



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



---

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica

Programa de doctorado: Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

## Análisis y gestión del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales

Tesis doctoral presentada para optar al grado de doctor  
por la Universitat Politècnica de Catalunya

Autor:

Jairo Andrés Valcárcel Torres

Directores:

Dr. Alex H. Barbat  
Dr. Omar D. Cardona  
Dr. Luis G. Pujades

---

Barcelona, 1 de Febrero de 2013



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica  
Programa de doctorado: Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural

Análisis y gestión del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales

Tesis doctoral presentada para optar al grado de doctor  
por la Universidad Politécnica de Cataluña

Autor:

Jairo Andrés Valcárcel Torres

Directores:

Dr Alex H. Barbat  
Dr Omar D. Cardona  
Dr. Luis G. Pujades

Tutor:

Dr Luis G. Pujades

Barcelona, 1 de febrero de 2013





## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto SISNEPI (CGL2007- 63576 – MICINN), por el Gobierno Español y los Fondos FEDER, a través de los proyectos CoPASRE (CGL2011-29063), CGL2008-00869/BTE, CGL2011-23621 y por la Comisión Europea con fondos FEDER, a través de los proyectos SEDUREC CONSOLIDER- CSD2006-00060, SISPYR INTERREG POCTEFA 2007-2013/73/08, MOVE- FT7- ENV-2007-1-211590 y DESURBS-FP7-2011-261652.

Agradezco al Doctor Omar Darío Cardona haberme introducido en este proyecto, incentivando la búsqueda de alternativas, de nuevos retos, la propuesta de nuevas soluciones y la posición crítica frente a las existentes.

Al Doctor Luis G. Pujades agradezco su interés por mi bienestar durante mis estudios. Por su enseñanza, por el trabajo prudente, con rigor y honestidad, mostrándome que siempre hay una forma correcta de hacer las cosas, tanto en el trabajo como en la vida.

Al Doctor Xavier Goula, por su entusiasmo durante el desarrollo de la tesis. Por su excelente ánimo y disposición frente a las propuestas que se formularon durante el proyecto. Su apoyo y ayuda fueron indispensables para llevar a cabo este trabajo.

Al Doctor Alex Barbat, por su confianza, por su respaldo, por su consejo para obrar con prudencia, con disciplina, también con celeridad.

A las Doctoras Teresa Susagna, Janira Irizarry, Nieves Lantada y Liliana Carreño, por su ayuda, revisiones, sugerencias, comentarios y correcciones. A Joan Maresma Nualart, a Alba Bosch i Teixidó y a Yinsury Sodel Peña por su colaboración en la revisión y edición del documento.

A Miguel Mora, Gabriel Bernal, César Velásquez, Yeudy Vargas, Armando Aguilar, por su ayuda, por compartir conmigo sus ideas, sus cuestionamientos, sus dudas, sus opiniones y su amistad. Su compañía fue muy gratificante.

A Mabel Marulanda, Eduardo Castro, Vladimir Merchán, Christian Muñoz, Diego Mora, Ivo Dias, Elvira Moreno, Guillermo Díaz, Jairo Andrés Paredes, Jeannette Zambrano, Manuel Caicedo, César Dávalos, Joaquín Hernández, Pablo Vargas, Nelson Lafontaine, Cuauhtemoc Escudero y Carlos Murillo, por su compañía en la universidad, por el apoyo y voces de ánimo durante los estudios.

Por su espíritu y amistad, quiero agradecer a las siguientes personas: Camilo Fernández, Daniel Bernal, Alicia Ruiz, Carlos Márquez, Sandra Calderón, Manuel Puerto, Carlos Santander, Ed Gonsalves, Roger Van Swaay, Juan Méndez, Ana Cabarcas, Ruth Vilagrasa, Juan Carlos Membrilla, Araceli Mostazo, David Soro, David Quesada, Girish Pramani, Tomas Bell, Jill Eckert, Daniel Schenk, Lluís Jackle, Olga Dalmau, Milton Torres, Sergi Esteban, Albert Mallada, Josefin Berg, Nicolas Chauveau, Tim Kohlstadt, Rory Kavanagh, Austin Desauelts, Jim Shur, Chiara Pasolini, Sinue Serra, Roberto Mastrangelo, Julie Siata, Lisa Gaillard, Maria Vergara, Laura Giraldo, Núria Martínez, Montse Estrada, Alicia Martínez, Mariel Bros, Ivan Mora, Adriana Amaya, Erika Ramírez, Diego Aponte, Germán Camilo Cardona, Rafael Barón, Iván Carrillo, Juan Carlos Vergara, Christian Cardona, Juan Camargo, Francesca De Gaspari y Daniele Pedretti.

A Jairo Hernán, por su respeto y respaldo a mis decisiones. Por su apoyo constante, por levantarme y caminar conmigo en las dificultades y en la celebración de triunfos. Ha sido un ángel de la guarda. A Tere, por templarme el ánimo, por escuchar mis dudas, mis temores, y con voz dulce recordarme que los retos deben ser enfrentados. A Germán y a Juan, que a distancia me alegraron, siempre dándome ejemplo y motivos de orgullo.

A Marcela Hernández (para mí, de Valcárcel), mi esposa, a quién dedico este trabajo. Las noches en vela juntos, los sacrificios que implican largas tardes de silencio, su emoción al escucharme cada logro, su atención al desarrollo de mi trabajo, su consejo en cada decisión, su amor, su apuesta sin condición, me inundaron de mensajes de aliento, impulsándome con la fuerza que da amarse, a elevar las anclas de este estudio, a seguir adelante, con rumbo a casa, a otras metas, persiguiéndolas juntos.

Barcelona, 26 de septiembre de 2012



## Resumen

Los daños por terremotos en edificios y sistemas esenciales han motivado la definición de estándares de comportamiento de estas instalaciones, buscando reducir las pérdidas económicas y la pérdida de funcionalidad. Varias iniciativas nacionales y regionales han sugerido procedimientos para la evaluación del comportamiento y fragilidad de los edificios. Estos avances han dado soporte para la gestión de programas nacionales y regionales para la reducción de la vulnerabilidad de instalaciones esenciales, en los cuales se debe decidir entre ejecutar obras de reforzamiento o bien, renovar la infraestructura.

