tr = 500 años

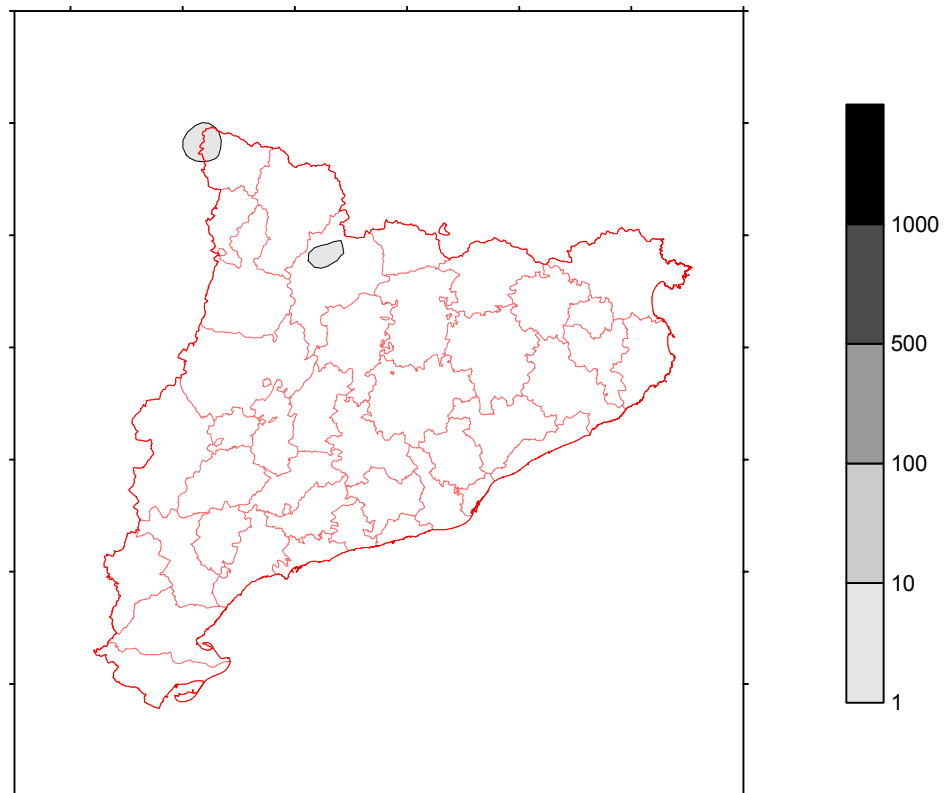


Fig. 11.2.c. Número de heridos graves NHG – Tr = 75 años

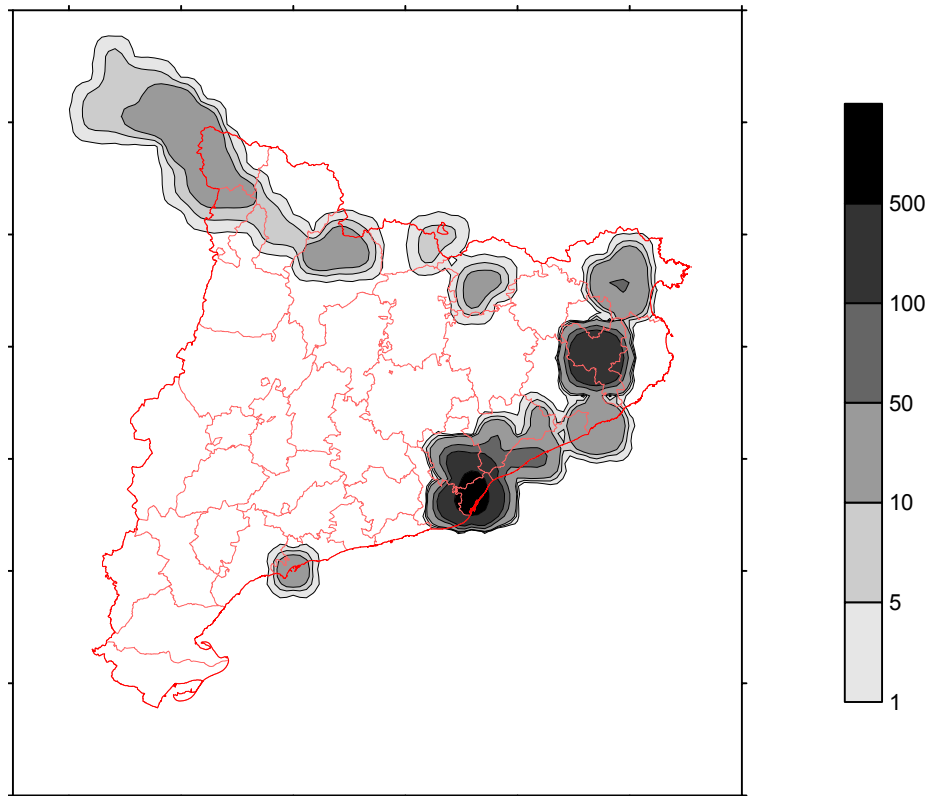


Fig. 11.3.a. Número de camas perdidas NCP –  $Tr = 1000$  años

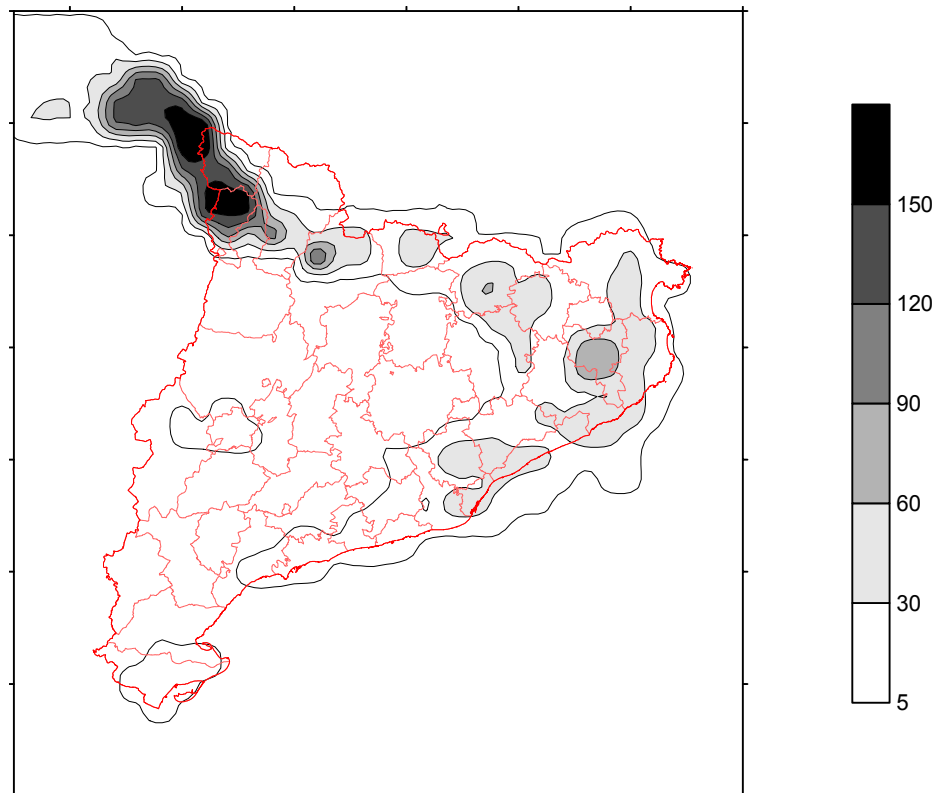


Fig. 11.3.b. Tiempo atención de la emergencia  $T_{max} - Tr = 1000$  años

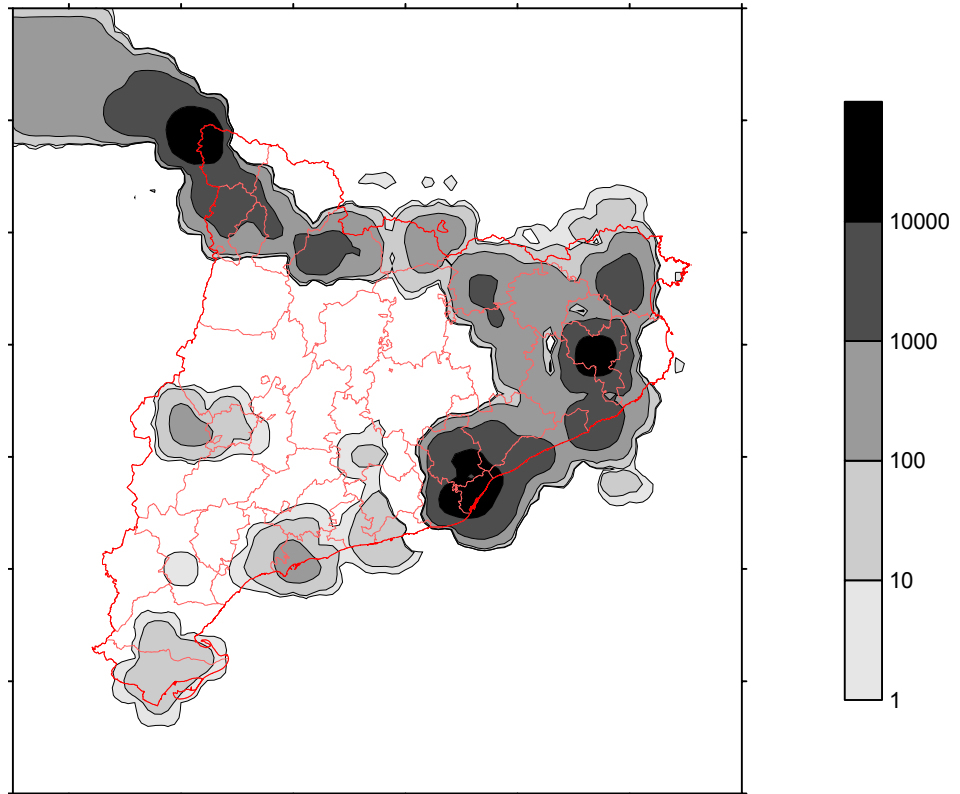


Fig. 11.3.c. Factor de respuesta del sistema FR – Tr = 1000 años

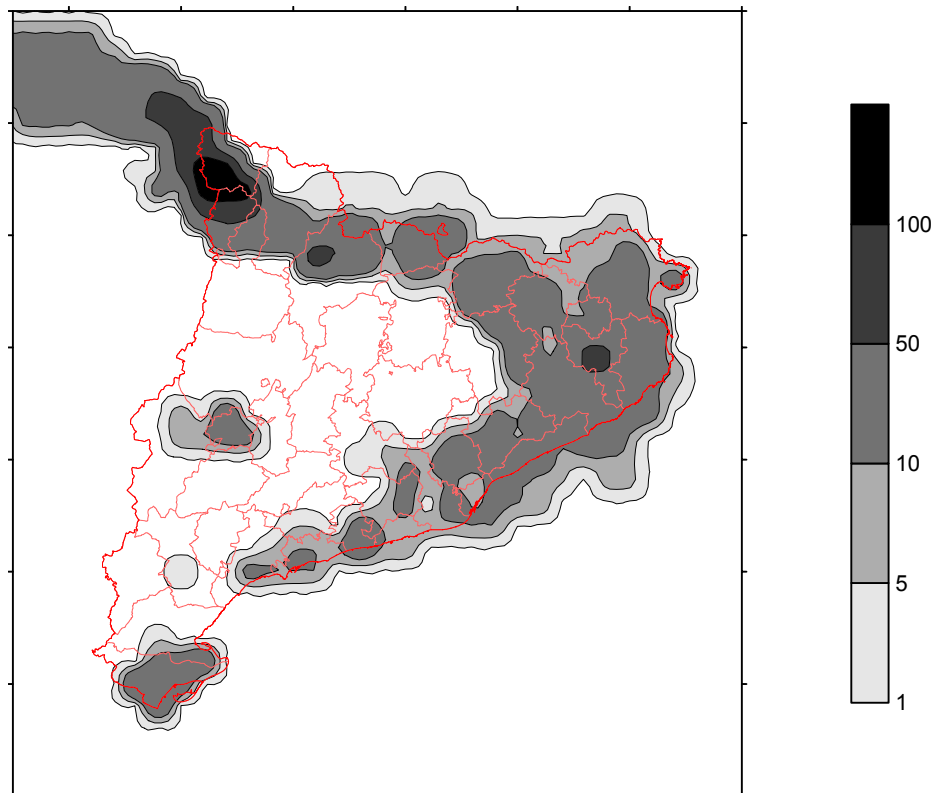


Fig. 11.3.d. Factor de respuesta normalizado FRN – Tr = 1000 años

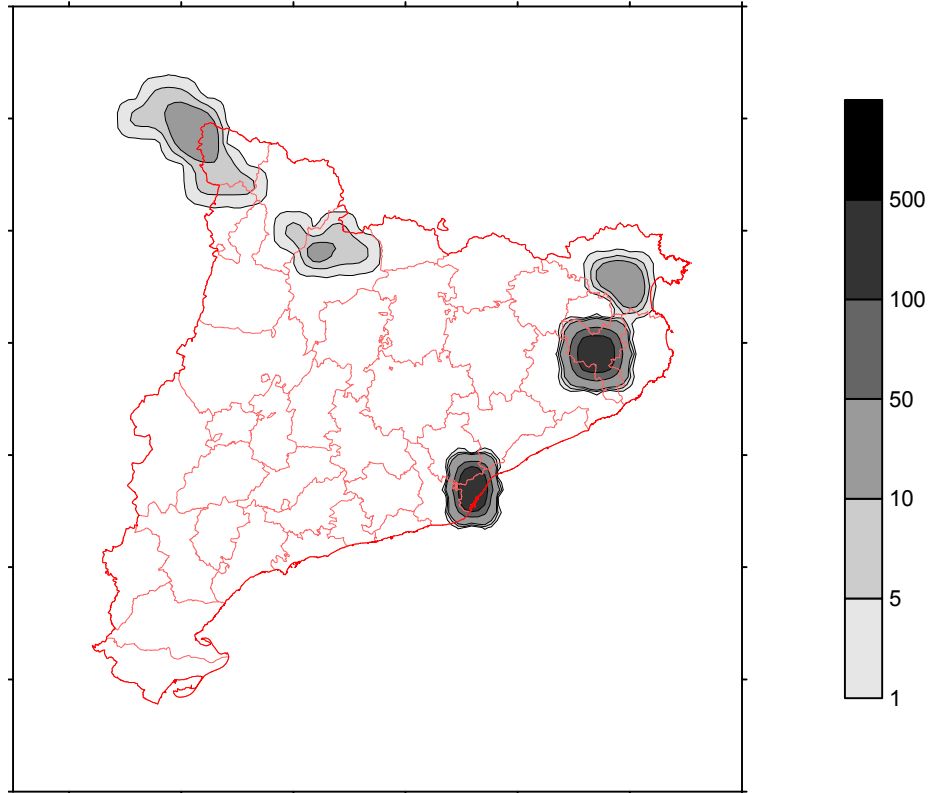


Fig. 11.4.a. Número de camas perdidas NCP –  $Tr = 500$  años

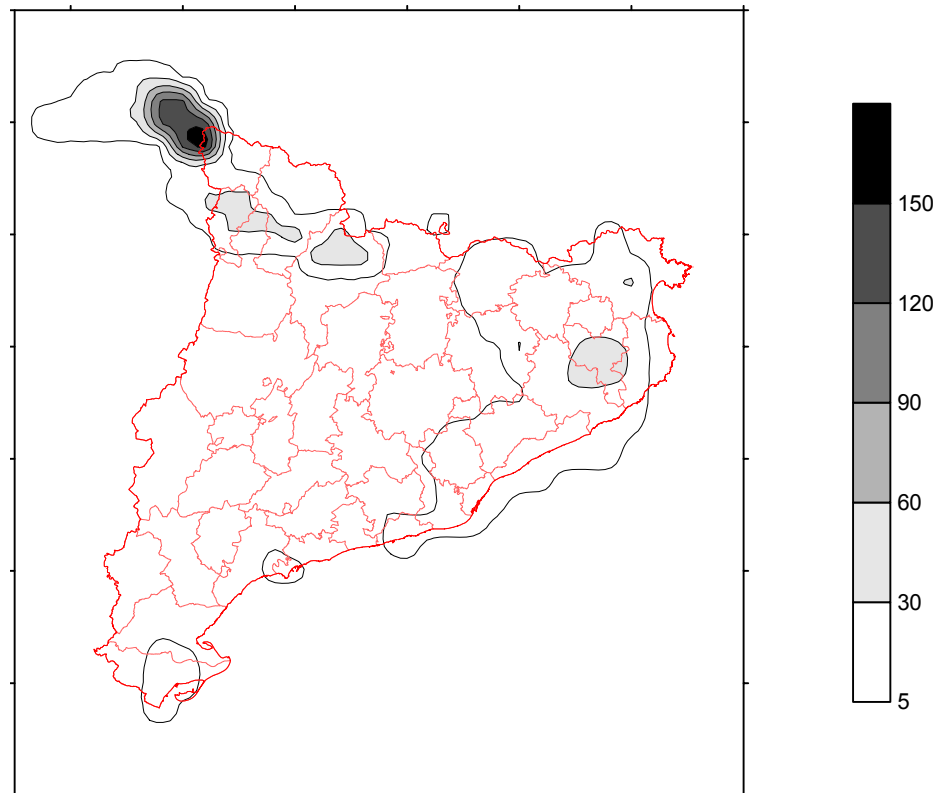


Fig. 11.4.b. Tiempo atención de la emergencia Tmax –  $Tr = 500$  años

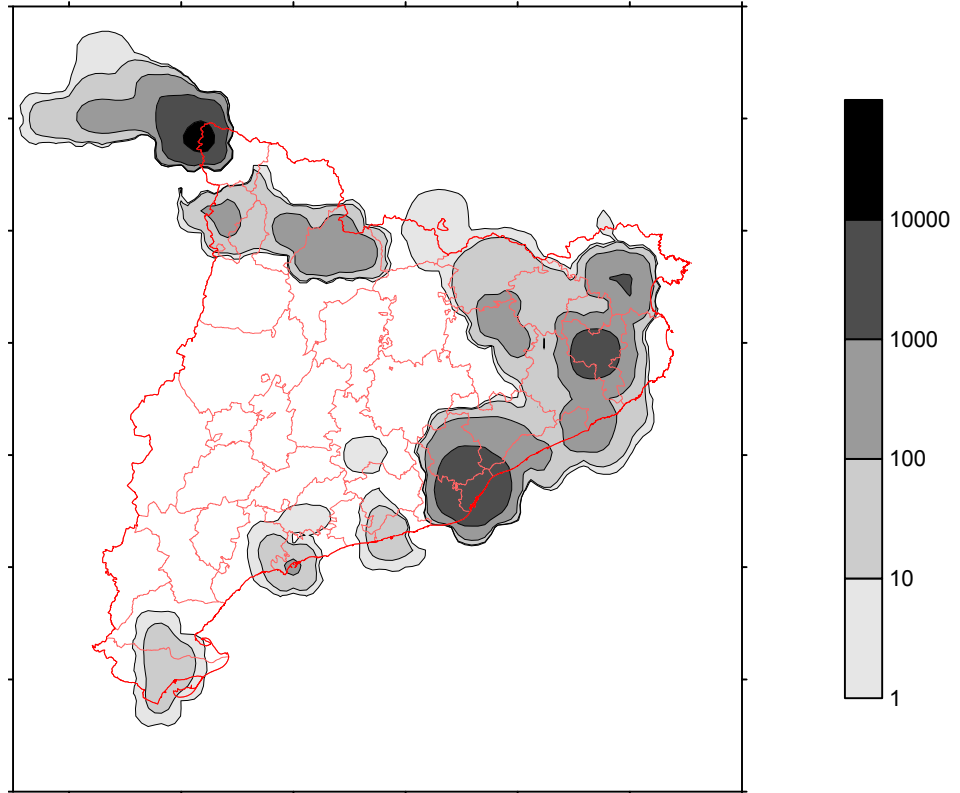