En este trabajo se adoptan y presentan metodologías para evaluar la seguridad y riesgo sísmico, así como la factibilidad de las actividades de reducción de pérdidas, con el fin de priorizar el análisis detallado y orientar programas de reducción de la vulnerabilidad sísmica de edificios y sistemas esenciales. Estos procedimientos se aplican en diferentes casos de estudio, a escala local, regional, nacional y supranacional, realizando evaluaciones sobre centros educativos y centros de salud, entre otros edificios de importancia especial.

Respecto a la evaluación de la seguridad sísmica de los edificios esenciales, se adopta un método simplificado basado en espectros de capacidad, propuesto en el proyecto RISK UE para evaluar su comportamiento y calificar su seguridad de acuerdo a los estándares sugeridos por el Comité VISION 2000. Para este análisis, los edificios se clasifican en tipologías estructurales para las cuales se conocen espectros de capacidad. Para estimar la acción sísmica (en roca firme), se adaptan espectros de amenaza uniforme a las formas espectrales del Eurocódigo 8. Para evaluar la acción sísmica en superficie, se emplean espectros de respuesta para diferentes tipos de suelo, de acuerdo a los resultados de estudios de mesozonación sísmica. A partir de la evaluación del comportamiento y daño esperado de los edificios, se presentan alternativas para evaluar las pérdidas económicas, índices de funcionalidad, así como estimaciones del tiempo de recuperación, que permiten identificar las instalaciones más críticas. Estos procedimientos se aplican a edificios esenciales de Cataluña (España), considerando periodos de retorno de 475 y 975 años.

A escala local, esta metodología se aplica a los edificios esenciales ubicados en la Comarca de Val d'Arán. Este análisis permite evaluar su seguridad y priorizarlos según los daños esperados. De estos resultados se encuentra que cerca del 70% de los edificios son operacionales para periodos de retorno de 475 años. Para periodos de retorno de 975 años, son menos del 10% los edificios no cumplen con el nivel de comportamiento de seguridad de la vida. En cuanto a los daños esperados, el promedio de las instalaciones, para un periodo de retorno de 475 años, tienen un índice de pérdida económica del 25%. En cuanto a su funcionalidad, se observa que cerca del 50% tienen un índice de funcionalidad menor a 0.5.

A escala regional, el mismo procedimiento se aplica para evaluar la seguridad de un conjunto de centros educativos de Cataluña, compuesto por instalaciones ubicadas en la Comarca de Val d'Aran, en la Provincia de Girona, así como edificios construidos con sistemas industrializados, la mayoría situados en la Provincia de Barcelona. Del total de centros analizados, para un periodo de retorno de 475 años, son menos del 5% las instalaciones que no cumplen con el nivel de comportamiento operacional. Para un periodo de retorno de 975 años, todos los centros educativos cumplen con el requisito de seguridad de la vida. El promedio de la pérdida económica de los centros de Girona se encuentra entre el 15% y el 20%. El promedio de la pérdida económica del conjunto de edificios industrializados es inferior al 5%. Para los centros educativos de Val d'Arán, el promedio de la pérdida económica es del 25%.

En forma similar, se desarrolla una evaluación de la seguridad de un conjunto de hospitales públicos de Cataluña. Para eventos de periodo de retorno de 475 años, cerca del 16% no cumplen el nivel de comportamiento operacional. Para eventos de periodo de retorno de 975 años, todos los hospitales cumplen con el requisito de seguridad de la vida. Además de la evaluación del comportamiento, se estiman índices de pérdida económica, de funcionalidad y se propone un Índice de Vulnerabilidad de Hospitales que incluye aspectos estructurales, no estructurales y de capacidad de respuesta a emergencias.

Como complemento a la verificación de estándares de seguridad, en este trabajo se adoptan metodologías para la estimación de pérdidas esperadas ante un conjunto de eventos potencialmente dañinos, descritos por su magnitud y tasa de recurrencia. Dichos eventos se generan de acuerdo a la sismicidad de la zona de estudio. Para cada evento se evalúan las aceleraciones espectrales correspondientes al lugar donde se hallan las instalaciones empleando leyes de atenuación. Los edificios se clasifican en tipologías estructurales para las cuales se desarrollan curvas de vulnerabilidad. Dichas curvas relacionan la pérdida esperada y su desviación estándar con la aceleración espectral. Bajo este análisis es posible estimar la pérdida máxima probable para eventos de diferentes periodos de retorno, así como la pérdida anual esperada.

Esta metodología se aplica a escala supranacional para evaluar relaciones de beneficio-costos de la reducción del riesgo sísmico en el área construida de centros educativos públicos de países de América Latina. Este análisis se centra en las pérdidas económicas y permite identificar los países en los cuales resulta viable la intervención estructural. Estos resultados se comparan con índices de progreso del sector educativo y de inversión pública en educación, con el fin de identificar los países en los cuales, los daños en la infraestructura escolar representan altos costos de oportunidad y pueden afectar el cumplimiento de los objetivos y metas en educación.

Para la gestión de la seguridad de los edificios y sistemas esenciales, además de la estimación de las pérdidas económicas, es de interés evaluar las pérdidas asociadas a la interrupción del servicio durante terremotos, así como los impactos del desastre. Para el primer caso, se desarrolla un modelo para evaluar la respuesta de los hospitales durante eventos sísmicos. En este modelo se estiman el número de pacientes ingresados, en espera y no tratados oportunamente en un conjunto de hospitales. Este análisis se desarrolla para el conjunto de hospitales públicos de Cataluña para periodos de retorno de 475 y 975 años, así como para un conjunto de eventos generados de acuerdo a la peligrosidad sísmica de la región de estudio. De este análisis se encuentra que los hospitales con comportamiento crítico son aquellos ubicados en las zonas de mayor densidad de población y de mayor peligrosidad sísmica, en las cuales se espera que ocurran más heridos y que los hospitales puedan tener mayores daños. Para periodos de retorno de 475 años, el porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el sistema puede llegar a ser del 8% y del 25% para periodos de retorno de 975 años.

Para evaluar el impacto socioeconómico de los daños por terremotos en edificios esenciales, en este trabajo se adoptan metodologías para estimar los efectos sobre la población asociados a la reducción del funcionamiento de las instalaciones luego de eventos sísmicos. Estos procedimientos se aplican a un conjunto de hospitales públicos de Cataluña, con el fin de evaluar la reducción en la producción de salud, teniendo en cuenta diferentes escenarios de daños. La producción de salud se considera como el resultado de los servicios médicos ofrecidos con la infraestructura y recursos hospitalarios disponibles, los cuales influyen en la salud de la población. La producción de salud se mide en términos de la tasa de mortalidad (número de personas fallecidas anualmente por cada mil habitantes). De esta manera, una reducción en la producción de salud está relacionada con aumentos en la tasa de mortalidad. En el modelo adoptado, la producción de salud se relaciona con indicadores de los recursos sanitarios como el número de camas, personal médico y el diagnóstico de pacientes empleando nuevas tecnologías. De los resultados de este análisis se encuentra que, para escenarios de periodo de retorno de 475, la reducción en la producción de salud está relacionada con incrementos en la tasa de mortalidad de 0.84 muertos por cada mil habitantes. Dicho incremento es de 1.14 para periodos de retorno de 975 años.

Las metodologías propuestas y los resultados obtenidos son útiles para evaluar la importancia de la seguridad sísmica de los edificios y sistemas esenciales. Además de la verificación de los estándares de seguridad, los índices de pérdida económica, de funcionalidad, el análisis de respuesta ante emergencias y los impactos luego del desastre permiten identificar los beneficios de la reducción de la fragilidad de las instalaciones, dando soporte a programas de mitigación del riesgo.

## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1.1	Seguridad sísmica de edificios y sistemas esenciales.....	1
1.1.2	Variables de decisión en la gestión de la seguridad y del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales.....	2
1.1.3	Evaluación de riesgo en edificios esenciales y toma de decisiones.....	3
1.2	Objetivos y alcance.....	3
1.2.1	Objetivos.....	3
1.2.2	Alcance.....	5
1.3	Contenido de la memoria.....	5
<b>2</b>	<b>Revisión de pérdidas en edificios y sistemas esenciales y de planes para la reducción del riesgo.....</b>	<b>9</b>
2.1	Introducción.....	9
2.2	Edificios esenciales.....	9
2.3	Revisión de desastres sísmicos.....	10
2.4	Daños observados en hospitales y escuelas.....	13
2.4.1	España, Lorca, 11 de mayo de 2011.....	20
2.4.2	Haití, Puerto Príncipe, enero 12 de 2010.....	20
2.4.3	Chile, Maule, febrero 27 de 2010.....	21
2.4.4	Indonesia, Sur de Sumatra, septiembre 30 de 2009.....	21
2.4.5	Italia, L'Aquila, abril 6 de 2009.....	22
2.4.6	Pakistan, Balochistan, octubre 29 de 2008.....	22
2.4.7	China, Sichuan, mayo 12 de 2008.....	23
2.4.8	Perú, Pisco, agosto 15 de 2007.....	24
2.4.9	Indonesia, Java, Yogyakarta, mayo 27 de 2006.....	24
2.4.10	Irán, Borujerd, marzo 31 de 2006.....	25
2.4.11	Iran, Isla de Qeshm, noviembre 27 de 2005.....	25
2.4.12	Pakistán, Cachemira, octubre 8 de 2005.....	25
2.4.13	Indonesia, Sumatra, Nias, marzo 28 de 2005.....	26
2.4.14	Iran, Kerman, febrero 22 de 2005.....	26
2.4.15	Sri Lanka, Maldives, Tailandia, diciembre 26 de 2004.....	27
2.4.16	Argentina, Catamarca, septiembre 7 de 2004.....	27
2.4.17	Irán, Bam, diciembre 26 de 2003.....	27
2.4.18	Japón, Miyagi, julio 26 de 2003.....	28
2.4.19	Algeria, mayo 21 de 2003.....	28
2.4.20	Turquía, Bingol, mayo 1 de 2003.....	29
2.4.21	China, Xinjiang, febrero 24 de 2003.....	29
2.4.22	México, Colima, enero 21 de 2003.....	29

2.4.23	Italia, Molise, octubre 31 de 2002 .....	30
2.4.24	Afganistán, Hindu Kush, marzo 25 de 2002 .....	30
2.5	Casos de estudio .....	30
2.5.1	Informe de la situación de la emergencia en el terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010	30
2.5.2	Evaluación de daños de los hospitales afectados por el terremoto de Pisco, Perú.....	33
2.5.3	Evaluación de los daños del colegio San Giuliano afectado en el terremoto de Molise, Italia	35
2.6	Planes para la reducción del riesgo en edificios y sistemas esenciales.....	36
2.6.1	Instalaciones de salud .....	36
2.6.2	Centros educativos.....	38
2.7	Resumen y discusión .....	41
<b>3</b>	<b>Evaluación de la seguridad y del riesgo sísmico de los edificios y sistemas esenciales .....</b>	<b>45</b>
3.1	Introducción.....	45
3.2	Requisitos de seguridad en el diseño basado en comportamiento y en los códigos de construcción sismoresistentes .....	45
3.2.1	Diseño basado en comportamiento.....	45
3.2.2	Requisitos de seguridad en códigos de construcción sismoresistente .....	50
3.3	Comentarios al diseño basado en comportamiento.....	54
3.3.1	Procedimientos de evaluación .....	54
3.3.2	Limitaciones en la descripción de parámetros estructurales y del daño.....	54
3.3.3	Categorías de edificios, selección de niveles de amenaza y aversión al riesgo .....	55
3.3.4	¿Cuáles son los beneficios de la seguridad? .....	58
3.3.5	Confiabilidad del análisis .....	59
3.4	Evaluación de la confiabilidad y del riesgo de edificios.....	60
3.4.1	Variables para la toma de decisiones .....	61
3.5	Comentarios a la evaluación de la confiabilidad y del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales y a la comunicación de sus resultados .....	62
3.5.1	Alcance del enfoque probabilista en la evaluación de riesgos .....	63
3.5.2	Valores de riesgo aceptable.....	64
3.5.3	Significado y comunicación de las estimaciones de riesgo.....	65
3.6	Marco conceptual para la evaluación de la seguridad y riesgo de los edificios y sistemas esenciales .....	66
3.7	Resumen y discusión .....	68
<b>4</b>	<b>Metodología para la evaluación de la seguridad sísmica.....</b>	<b>71</b>
4.1	Introducción.....	71
4.2	Evaluación de la acción sísmica .....	72
4.2.1	Cálculo de espectros de probabilidad uniforme: análisis probabilista de la peligrosidad sísmica	73
4.2.2	Adaptación de los espectros probabilistas a espectros normativos .....	75
4.2.3	Identificación de suelos y caracterización de los espectros de respuesta.....	81