Fig. 11.4.c. Factor de respuesta del sistema FR – Tr = 500 años

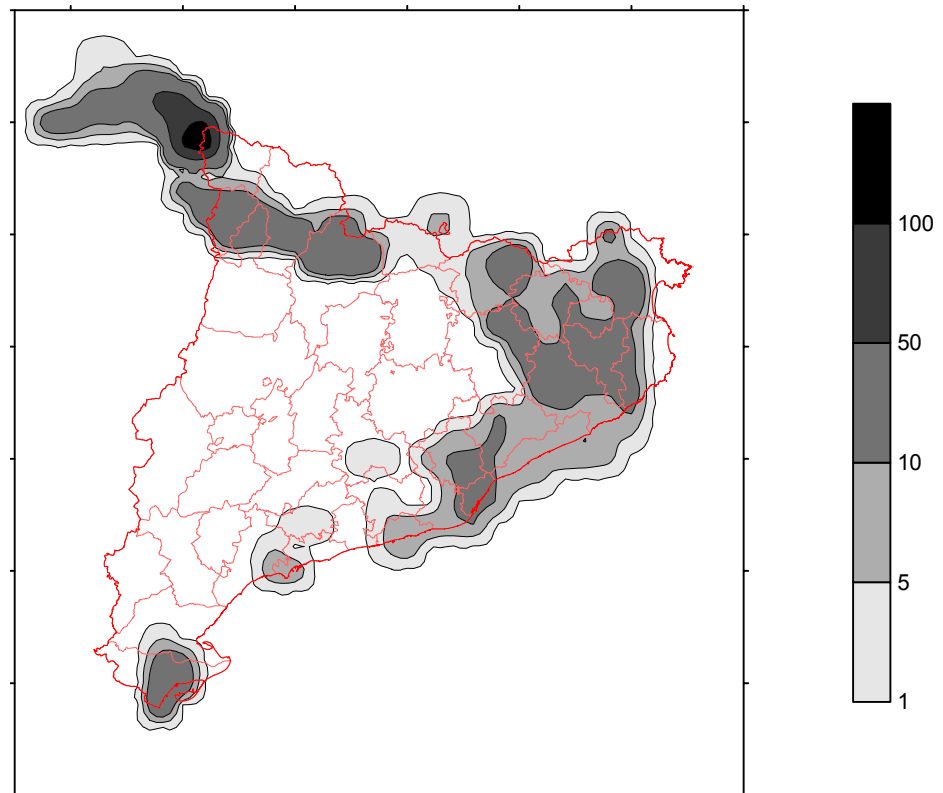


Fig. 11.4.d. Factor de respuesta normalizado FRN – Tr = 500 años

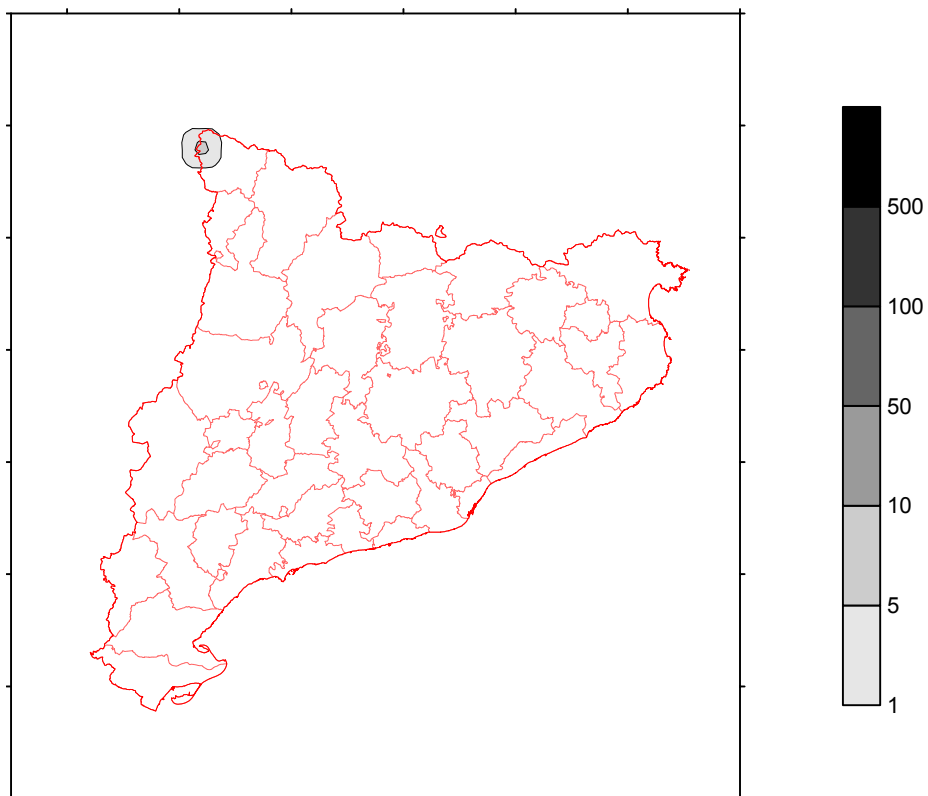


Fig. 11.5.a. Número de camas perdidas NCP –  $Tr = 75$  años

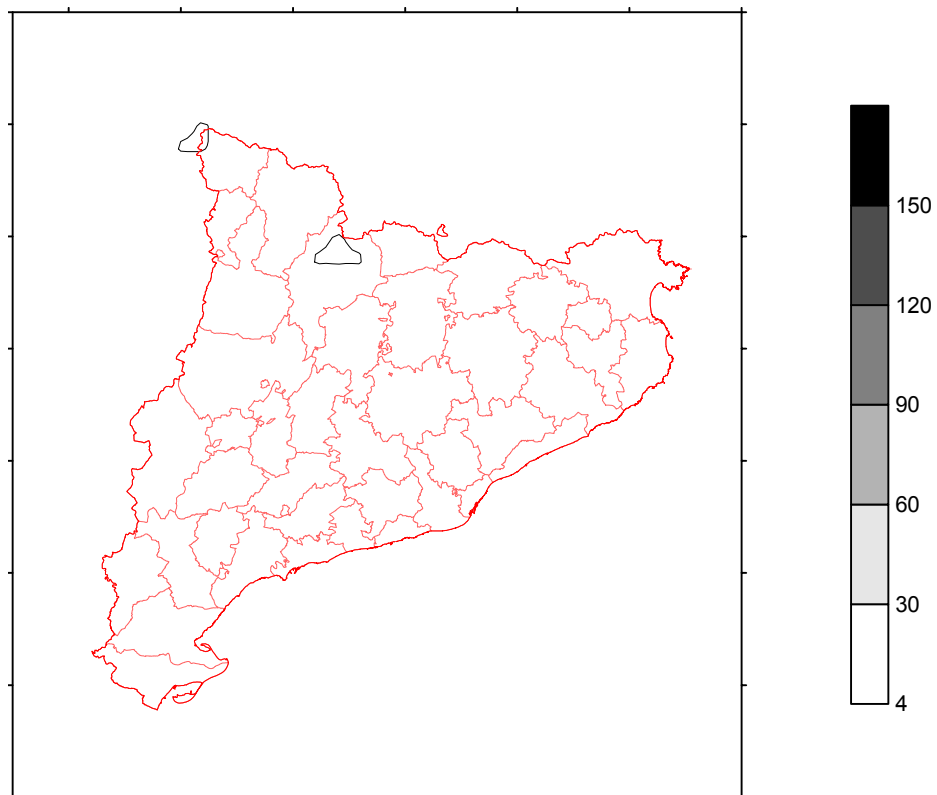


Fig. 11.5.b. Tiempo atención de la emergencia  $T_{max} - Tr = 75$  años



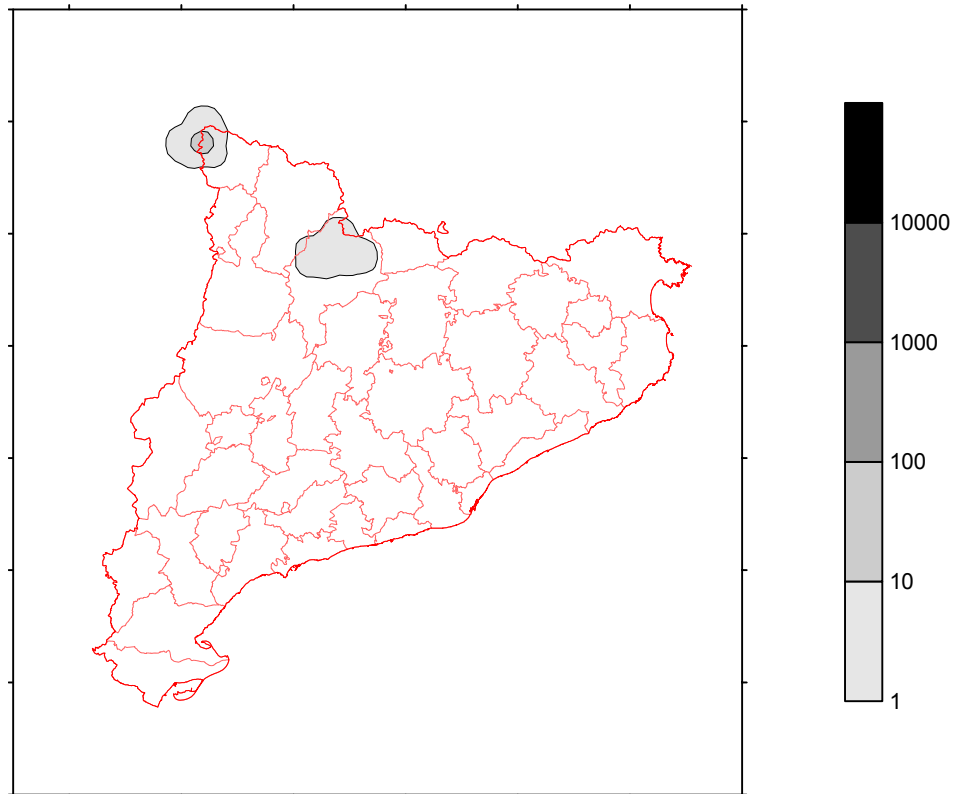


Fig. 11.5.c. Factor de respuesta del sistema FR – Tr = 75 años

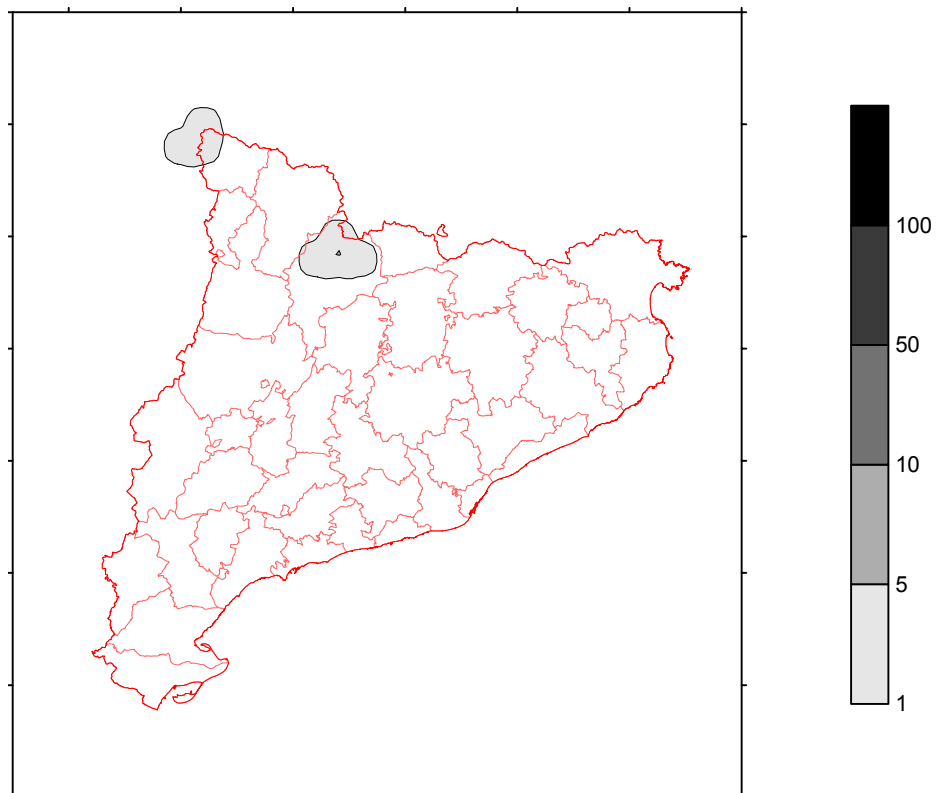


Fig. 11.5.d. Factor de respuesta normalizado FRN – Tr = 75 años

## 11.4. ANÁLISIS DE RIESGO

El análisis de riesgo se realizó sobre una matriz de puntos extendida, que cubre la totalidad de fuentes con influencia en Cataluña (Fig.9.15), distanciados entre sí a cada 5 Km. y comprendidos entre las coordenadas UTM (Km.) E+42.5, N+4160.0 y E+622.5, N+4890.0, para un total de 17199 puntos de evaluación.

El algoritmo consiste en identificar, para cada punto de evaluación, la zona sismogénica correspondiente y evaluar para dicho epicentro, una sucesión de escenarios sísmicos, con intensidades comprendidas entre  $i_{min}$  e  $i_{max}$  característica de la zona sismogénica (Tabla 9.6), con incrementos de medio grado ( $\Delta i = 0.5$ ). Un total de 60940 escenarios sísmicos han sido considerados y para cada uno de ellos, se acumula la frecuencia media anual de sismos capaces de inducir un nivel de efectos o consecuencias sobre la comunidad y los diferentes elementos expuestos (edificaciones, víctimas, hospitales, etc.) con fines de estimar los niveles probables de pérdidas debidos a todos los sismos, en un período de tiempo determinado.