4.3	Evaluación de la vulnerabilidad estructural de edificios .....	83
4.3.1	Inspección y clasificación de edificios: uso de formularios para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales.....	83
4.3.2	Evaluación del comportamiento sísmico: estimación del punto de capacidad por demanda ...	85
4.3.3	Estimación del daño: evaluación de curvas de fragilidad.....	86
4.3.4	Evaluación de matrices de probabilidad y del grado de daño medio .....	88
4.4	Evaluación de la seguridad sísmica de edificios y sistemas esenciales .....	88
4.4.1	Verificación de niveles de comportamiento.....	88
4.4.2	Estimación y análisis de pérdidas esperadas.....	90
4.4.3	Funcionalidad de los edificios .....	94
4.5	Ejemplo de aplicación.....	96
4.5.1	Espitau de Val d' Aran .....	96
4.5.2	CEIP Estudi Alejandro Casona .....	100
4.6	Resumen y discusión .....	103
<b>5</b>	<b>Evaluación de la seguridad sísmica de edificios de importancia especial en el Valle de Arán.....</b>	<b>105</b>
5.1	Introducción.....	105
5.2	Inspección de los edificios esenciales del Valle de Arán.....	106
5.3	Descripción del conjunto de edificios.....	108
5.3.1	Edificios según tipología estructural .....	108
5.3.2	Edificios según periodo de construcción.....	109
5.3.3	Edificios según número de plantas.....	111
5.3.4	Edificios según irregularidades en planta.....	112
5.3.5	Edificios según irregularidades en altura .....	113
5.3.6	Edificios según reformas estructurales.....	114
5.3.7	Otros detalles estructurales.....	115
5.3.8	Edificios de salud.....	117
5.3.9	Edificios de enseñanza.....	118
5.3.10	Edificios de personal y equipos de ayuda .....	119
5.3.11	Edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales.....	120
5.3.12	Monumentos históricos o artísticos o de interés cultural y edificios de administración de gobierno <sup>121</sup>	
5.4	Estimación del daño esperado y evaluación de la seguridad de los edificios .....	121
5.4.1	Evaluación del grado de daño y de la seguridad de los edificios .....	124
5.4.2	Índices de pérdida económica, de funcionalidad y periodos esperados de recuperación de servicios .....	128
5.5	Resumen y discusión .....	132
<b>6</b>	<b>Evaluación de la seguridad sísmica de centros educativos de Cataluña</b>	<b>135</b>
6.1	Introducción.....	135
6.1.1	Organización del sistema educativo en Cataluña.....	136

6.2	Descripción de los centros educativos incluidos en el análisis.....	138
6.2.1	Centros educativos construidos con sistemas industrializados.....	138
6.2.1	Centros educativos de las capitales de comarca de la Provincia de Girona y de los municipios del Valle de Arán.....	142
6.3	Evaluación del daño esperado y de la seguridad de los centros educativos de la muestra ...	145
6.3.1	Evaluación del daño y de la seguridad sísmica de los centros educativos.....	148
6.3.2	Pérdidas esperadas.....	153
6.3.3	Evaluación de costos durante la vida útil del proyecto.....	154
6.4	Resumen y discusión.....	155
<b>7 Evaluación de la seguridad de los hospitales públicos de Cataluña.....</b>		<b>159</b>
7.1	Introducción.....	159
7.1.1	Organización territorial del sistema sanitario de Cataluña.....	160
7.2	Descripción de las propiedades arquitectónicas y estructurales de los hospitales.....	162
7.2.1	Características arquitectónicas de la infraestructura hospitalaria.....	162
7.2.2	Tipologías estructurales de los edificios.....	164
7.3	Evaluación del daño y de la seguridad sísmica de los hospitales públicos de Cataluña.....	167
7.3.1	Estimación del daño y evaluación seguridad estructural.....	167
7.3.2	Índices de pérdida económica y de funcionalidad.....	171
7.4	Resumen y discusión.....	175
<b>8 Metodología para la evaluación del beneficio-coste de la mitigación del riesgo sísmico en edificios esenciales.....</b>		<b>177</b>
8.1	Introducción.....	177
8.2	Metodología propuesta para la evaluación de beneficio-coste.....	179
8.3	Módulo de peligrosidad sísmica.....	182
8.3.1	Identificación de las principales fuentes sísmicas y definición de su sismicidad.....	182
8.3.2	Generación de un conjunto aleatorio de eventos.....	183
8.3.3	Atenuación del movimiento del suelo.....	184
8.4	Módulo de exposición.....	184
8.4.1	Ubicación y valor de los edificios.....	184
8.4.2	Tipología estructural.....	185
8.5	Módulo de vulnerabilidad y de curvas de pérdida esperada.....	185
8.5.1	Valor esperado de la pérdida económica.....	186
8.5.2	Distribución de probabilidad y desviación estándar de la pérdida económica.....	187
8.5.3	Relaciones entre curvas de fragilidad y curvas de pérdida.....	188
8.5.4	Relación entre el daño del edificio y efectos sobre sus ocupantes.....	190
8.5.5	Relación entre el daño del edificio y la reducción en la funcionalidad y la producción de servicios.....	192
8.6	Módulo de riesgo.....	194
8.6.1	Curva de excedencia de pérdidas.....	194
8.6.2	Pérdida anual esperada.....	196



8.7	Módulo de beneficio-costo .....	196
8.7.1	Costos de reforzamiento .....	197
8.7.2	Tasa de descuento .....	197
8.7.3	Evaluación de beneficio-costo considerando múltiples variables de decisión.....	197
8.8	Comentarios al análisis de beneficio-costo.....	198
8.8.1	Formulación del análisis.....	198
8.8.2	Caracterización de las opciones.....	199
8.8.3	Valoración de beneficios y costos.....	200
8.9	Resumen y discusión .....	201
<b>9</b>	<b>Evaluación del beneficio-costo de la mitigación del riesgo sísmico de centros educativos en Latinoamérica.....</b>	<b>203</b>
9.1	Introducción.....	203
9.2	Peligrosidad sísmica .....	204
9.3	Estimación del área y valor de los centros educativos expuestos al peligro sísmico.....	206
9.3.1	Estimación del área de los centros educativos.....	206
9.3.2	Estimación del valor económico de los centros educativos.....	208
9.3.3	Tipologías estructurales.....	209
9.4	Vulnerabilidad de las tipologías estructurales representativas de los centros educativos ...	211
9.4.1	Caracterización de las tipologías estructurales en el estado actual y en un estado reforzado.	211
9.5	Valoración de los costos de reforzamiento estructural .....	213
9.6	Resultados de la evaluación de riesgo y del análisis de beneficio-costo a nivel nacional ...	214
9.6.1	Pérdida Anual Esperada.....	214
9.6.2	Relación de beneficio-costo.....	216
9.6.3	Contexto de los resultados de la evaluación del riesgo sísmico de los centros educativos ...	217
9.7	Resultados a nivel nacional: Colombia.....	219
9.8	Resumen y discusión .....	223
<b>10</b>	<b>Evaluación de la respuesta sísmica de la red de hospitales públicos de Cataluña y de los impactos sobre la atención sanitaria.....</b>	<b>225</b>
10.1	Introducción.....	225
10.2	Metodología para la evaluación de la respuesta sísmica de una red de hospitales.....	226
10.2.1	Evaluación de heridos y reparto entre los hospitales .....	226
10.2.2	Estimación del número de pacientes atendidos en diferentes intervalos de tiempo.....	229
10.2.3	Evaluación de heridos en espera.....	230
6.4.1	Alcance y limitaciones del modelo .....	235
10.3	Caso de estudio: Sistema de hospitales públicos de Cataluña.....	236
10.3.1	Polos de atracción de servicios, recursos médicos y congestión de los servicios hospitalarios: 236	
10.3.2	Evaluación de la respuesta para eventos específicos .....	239
10.3.3	Evaluación del riesgo sísmico del sistema de hospitales públicos de Cataluña.....	244

10.4	Estimación de impactos en los servicios de salud .....	256
10.5	Resumen y discusión .....	259
<b>11 Conclusiones y trabajos futuros .....</b>		<b>261</b>
11.1	Conclusiones generales .....	261
11.1.1	Evaluación y toma de decisiones frente a la seguridad de los edificios esenciales.....	261
11.1.2	Seguridad sísmica vs riesgo sísmico .....	262
11.2	Conclusiones de los casos de estudio .....	263
11.2.1	Evaluación de la seguridad sísmica y de los daños esperados en edificios esenciales de Cataluña263	
11.2.2	Evaluación del riesgo sísmico y del beneficio-coste de la reducción de la vulnerabilidad de edificios y sistemas esenciales .....	268
11.3	Trabajos futuros.....	271
<b>Bibliografía.....</b>		<b>275</b>

## **Anexos**

- Anexo A** Formularios para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales
- Anexo B** Parámetros de los espectros de capacidad y curvas de fragilidad de las tipologías estructurales
- Anexo C** Daños observados en centros educativos y en instalaciones de salud luego del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011
- Anexo D** Evolución de la arquitectura escolar en Cataluña
- Anexo E** Base de datos del conjunto de hospitales públicos de Cataluña estudiado
- Anexo F** Índice de Vulnerabilidad de Hospitales
- Anexo G** Base de datos de los edificios de importancia especial del Valle de Aran. Formularios de inspección y fichas de evaluación de daños
- Anexo H** Base de datos del conjunto de centros educativos de Cataluña evaluados. Formularios de inspección y fichas de evaluación de daños