La sismicidad se cuantifica en términos probabilísticos y se supone uniformemente distribuida sobre cada zona sismogénica, de manera que, si cada punto de evaluación se corresponde con un epicentro perteneciente a la zona “j” de área  $S_j$  y es representativo de un sector de área  $S_{jk} = 25 \text{ Km}^2$ , la frecuencia media anual de sismos del sector “jk” con intensidad igual o superior que “i”, puede ser expresada de acuerdo con la expresión 8.1., de manera proporcional como:

$$\lambda_{jk}(i) = \frac{S_{jk}}{S_j} \alpha_j F_j(i) \quad (11.1)$$

donde

- $S_{jk}$  Area del sector jk, de la fuente j.
- $S_j$  Area de la fuente j.
- $\alpha_j$  Frecuencia media anual de sismos con intensidad igual o superior que  $i_{min}$ , de la fuente j.
- $F_j(i)$  Probabilidad de obtener una intensidad igual o superior que i, de la fuente j.
- $\lambda_{jk}(i)$  Frecuencia media anual de sismos del sector “jk” con intensidad igual o superior que i.

Entonces,

$$n_{jk}(I) = \lambda_{jk}(i) - \lambda_{jk}(i + \Delta i) = \frac{S_{jk}}{S_j} \alpha_j [F_j(i) - F_j(i + \Delta i)] \quad (11.2)$$

$n_{jk}(I)$  Frecuencia media anual de sismos del sector “jk” con intensidad  $I = i$

Cada escenario sísmico, caracterizado por una intensidad I y las coordenadas de un epicentro o punto de evaluación, tiene asociada una frecuencia media anual de sismos  $n_{jk}(I)$ . Si los efectos o consecuencias sobre los diferentes elementos expuestos, dependen de manera determinista de los niveles del movimiento sísmico esperados en su emplazamiento, entonces, dichos efectos estarán asociados a la misma frecuencia media anual  $n_{jk}(I)$  del sismo. En otras palabras, si la relación entre causa-efecto, representada por la relación entre la intensidad sísmica y los daños en los elementos expuestos es determinista (vulnerabilidad determinista), entonces la probabilidad de alcanzar determinados efectos en los elementos expuestos será igual a la probabilidad de que ocurra el evento sísmico.

Para cada elemento expuesto, es posible *acumular* en diferentes rangos de efectos o consecuencias, la frecuencia media anual de sismos capaces de inducirlos. Al acumular la frecuencia media anual de sismos que producen un determinado nivel de pérdida en el elemento expuesto, luego de considerar todos los posibles sismos, sobre las  $j$  fuentes,  $k$  sectores e  $I$  intensidades, se obtiene la frecuencia media anual de sismos potencialmente capaces de producir un nivel de pérdida esperada  $N$ , en el elemento expuesto según;

$$N = \sum_j \sum_k \sum_I n_{jk}(I) \quad (11.3)$$

Los niveles probables de pérdidas esperadas en los elementos expuestos, debidos a todos los tamaños de sismos en un año, se expresa como la probabilidad media anual  $P^1$  de alcanzar dichos niveles de pérdida, que de acuerdo con la expresión 8.3., se determina como;

$$P^1 = 1 - e^{-N} \quad (11.4)$$

### 11.4.1. Criterio de jerarquización

Utilizando como base los resultados obtenidos en el análisis de riesgo sobre el desempeño sísmico de los hospitales que conforman el sistema sanitario de Cataluña, el criterio de jerarquización adoptado, se fundamenta en la probabilidad media anual de excedencia del factor de respuesta del hospital - *FRH*.

Para una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, correspondiente a un período medio de retorno  $Tr = 475$  años y una probabilidad anual de excedencia  $P^1 = 0.0021$ , se definen tres rangos del factor de respuesta de los hospitales, según el cual, se clasifica la respuesta sísmica del hospital como, *aceptable*, *intermedia* o *crítica*, tal y como lo indica la Tabla 11.6. La definición de estos límites se fundamenta en la interpretación realizada en el apartado 8.4.2. del capítulo 8 y se relaciona con la clasificación del desempeño sísmico de los hospitales establecida en el apartado 7.6.3. del capítulo 7.

Tabla 11.6. Criterio de jerarquización de la respuesta sísmica de los hospitales

<i>Clasificación de la respuesta sísmica</i>	<i>Factor de respuesta del hospital – FRH</i>	<i>Clasificación del desempeño sísmico<sup>1</sup></i>
Aceptable	Menor que 10	Suficiente
Intermedia	Entre 10 y 100	Insuficiente
Crítica	mayor que 100	

<sup>1</sup> De acuerdo a lo establecido en el apartado 7.6.3., del capítulo 7.

La Tabla 11.7., resume la clasificación de los hospitales que conforman la XHUP de acuerdo con el criterio adoptado. Para facilidad interpretativa, las Figuras 11.6.(a,b,c) muestran la distribución de la probabilidad media anual de excedencia del factor de respuesta de cada hospital – *FRH*, diferenciados de acuerdo al criterio de jerarquización adoptado, en respuesta aceptable, intermedia o crítica.

Finalmente, las Figuras 11.7.(a,b)., 11.8.(a,b). y 11.9.(a,b) discriminan en función del criterio de jerarquización adoptado, los niveles probables de demanda de servicio (NH/NCD) y de camas perdidas (NCP/NCT) de cada hospital en diferentes rangos de interés práctico, computados paralelamente en el análisis de riesgo.

La discriminación de los niveles probables de demanda de servicio y de camas perdidas de cada hospital (Figuras 11.7., 11.8. y 11.9.) obedece al hecho que, de acuerdo con la expresión 8.9 del capítulo 8, que define el factor de respuesta del hospital – *FRH*, estos términos independientes entre sí, son los que principalmente contribuyen en la calificación de la respuesta de un hospital.

La relación entre el número total de heridos graves desplazados al centro hospitalario y el número de camas disponibles iniciales - NH/NCD caracteriza el nivel de participación del hospital en la atención de una emergencia sísmica. Un valor menor que la unidad, indica que el hospital no alcanza a saturarse, manteniendo unidades de cuidado o camas disponibles hasta el final de la atención de la emergencia sísmica. Por el contrario, valores mayores que la unidad, implican que el hospital se satura, limitando la posibilidad de ofrecer atención médica al excedente de paciente que recibe y que por tanto, debe remitir o trasladar a algún otro centro de referencia, con disponibilidad de camas para su atención.

Así por ejemplo, de la Fig. 11.7.a. (respuesta aceptable) se observa como el hospital No. 24 (Hospital comarcal de l'Alt Penedès), tiene una probabilidad anual de no saturarse de 0.09 y una probabilidad anual de saturarse de 0.01, mientras que de la Fig. 11.9.a. (respuesta crítica), se observa como el hospital No. 50 (Hospital General Vall d'Hebron), tiene una probabilidad anual de no saturarse igual que la probabilidad anual de saturarse, del orden de 0.12.

Por su parte, la relación entre el número de camas perdidas y el número de camas totales del centro hospitalario - NCP/NCT, representa una medida de los daños directos que potencialmente puede sufrir cada hospital. Aunque esta relación interviene en la definición del factor de respuesta del hospital, afectada por un factor de importancia *FI*, que reconoce la importancia relativa de la cama, en términos del valor de reposición de la misma y su importancia social, su caracterización es representativa del nivel de riesgo intrínseco del hospital. En particular, se han considerado cuatro rangos para este factor, que se han representado como un gráfico de columnas apiladas, que permiten comparar entre categorías, el aporte de cada valor al total.

Así por ejemplo, de la Fig. 11.7.b. (respuesta aceptable) se observa como el hospital No. 24 (Hospital comarcal de l'Alt Penedès), tiene una probabilidad anual de perder al menos una cama de 0.005, una probabilidad anual de perder más del 33% de sus camas de 0.001 y una probabilidad despreciable de perder más del 66% de sus unidades o alcanzar el colapso total. Por su parte, de la Fig. 11.9.b. (respuesta crítica), se observa como el hospital No. 50 (Hospital General Vall d'Hebron), tiene una probabilidad anual de perder al menos una cama de 0.02, una probabilidad anual de perder más del 33% de sus camas de 0.01, una probabilidad anual de perder más del 66% de sus camas de 0.004 y una probabilidad anual de alcanzar el colapso total, quedando imposibilitado de prestar servicio incluso a sus pacientes ordinarios de 0.001.

Un análisis similar puede ser realizado sobre el resto de hospitales que conforman la XHUP, para concluir en cada caso, si la calificación del desempeño sísmico del hospital obedece fundamentalmente a una deficiente participación en la atención de la emergencia debido a su limitada capacidad disponible, a los importantes niveles de daños directos debido a su propia vulnerabilidad sísmica, o la composición de ambas consideraciones. Esta evaluación puede servir de base para definir estrategias apropiadas de intervención, orientadas a reducir o mitigar el nivel de riesgo sísmico de los hospitales considerados.

Tabla 11.7. Clasificación de la respuesta sísmica de los hospitales pertenecientes XHUP

Clasificación de la respuesta sísmica	No. Identificador del Hospital	Cantidad (Porcentaje)
Aceptable	1 – 2 – 4 – 5 – 6 8 – 24 – 25 – 36 40 – 41 – 48 – 53 – 58	14 (21.88%)
Intermedia	3 – 7 – 9 – 10 – 11 12 – 13 – 14 – 16 17 – 18 – 23 – 26 27 – 28 – 31 – 33 34 – 35 – 37 – 38 39 – 43 – 44 – 46 49 – 54 – 55 – 56 59 – 60 – 61 – 62 63 – 64	35 (54.69%)
Crítica	15 – 19 – 20 – 21 22 – 29 – 30 – 32 42 – 45 – 47 – 50 51 – 52 – 57	15 (23.44%)

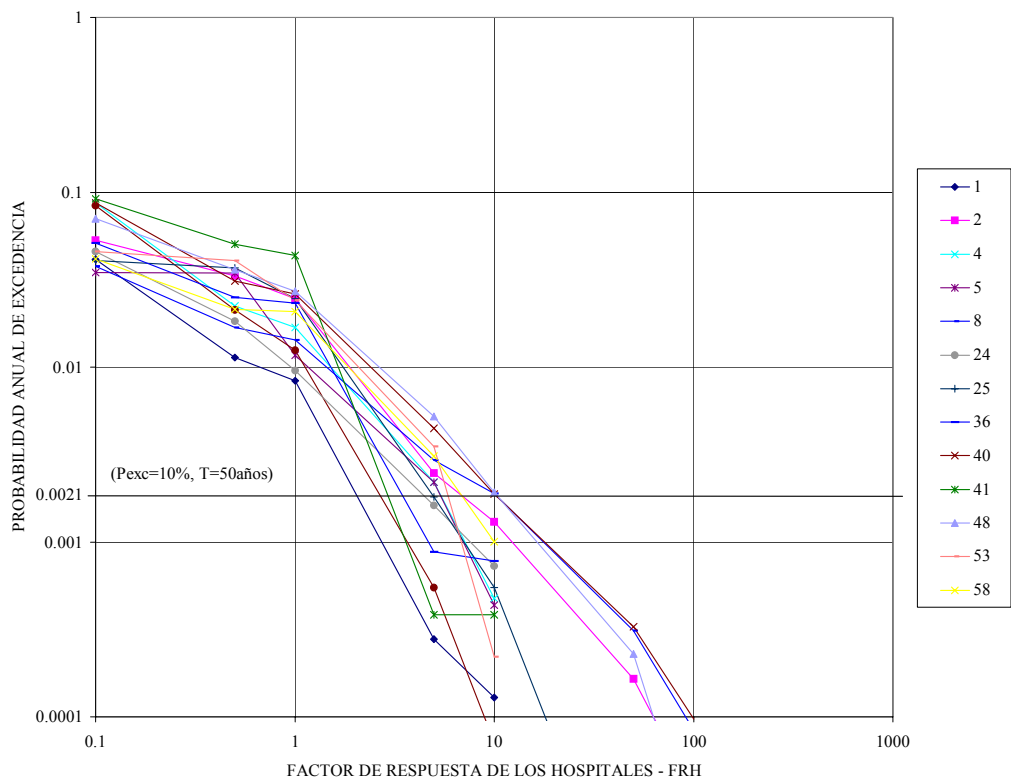


Fig. 11.6.a. Probabilidad media anual de excedencia del factor de respuesta de cada centro hospitalario – *FRH* (Respuesta aceptable)