## Listado de figuras

Figura 1-1 Esquema de la memoria.....	6
Figura 2-1 Población mundial y previsiones sísmicas relevantes .....	11
Figura 2-2 Número de desastres registrados que han tenido efectos (daños) por terremotos y previsiones sismoresistentes relevantes .....	11
Figura 2-3 Número de muertos y daños estimados en terremotos .....	12
Figura 2-4 Desastres sísmicos y eventos de magnitud>6.5 .....	13
Figura 2-5 Número de muertos y valor de pérdidas económicas en algunos de los desastres analizados ..	16
Figura 2-6 Mapa de muertos y pérdidas de los eventos analizados.....	19
Figura 2-7 (a) Mapa administrativo de Chile según regiones; (b) Shakemap del terremoto de Maule, Chile, 27 de febrero de 2010.....	31
Figura 2-8 (a) Mapa administrativo de Perú según departamentos; (b) localización de las ciudades de Pisco, Ica, Chincha Alta y Chincha Baja, Departamento de Ica; (c) Shakemap del terremoto de Pisco, Perú 15 de agosto de 2007.....	34
Figura 2-9 (a) Mapa administrativo de Italia; (b) Shakemap del terremoto de Molise, Italia, 31 de octubre de 2002.....	35
Figura 3-1 Factores de importancia según cambios en: (a) el periodo de exposición (b), la probabilidad de excedencia.....	53
Figura 3-2 Probabilidad de excedencia, vida útil del proyecto y periodo de retorno para la selección del nivel de amenaza.....	57
Figura 3-3 Esquema del enfoque del PEER para diseño basado en la ingeniería sísmica .....	62
Figura 3-4 Ejemplo de curvas de frecuencia-consecuencia (curvas F-N).....	64
Figura 3-5 Esquema de los costos asociados a las pérdidas por desastre.....	68
Figura 4-1 Diagrama de la metodología para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios .....	72
Figura 4-2 PGA (Tr 475 años, valores medios) .....	75
Figura 4-3 Espectros de respuesta elástica en roca para Vielha. a) Espectro medio (Geoter) para Tr 475 y distintos percentiles. Espectro medio (Geoter) para Tr 975. b) Espectro medio (Geoter) para Tr475 y percentil 70 y espectros normativos con distintos escalados. ....	76
Figura 4-4 Espectros de respuesta elástica en roca para Barcelona. a) Espectro medio (GEOTER) para Tr 475 y distintos percentiles. Espectro medio (GEOTER) para Tr 975. b) Espectro medio (GEOTER) para Tr475 y percentil 70 y espectros normativos con distintos escalados .....	76
Figura 4-5 Error medio absoluto. Comparación con espectros EC 8 Tipo II escalados al PGA y ajustados en la meseta de aceleración constante (Tr 475 años, valores medios).....	77
Figura 4-6 Razón entre la aceleración máxima y el PGA, normalizada al valor 2.5 (Tr 475 años, valores medios) .....	78

Figura 4-7 Error medio absoluto. Comparación entre espectros del EC 8 Tipo II y los espectros del PSHA para periodos de retorno de 975 años (valores medios).....	79
Figura 4-8 Razón entre el PGA obtenido para periodos de retorno de 975 y 475 años (valores medios)...	80
Figura 4-9 Espectros de respuesta (normalizados) según tipos de suelo.....	82
Figura 4-10 Mapa de mesozonación sísmica.....	83
Figura 4-11 Procedimiento para el cálculo del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda.....	86
Figura 4-12 curvas de fragilidad de la tipología estructural M33 H.....	87
Figura 4-13 Funciones de pertenencia de los índices de daño adoptados.....	90
Figura 4-14 Funciones de pertenencia del costo de la pérdida (% del valor de reposición del edificio) para cada estado de daño.....	92
Figura 4-15 Índices de pérdida económica y grado de daño medio (normalizado [0,1]) obtenidos para un edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme.....	93
Figura 4-16 Índice de pérdida y grado de daño medio normalizado [0,1]. Edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme.....	94
Figura 4-17 Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación según grado de daño medio.....	95
Figura 4-18 Ubicación de los edificios y tipo de suelo.....	96
Figura 4-19 a y b, fachadas del edificio; c) Pilares de la estructura; c) forjado de la estructura.....	97
Figura 4-20 Espectro de respuesta elástica. Espectro de demanda. Espectro de capacidad y punto de comportamiento para los edificios de tipología RC3.2L.....	98
Figura 4-21 Curvas de fragilidad para la tipología RC3.2L.....	98
Figura 4-22 Matriz de probabilidad de daño- Espitau de Val d' Aran.....	99
Figura 4-23 Grado de daño medio, índice de pérdida económica, índice de funcionalidad y tiempo estimado de recuperación (Espitau de Val d'Aran).....	99
Figura 4-24 (a), (b) y (c) fachadas del edificio; (d) muros y forjado.....	100
Figura 4-25 Espectro de respuesta elástica. Espectro de demanda. Espectro de capacidad y punto de comportamiento para los edificios de tipología M34L.....	101
Figura 4-26 Curvas de fragilidad para la tipología M34L.....	101
Figura 4-27 Matriz de probabilidad de daño- CEIP Estudi Alejandro Casona.....	102
Figura 4-28 Grado de daño medio, índice de pérdida económica, índice de funcionalidad y tiempo estimado de recuperación (CEIP Estudi Alejandro Casona).....	102
Figura 5-1 Ubicación geográfica de la zona de análisis.....	105
Figura 5-2 (a)-Intensidades máximas percibidas en Cataluña en el Siglo XX –(b)–Valores medios del PGA (cm/s <sup>2</sup> ) para un escenario de Tr 475 años.....	106
Figura 5-3 Número y porcentaje acumulado de edificios según tipologías estructurales.....	108
Figura 5-4 Número y porcentaje acumulado de edificios según periodos de construcción.....	110
Figura 5-5 Número de edificios según tipología estructural y periodo de construcción.....	111

Figura 5-6 Número y porcentaje acumulado de edificios según número de plantas .....	112
Figura 5-7 Porcentaje y porcentaje acumulado de edificios según número de plantas en la comarca de Val d' Aran .....	112
Figura 5-8 Número y porcentaje acumulado de edificios según irregularidad en planta .....	113
Figura 5-9 Número y porcentaje acumulado de edificios según irregularidad en altura .....	113
Figura 5-10 Número de edificios con reformas estructurales para redistribuir espacios .....	114
Figura 5-11 Número de edificios con reformas para reparar el edificio .....	114
Figura 5-12 Número de edificios según tipología estructural y uso .....	116
Figura 5-13 Edificios según uso y periodo de construcción.....	116
Figura 5-14 Resumen de valores de los inmuebles, instalaciones, maquinaria, equipo y mobiliario del hospital.....	117
Figura 5-15 Porcentaje de instalaciones según rangos del PGA (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años .....	122
Figura 5-16 Porcentaje de instalaciones según tipos de suelo.....	122
Figura 5-17 Porcentaje de instalaciones según rangos de PGA considerando el tipo de suelo.....	123
Figura 5-18 Valores máximos, mínimos y promedio del PGA (g) considerando el tipo de suelo y según tipologías (a), Tr= 475 años; (b), Tr= 975 años.....	123
Figura 5-19 PGA en roca y considerando el tipo de suelo, Tr 475 años; para cada instalación.....	124
Figura 5-20 Porcentaje de edificios según rangos del grado de daño medio; (a) Tr 475 años; (b) 975 años .....	125
Figura 5-21 Grado de daño medio y PGA (considerando el tipo de suelo) según instalación (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años .....	126
Figura 5-22 Grado de daño medio en instalaciones según uso: (a) salud;(b) enseñanza; (c) edificios de administración de gobierno y monumentos históricos;(d) edificios de personal y equipos de ayuda;(e) edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales .....	127
Figura 5-23 Valores máximos y mínimos del grado de daño medio para los edificios según uso (Tr 475 años).....	128
Figura 5-24 Valores máximos y mínimos del grado de daño medio para los edificios según uso (Tr 975 años).....	128
Figura 5-25 Índice de pérdida económica .....	129
Figura 5-26 Índice de funcionalidad.....	130
Figura 5-27 Porcentaje de instalaciones según rangos del índice de funcionalidad (Tr 475 años) .....	130
Figura 5-28 Tiempo de recuperación .....	131
Figura 5-29 Porcentaje de instalaciones según rangos de recuperación (Tr 475 años) .....	132
Figura 6-1 Mapa de servicios territoriales del Departament d'Ensenyament.....	137
Figura 6-2 Alumnos según nivel de instrucción en cada municipio.....	137
Figura 6-3 Evolución de la construcción de centros escolares con sistemas industrializados: (a) entre 1970 y 1983; (b) entre 2002 y 2006.....	138

Figura 6-4 Municipios de Cataluña en los que se han construido centros escolares con sistemas industrializados .....	138
Figura 6-5 Sistemas constructivos industrializados encontrados en centros educativos .....	141
Figura 6-6 Porcentaje de edificios según tipologías estructurales.....	143
Figura 6-7 Número y porcentaje de edificios según número de plantas.....	144
Figura 6-8 Número y porcentaje de edificios incluidos en el estudio, según periodos de construcción ...	144
Figura 6-9 Ubicación de los centros educativos analizados y PGA de Cataluña para un periodo de retorno de 475 años .....	145
Figura 6-10 Costos por m <sup>2</sup> de proyectos de adecuación, ampliación y reforma realizados entre 2007 y 2009 en Cataluña .....	145
Figura 6-11 Porcentajes de instalaciones según rangos del PGA en roca firme: (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años .....	147
Figura 6-12 Porcentaje de instalaciones según tipo de suelo .....	147
Figura 6-13 Porcentaje de instalaciones según rangos de PGA considerando el tipo de suelo: (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años .....	148
Figura 6-14 Porcentaje de instalaciones según rangos del grado de daño medio (a) Tr 475 años; (b) 975 años .....	148
Figura 6-15 Grado de daño medio de los edificios (Tr 475 años) y nivel de comportamiento operacional (SEAOC 2000).....	149
Figura 6-16 Grado de daño medio de los edificios (Tr 975 años) y nivel de comportamiento de seguridad de la vida (SEAOC 2000) .....	149
Figura 6-17 Porcentaje de instalaciones de la Provincia de Girona según rangos del grado de daño medio para periodos de retorno de 475 y 975 años .....	150
Figura 6-18 Porcentaje de instalaciones construidas con sistemas industrializados según rangos del grado de daño medio para periodos de retorno de 475 y 975 años .....	150
Figura 6-19 Número de centros educativos de la Comarca de Val d' Aran según rangos del grado de daño medio para periodos de retorno de 475 y 975 años.....	151
Figura 6-20 Grado de daño medio según tipologías y valores de PGA (roca) para un periodo de retorno de 475 años .....	151
Figura 6-21 Grado de daño medio según tipologías y valores de PGA (roca) para un periodo de retorno de 975 años .....	152
Figura 6-22 Mapa de los centros educativos según grado de daño medio Tr 475 años .....	152
Figura 6-23 Pérdidas económicas de los centros Tr 475(en millones de Euros).....	153
Figura 6-24 Pérdidas económicas de los centros Tr 975(en millones de Euros).....	153
Figura 6-25 Pérdida económica Tr 475 (% del valor del centro educativo).....	153
Figura 6-26 Pérdida económica Tr 975 (% del valor del centro educativo).....	154

Figura 6-27 Valores máximo, mínimo y promedio para las pérdidas económicas de las instalaciones según grupos y periodos de retorno (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años .....	154
Figura 6-28 Puntos de comportamiento de (a) estructuras de hormigón armado irregulares, con muros de relleno de mampostería; (b) pórticos de hormigón prefabricado .....	155
Figura 7-1 Regiones sanitarias y distribución de la red de hospitales públicos de Cataluña. ....	161
Figura 7-2 Tipologías arquitectónicas de hospitales .....	162
Figura 7-3 Tipos de hospitales construidos antes de 1900 (a) Hospital San Joan de Reus; (b) Hospital Comarcal San Antoni Abat .....	163
Figura 7-4 Hospital de Sant Pau.....	163
Figura 7-5 Hospitales de tipo monobloque construidos entre 1950 y 1980 (a) Hospital de Vall d'Hebron; (b) Hospital Universitario de Girona Dr Josep Trueta.....	163
Figura 7-6 Ejemplos de hospitales comarcales .....	164
Figura 7-7 Porcentaje de edificios según tipologías estructurales.....	166
Figura 7-8 Porcentaje de edificio según periodo de construcción.....	166
Figura 7-9 Porcentaje de camas según periodo de construcción .....	167
Figura 7-10 Porcentaje de edificios según rangos de altura .....	167
Figura 7-11 Porcentajes de instalaciones según rangos del PGA; (a) Tr 475 años; (b) 975 años .....	168
Figura 7-12 Porcentaje de edificios según tipos de suelo.....	169
Figura 7-13 Porcentaje de instalaciones según rangos de PGA con efectos de suelo .....	169
Figura 7-14 Grado de daño medio (normalizado)Tr 475 años .....	170
Figura 7-15 Grado de daño medio (normalizado) Tr 975 años .....	171
Figura 7-16 Porcentaje de hospitales según rangos del Índice de pérdida económica.....	172
Figura 7-17 Índice de pérdida económica (% del valor del edificio) (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años ....	172
Figura 7-18 Porcentaje de hospitales según el índice de funcionalidad .....	173
Figura 7-19 Índice de funcionalidad de los hospitales (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años .....	173
Figura 8-1 Metodología propuesta para la evaluación del beneficio-costo de la mitigación del riesgo sísmico en edificios.....	181
Figura 8-2 Espectro de capacidad en formato bilineal para la tipología M3-3H.....	188
Figura 8-3 Curva de pérdida para la tipología M3-3H .....	188
Figura 8-4 Probabilidad de colapso de los edificios según su desplazamiento .....	191
Figura 8-5 Porcentaje de heridos según severidad y probabilidad de colapso .....	192
Figura 8-6 Porcentaje de heridos según tipo de heridos para el desplazamiento espectral del edificio ....	192
Figura 8-7 Índice de daño del edificio. Tipología M3-3H .....	193
Figura 9-1 Aceleración pico del suelo para un escenario de periodo de retorno de 475 años.....	205
Figura 9-2 Frecuencias relativas de los rangos de m <sup>2</sup> por alumno. ....	207
Figura 9-3 Relación entre el EDI y los metros cuadrados por alumno.....	208
Figura 9-4 Gasto público en educación como porcentaje del PIB .....	208