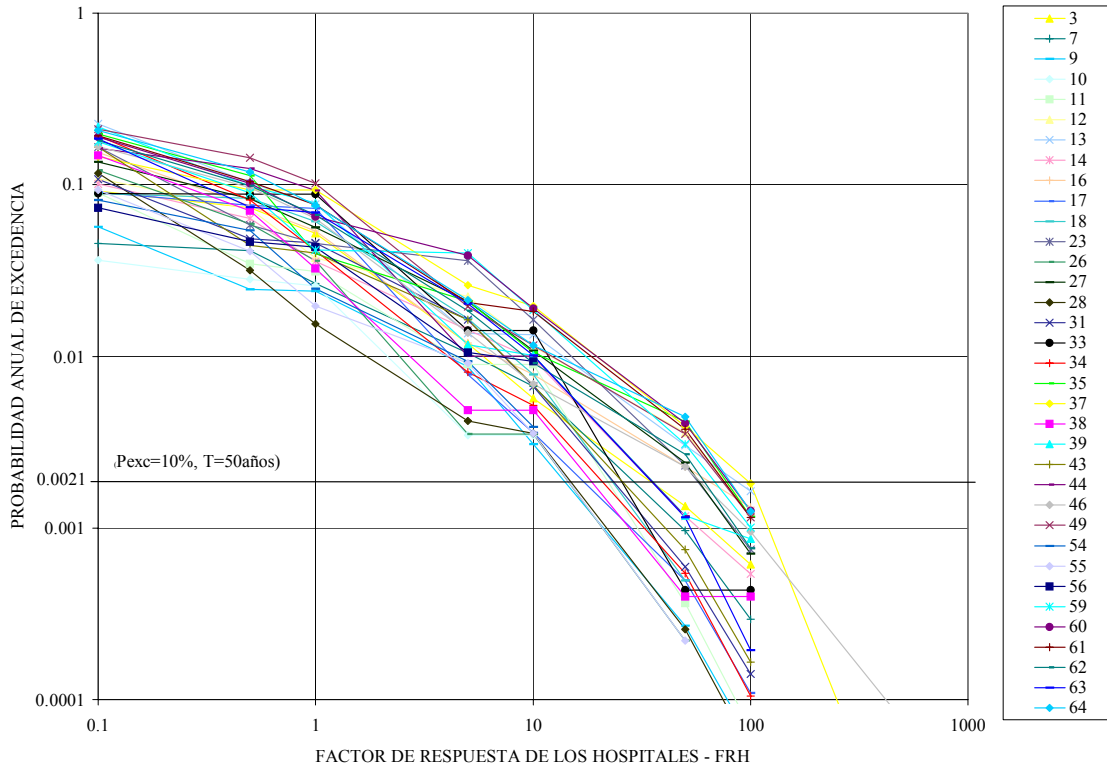


Fig. 11.6.b. Probabilidad media anual de excedencia del factor de respuesta de cada centro hospitalario – *FRH* (Respuesta intermedia)

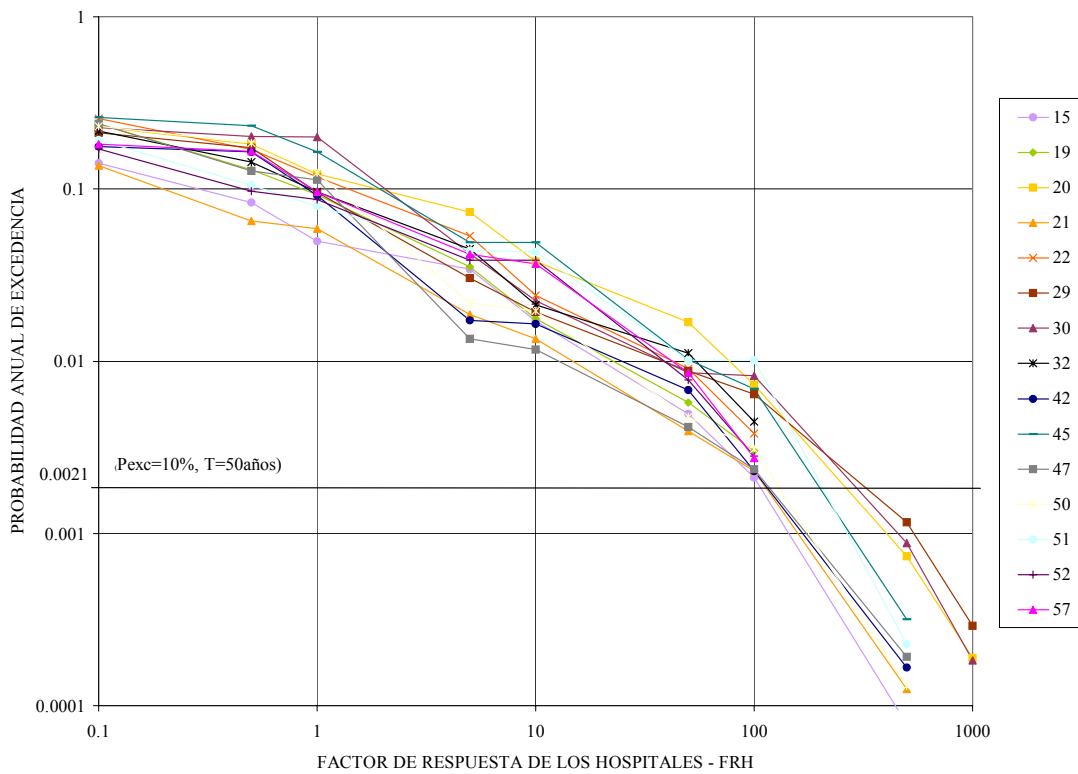


Fig. 11.6.c. Probabilidad media anual de excedencia del factor de respuesta de cada centro hospitalario – *FRH* (Respuesta crítica)

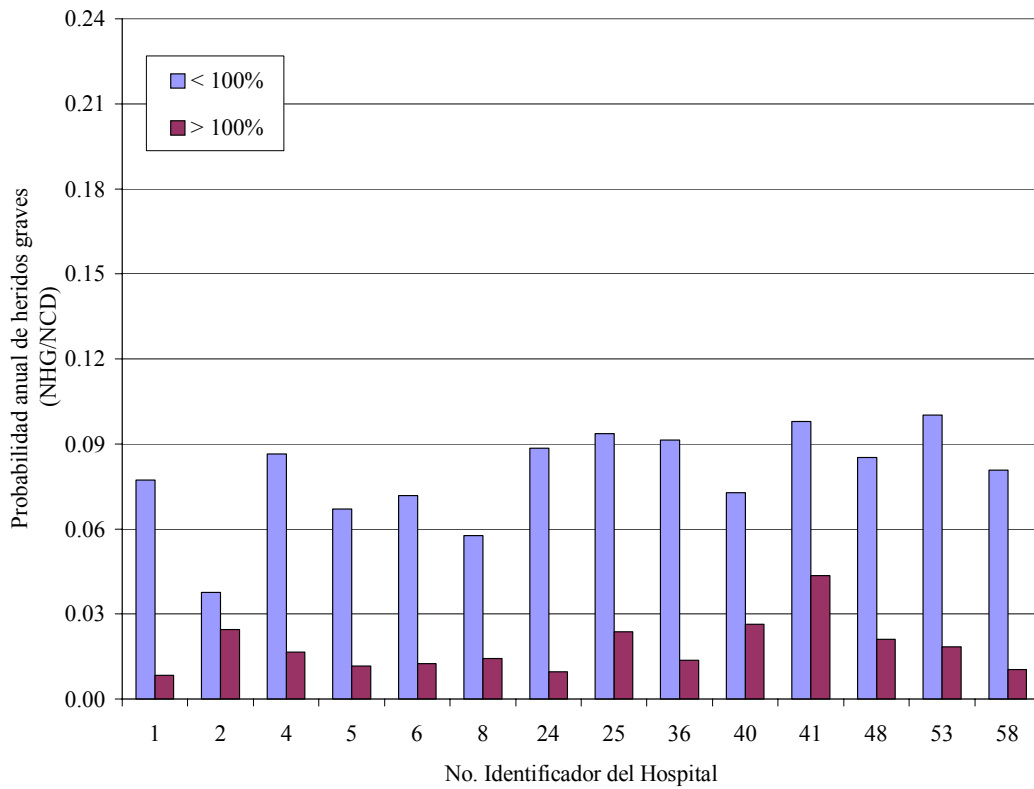


Fig. 11.7.a. Niveles probables de demanda de servicio (Respuesta aceptable)

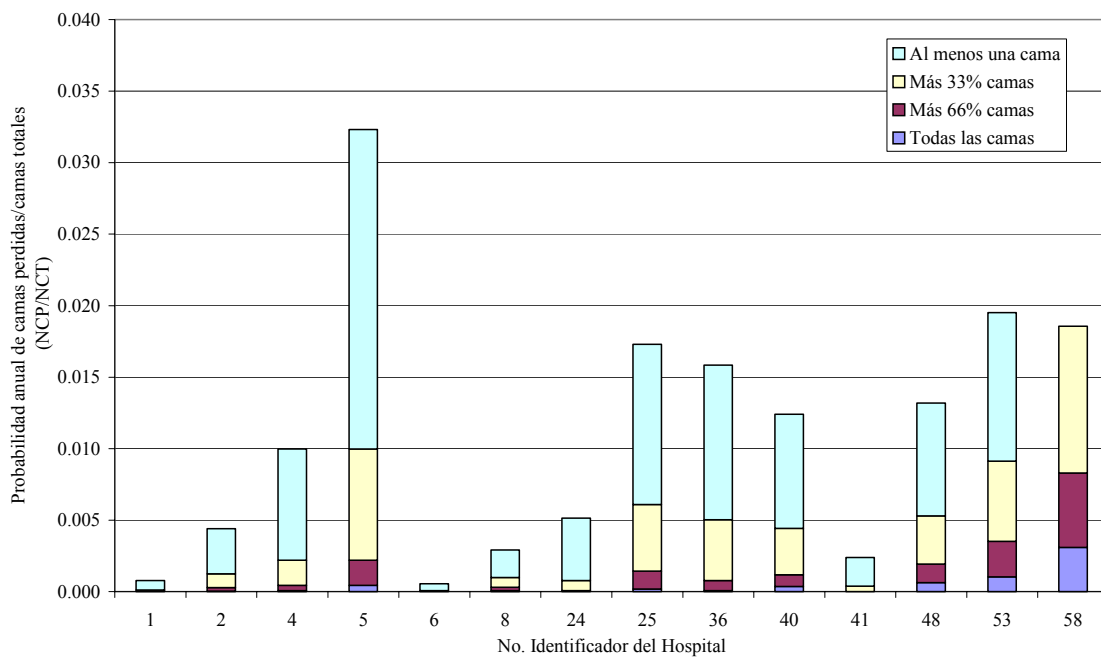


Fig. 11.7.b. Niveles probables de pérdidas de camas (Respuesta aceptable)

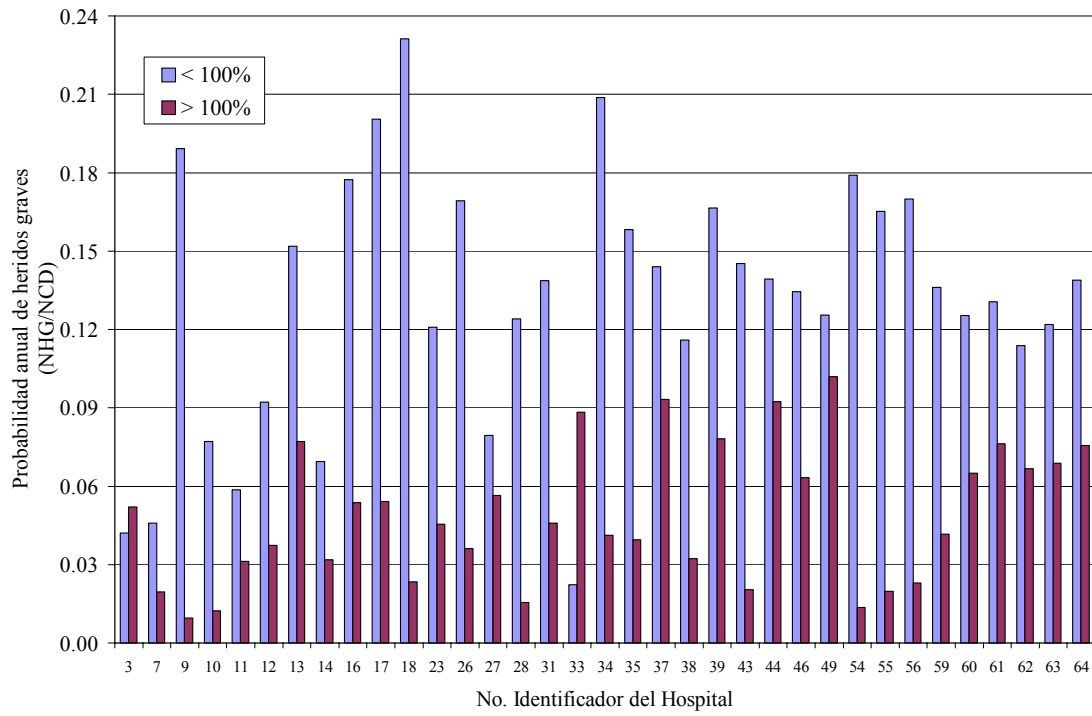


Fig. 11.8.a. Niveles probables de demanda de servicio (Respuesta intermedia)

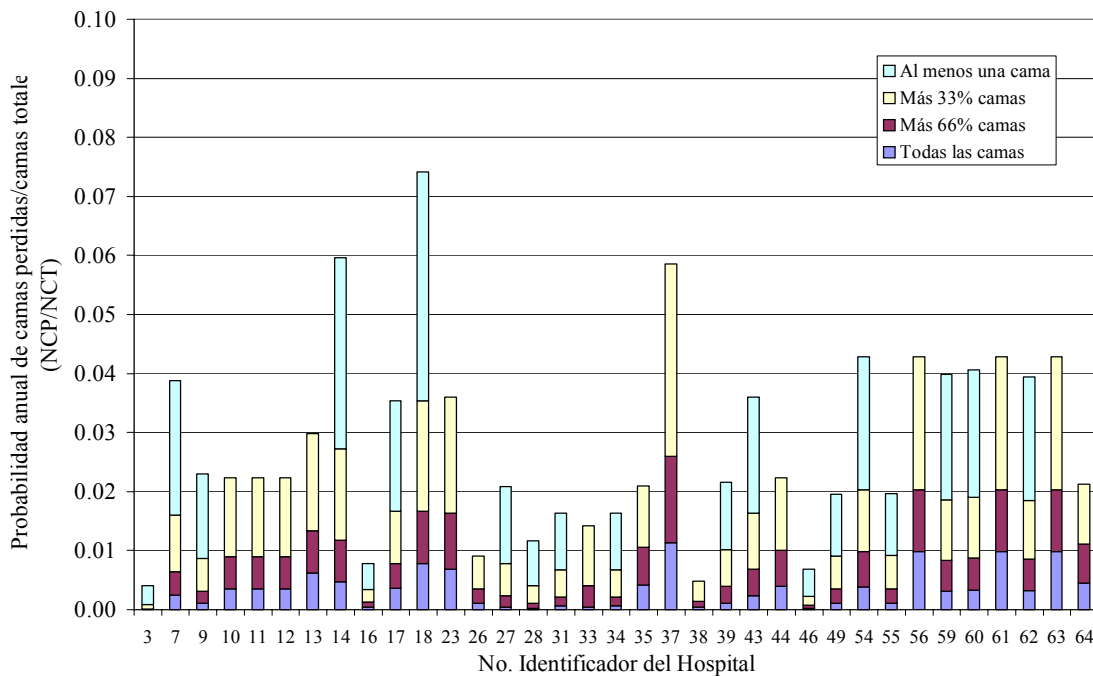


Fig. 11.8.b. Niveles probables de pérdidas de camas (Respuesta intermedia)



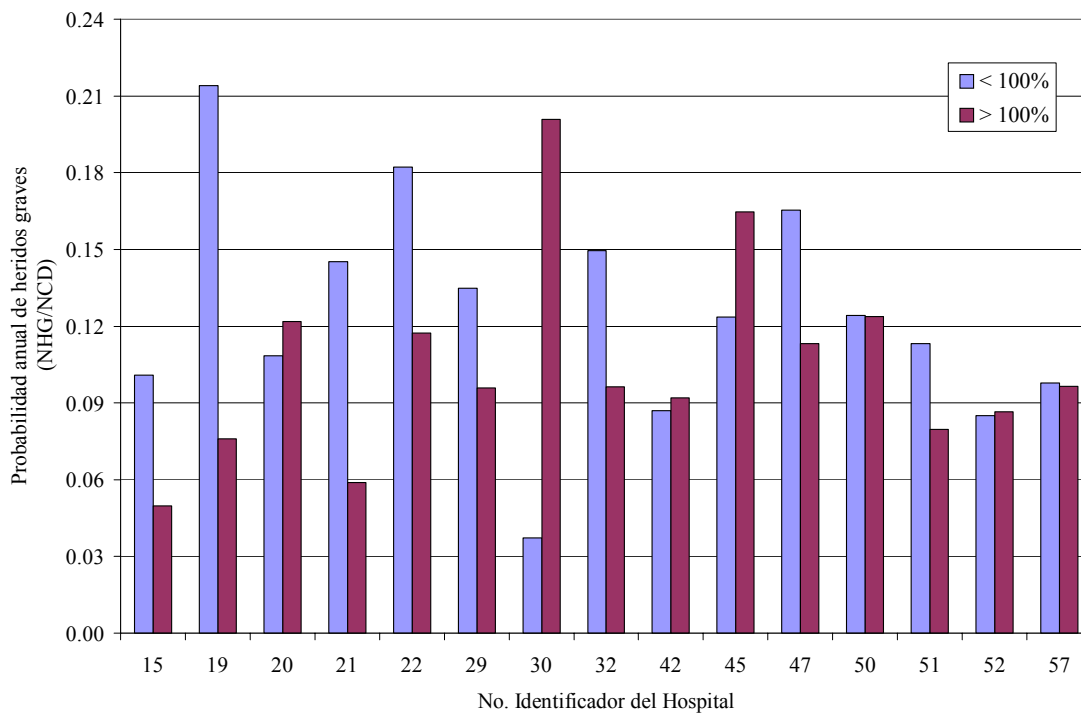


Fig. 11.9.a. Niveles probables de demanda de servicio (Respuesta crítica)

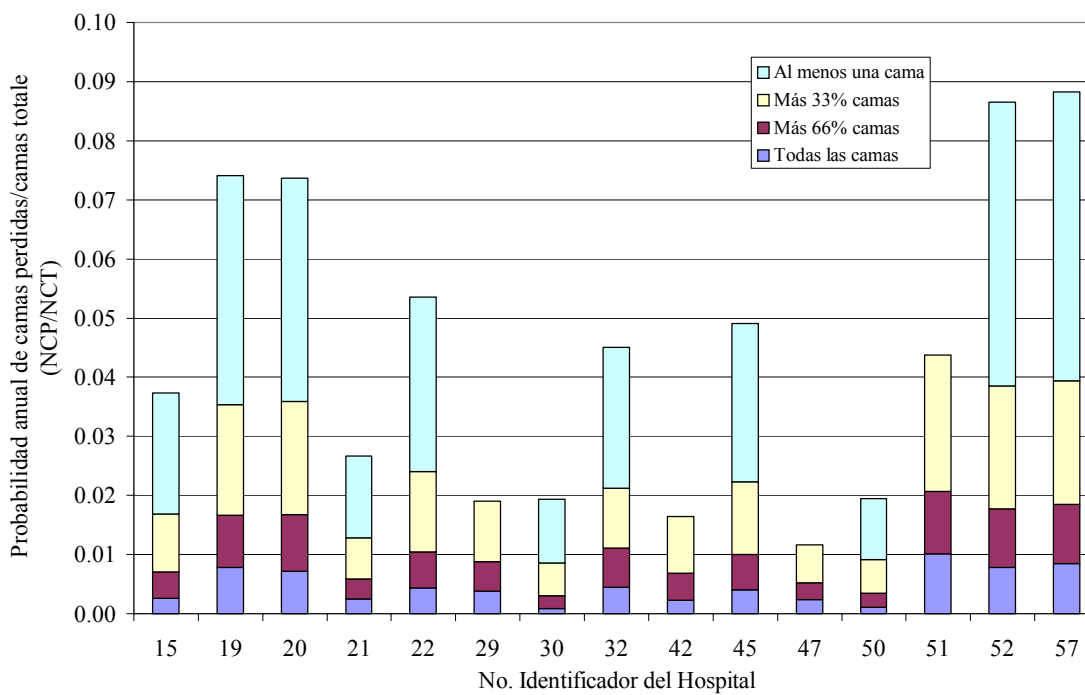


Fig. 11.9.b. Niveles probables de pérdidas de camas (Respuesta crítica)

## 11.5. RESULTADOS

La calificación del desempeño sísmico del sistema sanitario de Cataluña y de cada uno de los hospitales integrantes de la XHUP, debe fundamentarse en los resultados obtenidos en el estudio de escenarios, de pérdidas potenciales y los análisis de riesgo.

### 11.5.1. Desempeño del sistema

Conforme a la sismicidad propia de la región y los patrones de distribución de población y edificaciones sobre la misma, los resultados del estudio de pérdidas potenciales revela, que la ocurrencia de un evento sísmico poco frecuente, asociado a un periodo medio de retorno entre 1000 y 500 años, principalmente en la ciudad de Barcelona y sus alrededores (áreas metropolitana y de influencia), o en las zonas noroeste y norte de la región de Cataluña, redundarían en un significativo número de heridos graves, contados entre decenas y millares. La importante concentración de población en la ciudad de Barcelona, sus alrededores y las zonas costeras aledañas, unido a los significativos niveles de vulnerabilidad de sus edificaciones, convertirían un sismo poco frecuente en una verdadera catástrofe, difícil de manejar con la infraestructura sanitaria existente. Por otra parte, los niveles de sismicidad propios de las zonas norte y noroeste de la región, especialmente hacia la región del Pirineo Aragonés, conducirían a escenarios críticos de especial interés, a ser considerados al momento de calificar el desempeño sísmico del sistema.

A los fines de lograr una completa interpretación de los resultados obtenidos en los estudios de pérdidas potenciales y escenarios singulares, es conveniente dirigir la atención sobre tres regiones específicas de Cataluña; la primera, la región noroeste y específicamente la parte norte de la región sanitaria de Lleida que comprende los sectores sanitarios de Val d'Aran, Alta Ribagorça, Pallars Sobirà, Pallars Jussà y Alt Urgell, donde la distribución del factor de respuesta del sistema y del factor de respuesta normalizado, reflejan el deficiente condicionamiento del sistema sanitario para enfrentar un evento sísmico importante de la región del Pirineo Aragonés. Esta región, a pesar de tener una baja densidad de población, cuenta con una limitada infraestructura sanitaria e importantes niveles de sismicidad. Sus características topográficas limitan las facilidades de transporte y de viabilidad, lo cual se refleja en incrementos excesivos de los tiempos estimados de atención de la emergencia y de la respuesta del sistema, situación que se ha puesto de manifiesto gracias al estudio de escenarios de sismos históricos y simulados en dicha región, que han permitido constatar, la evolución temporal de la atención de la emergencia sísmica y comparar la actuación de cada uno de los hospitales que participan en la misma.

La segunda región comprende a la ciudad de Barcelona y sus áreas metropolitana y de influencia, que involucra la región sanitaria de Barcelona Ciutat (sector sanitario de Barcelonés), la parte sur de la región sanitaria del Centre (sectores sanitarios del Valle Occidental y Valles Oriental), la parte sur de la región sanitaria de Barcelonés Nord i Maresme (sur del sector sanitario de Maresme) y la parte sudeste de la región sanitaria de Costa de Ponent (sectores sanitarios del Baix Llobregat y Garraf), donde la distribución del factor de respuesta del sistema reflejan una limitada capacidad de respuesta del sistema sanitario para enfrentar un evento sísmico importante de dicha región, debido principalmente, al significativo número de heridos graves esperados, que simplemente colapsaría la capacidad efectiva del sistema a pesar de la relativamente baja sismicidad de la región. El impacto de un evento en esta región sobre la infraestructura sanitaria sería

crítico, debido al importante número de camas perdidas, asociadas a los significativos niveles de vulnerabilidad de algunos de los hospitales de la región. Sin embargo, debido a la importante densidad de camas de esta región, los tiempos estimados de atención de la emergencia son relativamente cortos, siempre que se mantenga operativa la infraestructura vial y los sistemas de comunicación, lo cual se traduce en relativamente menores valores del factor de respuesta normalizado.

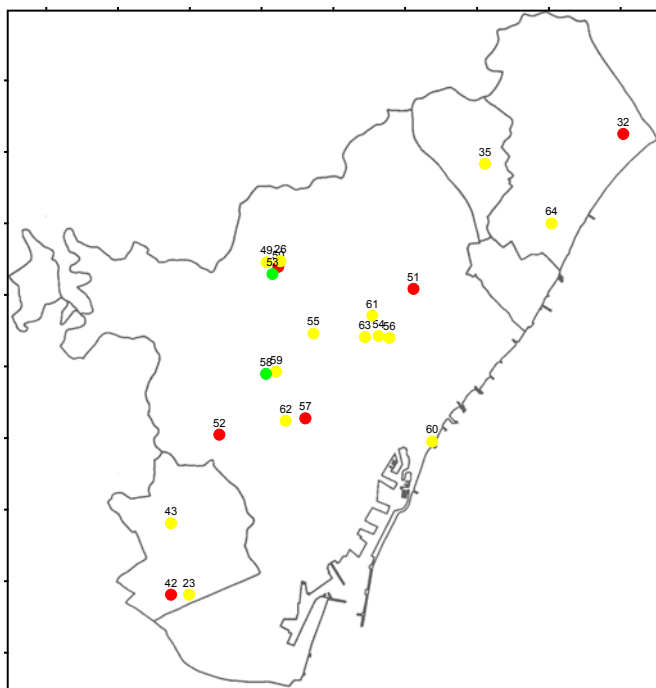
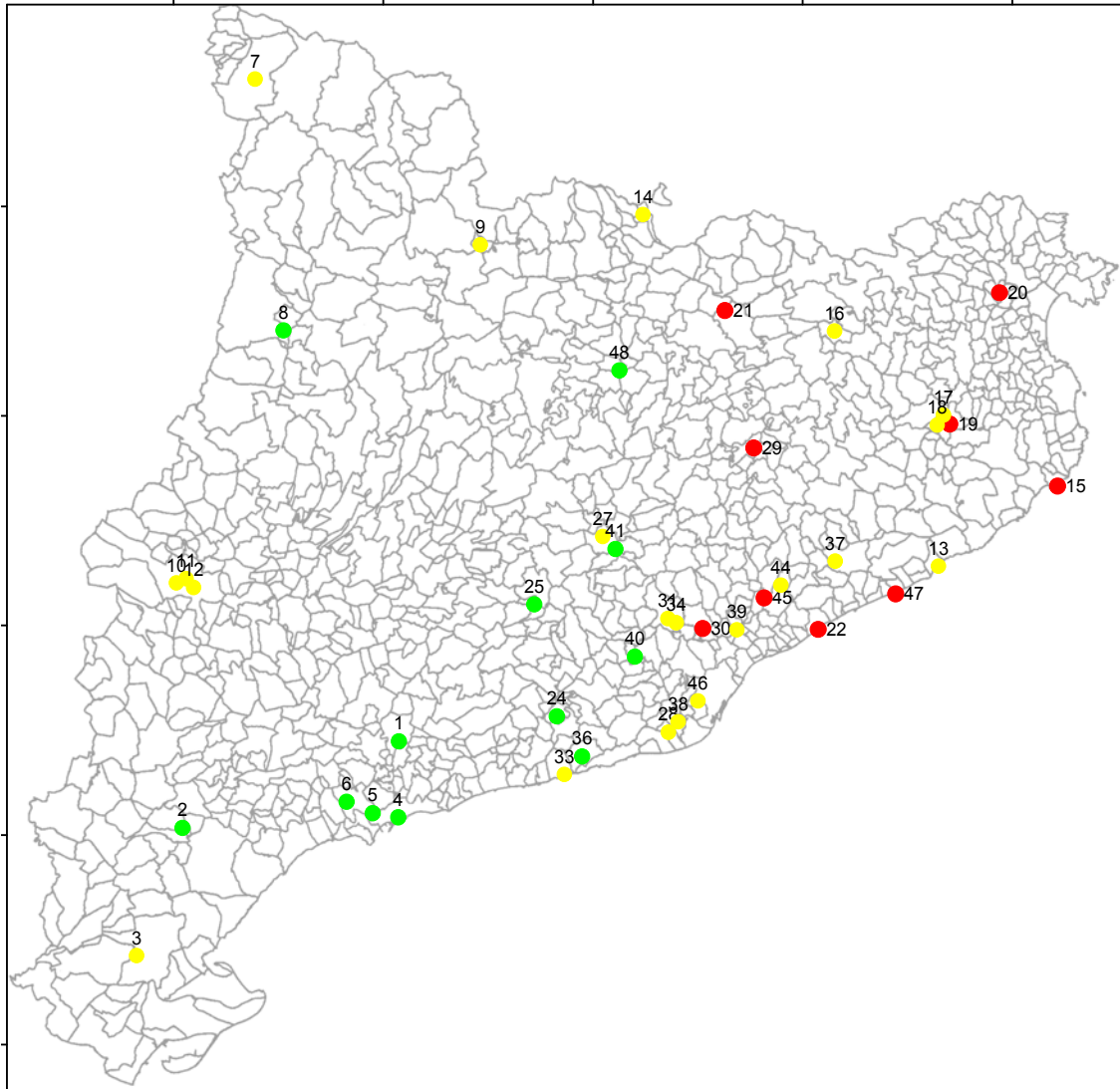
Finalmente, la tercera región de interés comprende las zonas costeras de Cataluña, hacia el norte de la ciudad de Barcelona (parte norte del sector sanitario de Maresme de la región sanitaria de Barcelonés Nord i Maresme) y sobre todo los alrededores de la ciudad de Girona, que comprende la parte este de la región sanitaria de Girona (sectores sanitarios de Girones, Pla de l'Estany, Alt Emporda, Baix Emporda y la porción sudeste del sector de la selva), donde la distribución del factor de respuesta del sistema y del factor de respuesta normalizado reflejan un condicionamiento regular del sistema sanitario para enfrentar un evento sísmico importante de dicha región. Los niveles moderados de sismicidad, unidos a las características de la población y la infraestructura de la región, conducen a unos patrones de respuesta del sistema sanitario relativamente críticos y que tienden a pronunciarse cuando el epicentro se ubica en los alrededores de la ciudad de Girona, con un impacto relativamente importante sobre la infraestructura sanitaria, relacionado principalmente con las pérdidas de camas esperadas.

Fuera de estas regiones, la ocurrencia de un evento sísmico, no conduciría a un escenario crítico de atención de la emergencia y por el contrario, el sistema sanitario existente estaría en capacidad de cubrir la demanda impuesta por el sismo de una manera apropiada. Quizás la ocurrencia de un evento en los alrededores de las ciudades de Lleida y Tarragona, podrían exigir al sistema, pero sin llevarlo a una condición crítica.

### **11.5.2. Desempeño de los hospitales**

La actuación de cada uno de los hospitales que conforman la XHUP está determinada por el escenario sísmico considerado. Es el resultado de la interacción de una importante cantidad de factores difíciles de calificar a priori. Se puede evidenciar del estudio de escenarios históricos y simulados esta dependencia, de manera que es difícil concluir sobre el desempeño de los hospitales basados sobre este tipo de evaluaciones. Por su parte, el estudio de pérdidas potenciales permiten calificar y comparar los efectos sobre el sistema para un determinado nivel de amenaza, e identificar aquellos eventos críticos; de manera que su aportación para calificar el desempeño de los hospitales es limitada, mientras que los resultados del análisis de riesgo, permiten de manera apropiada calificar el nivel de actuación de los hospital como parte de un sistema sanitario regional.

Cada hospital representa un elemento expuesto a los efectos de un evento sísmico, que como parte del sistema sanitario regional, tiene la responsabilidad de cumplir la función de atender la emergencia sísmica, al proporcionar atención médica inmediata a los heridos graves, producto de las pérdidas inducidas sobre otras instalaciones, también expuestas al evento sísmico. El análisis de riesgo sísmico, permite estimar los niveles probables de pérdidas en correspondencia con la sismicidad propia de la región. La calificación del desempeño sísmico de cada hospital utiliza como base el factor de respuesta del hospital, que combina de manera cuantitativa, los niveles de participación del hospital en la atención de la emergencia sísmica y los niveles de daños físicos directos esperados debido a su propia vulnerabilidad sísmica.



Clasificación respuesta:  
● Aceptable  
● Intermedia  
● Crítica

Fig. 11.10. Clasificación de los hospitales XHUP, de acuerdo con su respuesta sísmica

Sobre la base del criterio de jerarquización adoptado en el presente estudio y descrito en la Tabla 11.6., se han definido tres grupos de hospitales, clasificados de acuerdo su nivel de respuesta sísmica como: *aceptable*, *intermedia* y *crítica*. La Fig. 11.10., muestra la distribución geográfica de los hospitales de acuerdo con su nivel de respuesta sísmica (ver Tabla 11.7).

### 11.5.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos ponen en evidencia que los niveles de pérdidas esperadas como consecuencia de un sismo y en definitiva, el riesgo sísmico de una comunidad, dependen de los niveles de exposición al fenómeno sísmico (amenaza o peligrosidad sísmica), de los niveles de predisposición al daño de los elementos expuestos (vulnerabilidad sísmica) y, en el caso de la atención a las víctimas, de la distribución geográfica de víctimas graves y unidades de hospitalización.

Ante la ocurrencia de un evento sísmico poco frecuente, asociado a períodos medios de retorno entre 500 y 1000 años, la capacidad de respuesta del sistema sanitario de Cataluña es especialmente sensible a la ubicación de su epicentro. En algunas regiones, como las ubicadas hacia en norte y noroeste de Cataluña, los niveles del movimiento sísmico esperados inducirían niveles de pérdidas y consecuencias que comprometerían significativamente la respuesta del sistema sanitario, debido fundamentalmente, a la baja capacidad instalada en la zona y las limitadas posibilidades de movilización de pacientes a lo largo de la misma. Asimismo, un evento sísmico en los alrededores de la ciudad de Barcelona o la franja costera vecina, comprometería la capacidad de respuesta del sistema sanitario, debido fundamentalmente a los significativos niveles de vulnerabilidad existentes en la región.

Barcelona es una ciudad con un bajo nivel de peligrosidad, pero no ajena al problema sísmico. Por el contrario, se trata de una ciudad expuesta a un nivel de riesgo sísmico considerable, donde la ocurrencia de un evento sísmico poco frecuente, asociado a un período de retorno significativo podría ocasionar un impacto de gran magnitud. Más aún, pese a los esfuerzos que deben reconocerse de la administración pública, y en particular del Ayuntamiento de Barcelona, para considerar el problema sísmico en los planes de emergencia, existe todavía muy poca conciencia sísmica entre la población y menos aún, preparación para enfrentar las consecuencias de un evento sísmico.

Respecto a la capacidad de respuesta sísmica de los hospitales que conforman la XHUP, los resultados obtenidos permiten establecer una clasificación, según la cual: 14 hospitales (22%) experimentarían un respuesta aceptable, 35 hospitales (55%) una respuesta intermedia y 15 hospitales (23%) una respuesta crítica. La Tabla 11.8., discrimina los resultados de la clasificación de los hospitales por regiones sanitarias, de donde se desprende que los hospitales de las regiones sanitarias de Girona y de Barcelones Nord i Maresme son los que presentan el más bajo nivel de desempeño sísmico, seguidos de los hospitales de las regiones sanitarias de Barcelona Ciutat y Centre.

Tabla 11.8. Clasificación de hospitales por regiones sanitarias

Región Sanitaria	Código	No. de hospitales	Clasificación de la respuesta sísmica		
			Aceptable	Intermedia	Crítica
Lleida	61	6	1	5	---
Tarragona	62	5	5	---	---
Tortosa	63	1	---	1	---
Girona	64	8	---	4	4
Costa de Ponent	65	11	4	6	1
Barcelonés Nord i Maresme	66	5	---	2	3
Centre	67	12	2	7	3
Barcelona Ciutat	68	16	2	10	4
Total		64	14	35	15

Es importante destacar el carácter preliminar de estos resultados obtenidos, pues son el producto de una *evaluación preliminar*, de acuerdo con los niveles de evaluación de las edificaciones esenciales, propuestos en el apartado 7.7., del capítulo 7. Siguiendo el esquema propuesto en la Fig. 7.3., del citado capítulo, donde se describe la estrategia de evaluación en zonas de moderada sismicidad, como es el caso de Cataluña, donde las intensidades máximas esperadas para  $T_r=500$  años es menor que IX (ver Tabla 7.3.), se observa, que los resultados obtenidos representan apenas, la primera fase del proceso de evaluación, con un diagnóstico preliminar de la capacidad de respuesta del sistema y una *jerarquización* de los niveles de riesgo de los hospitales, que puede servir de base para la *toma de decisiones preliminares* e intervenciones de las instalaciones, orientadas a mitigar los niveles de riesgo sísmico de la región de Cataluña.

Sin embargo, estos resultados permiten calificar el desempeño sísmico de los centros hospitalarios y decidir, de manera coherente y racional, las necesidades de promover evaluaciones más rigurosas, de acuerdo con la importancia relativa de la instalación, pasando a evaluaciones de tipo general o inclusive detalladas, donde sea necesario aplicar técnicas más confiables de evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones, entre las que destacan los métodos analíticos y experimentales.

## 11.6. RESUMEN Y DISCUSIÓN

Este capítulo presenta uno de los principales aportes del estudio; la aplicación realizada sobre el sistema sanitario de Cataluña. En la misma se integran de manera sistemática, todos los planteamientos realizados en los capítulos anteriores, particularizado para uno de los principales sistemas de edificaciones esenciales de la región de Cataluña, como lo es el sistema sanitario.

La aplicación realizada se fundamenta en el enfoque de *vulnerabilidad sistémica*, descrito en los capítulos 7 y 8. La caracterización del sistema sanitario regional se estructura a través de un módulo de información territorial, que utilizando como unidad geográfica básica de información a los municipios, sintetiza la información de la población, la información de los hospitales y la definición de un modelo de peligrosidad sísmica regional, a través de la caracterización de zonas sismogénicas con influencia en Cataluña

y los patrones de atenuación de la región. La definición de los escenarios de daños asociado a cada escenario sísmico considerado, se fundamenta en un modelo de fragilidad de las edificaciones y de los hospitales, que permite hacer una estimación de víctimas y su distribución geográfica.

Para estudiar la respuesta sísmica del sistema sanitario de Cataluña se implementaron tres modalidades de evaluación: el estudio de escenarios, el estudio de pérdidas potenciales y el análisis de riesgo sísmico.

El estudio de escenarios se realiza sobre la base de sismos históricos, ocurridos en la región de Cataluña y sismos simulados, definidos conforme a los parámetros característicos de la zona considerada. Un total de 7 sismos históricos y 8 sismos simulados han sido considerados, entre los que destaca el importante evento ocurrido en la localidad de Camprodon (Ripollès 2/2/1428 – Intensidad IX). Para cada uno de estos eventos se presenta un resumen de los resultados obtenidos, en términos del número total de heridos graves, el total de camas perdidas, el tiempo máximo de atención de la emergencia sísmica, la cuantificación del factor de respuesta del sistema y del factor de respuesta normalizado, entre otros. Asimismo se presenta de manera detallada, los resultados obtenidos para tres de los escenarios simulados, asociados a un sismo con período medio de retorno de 1000, 500 y 75 años, con epicentro en la región del Pirineo Aragonés.

El estudio de pérdidas potenciales permite cartografiar los efectos de un nivel de amenaza sobre una región. Se realizaron para cada nivel de amenaza definido. Un total de 1476 evaluaciones de escenarios singulares, sobre una matriz de puntos equidistantes, representativos de un epicentro, al cual se ha asignado un sismo de intensidad  $I_0$ , en correspondencia con la zona sismogénica al cual pertenece y asociado a un período medio de retorno de 1000, 500 y 75 años, correspondientes aproximadamente a sismos con probabilidad de excedencia del 5%, 10% y 50% en 50 años. Los resultados se han representado en mapas temáticos, asignando a cada epicentro las consecuencias del sismo evaluado, en términos de número de heridos graves, número de camas perdidas, tiempo de atención de la emergencia, factor de respuesta del sistema y factor de respuesta normalizados e interpolándolos a los fines de proporcionar representaciones continuas de los efectos asociados a los sismos evaluados.

Finalmente, el análisis de riesgo permite calcular los niveles probables de pérdidas debidos a todos los tamaños de sismos posibles, en un período de tiempo. La evaluación se realizó sobre una matriz de puntos extendida, que cubre la totalidad de fuentes con influencia en Cataluña, distanciados entre sí cada 5,0 Km., para un total de 17.199 puntos de evaluación y 60.940 escenarios sísmicos posibles. Para cada uno de ellos, se acumulan los efectos o consecuencias sobre las comunidad y los diferentes elementos expuestos (edificaciones, víctimas, hospitales, etc.). En particular, se presentan gráficamente, los resultados del factor de respuesta de los hospitales  $FRH$  y de sus principales componentes; la relación  $NH/NCD$ , representativa de los niveles de demanda del hospital y la relación  $NCP/NCT$ , representativa de los niveles de pérdidas de camas del hospital, diferenciados en función del criterio de jerarquización adoptado, que ha servido de base para definir tres rangos del factor de respuesta de los hospitales, para una probabilidad anual de excedencia asociada a un período medio de retorno  $Tr = 475$  años, según el cual se clasifica la respuesta sísmica del hospital como, *aceptable*, *intermedia* o *crítica*, permitiendo identificar los diferentes niveles del desempeño sísmico de los hospitales que conforman la XHUP.

Un análisis completo de los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados ha permitido calificar el desempeño sísmico del sistema sanitario de Cataluña, así como el desempeño sísmico de cada uno de los hospitales que conforman la XHUP, creando una plataforma para la toma de decisiones, fundamentada en criterios racionales, que permitan la optimización de la aplicación de recursos, evidenciando que la implementación de modelos de análisis basados en el *enfoque sistémico*, constituye una herramienta fundamental para el diagnóstico y calificación de la respuesta sísmica de sistemas esenciales, donde la interrelación entre diversos elementos, sub-sistemas y sistemas, es fundamental.

En base a los resultados obtenidos, se evidencia que los hospitales que conforman las regiones sanitarias de Girona y de Barcelonés Nord i Maresme son los que presentan el más bajo nivel de desempeño sísmico, seguidos de los hospitales de las regiones sanitarias de Barcelona Ciutat y Centre, por lo que se recomienda promover la implementación en primer término de evaluaciones de la vulnerabilidad física a nivel general, basados en métodos empíricos de inspección y puntaje (como el denominado método italiano o cualquier adecuación del mismo) de los hospitales clasificados con un desempeño sísmico crítico pertenecientes a estas regiones (total 15 hospitales) e iniciar una campaña de levantamiento de información detallada e incluso de mediciones de propiedades dinámicas estructurales por vía de ensayos experimentales que permita adelantar estudios de nivel detallado basado en los métodos teóricos-analíticos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en aquellos hospitales con desempeño sísmico crítico calificados como instalaciones de importancia relativa muy alta, específicamente el Hospital Prínceps d'Espanya (42), el Hospital General Vall d'Hebron (50) y el Hospital Clínic i Provincial Barna (57).