Figura 9-5 Relación entre el PIB per cápita y el valor expuesto por alumno.....	209
Figura 9-6 Composición del area construida según tipologías estructurales en cada país.....	209
Figura 9-7 Distribución geográfica de los valores expuestos en centros educativos.....	210
Figura 9-8 Valor expuesto en los centros educativos según países.....	211
Figura 9-9 Curvas de pérdida (valores esperados) de las tipologías incluidas en el estudio.....	212
Figura 9-10 Pérdida anual esperada del área construida del sector educativo según país.....	214
Figura 9-11 Resultados del análisis de beneficio-costo.....	216
Figura 9-12 Pérdida Anual Esperada vs Índice de desarrollo en la educación.....	217
Figura 9-13 Pérdida Anual Esperada vs inversión en educación (%PIB).....	218
Figura 9-14 Composición del area de centros educativos en tipologías estructurales.....	219
Figura 9-15 Mapa del valor expuesto según municipios.....	220
Figura 9-16 Mapa de los eventos sísmicos generados para el análisis según magnitudes.....	220
Figura 9-17 Curva de Excedencia de Pérdidas para el estado actual y el reforzado.....	221
Figura 9-18 Mapa de la pérdida Anual Esperada por municipio. Estado actual.....	221
Figura 9-19 (a) razón de beneficio-costo por departamento; (b) Diferencia del valor presente (esperado) de la PAE en el caso actual y en el reforzado; (E[LU]-E[LR]); (c) costos de reforzamiento.....	222
Figura 9-20 (a) Comparación entre los costos de reforzamiento y los beneficios del reforzamiento estructural de los centros educativos (E[L <sub>U</sub> ]-E[L <sub>R</sub> ]); (b) Relación de beneficio-costo por Departamento.....	222
Figura 10-1 Metodología para la evaluación de la respuesta de los hospitales ante eventos sísmicos.....	227
Figura 10-2 Gestión de los heridos leves en el hospital D.....	233
Figura 10-3 Gestión de los heridos moderados en el hospital D.....	233
Figura 10-4 Gestión de los heridos graves en el hospital D.....	234
Figura 10-5 Gestión de heridos leves en el conjunto de hospitales (ejemplo).....	234
Figura 10-6 Gestión de heridos moderados en el conjunto de hospitales (ejemplo).....	235
Figura 10-7 Gestión de heridos graves en el conjunto de hospitales (ejemplo).....	235
Figura 10-8 Zonificación según camas hospitalaria.....	237
Figura 10-9 Porcentajes promedio de participación de las tipologías estructurales consideradas en el análisis.....	239
Figura 10-10 Aceleraciones espectrales para t=0 segundos en el escenario; estimaciones de los heridos esperados en el escenario (b) leves; (c) moderados; (d) graves.....	241
Figura 10-11 Gestión de los heridos leves en el sistema.....	242
Figura 10-12 Gestión de heridos moderados en el escenario.....	242
Figura 10-13 Gestión de heridos graves en el escenario.....	242
Figura 10-14 Índices de funcionalidad calculados en los hospitales para el evento.....	243
Figura 10-15 Total de heridos ingresados en los hospitales.....	243
Figura 10-16 Total de heridos no tratados en los hospitales.....	244



Figura 10-17 Eventos sísmicos incluidos en el análisis según rangos de magnitud.....	248
Figura 10-18 Leyes de atenuación empleadas.....	249
Figura 10-19 Porcentaje promedio de participación de las tipologías estructurales en los municipios de Cataluña .....	250
Figura 10-20 Curvas de vulnerabilidad empleadas en el análisis.....	240
Figura 10-21 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el sistema .....	251
Figura 10-22 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables .....	252
Figura 10-23 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables .....	252
Figura 10-24 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables .....	253
Figura 10-25 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables .....	253
Figura 10-26 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles intermedios.....	254
Figura 10-27 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles críticos.....	254
Figura 10-28 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles críticos.....	255
Figura 10-29 Mapa de los hospitales según nivel de comportamiento.....	255
Figura 10-30 (a) Número de camas por cada mil habitantes; (b) personal sanitario por cada mil habitantes; (c) técnicas de diagnóstico; (d) tasa estandarizada de mortalidad .....	257
Figura 10-31 Tasa de mortalidad estandarizada en escenarios sin daños y con eventos de periodo de retorno (Tr) de 475 y 975 años .....	258



## Listado de tablas

Tabla 2–1 Principales terremotos catastróficos entre 1900 y 2009 .....	11
Tabla 2–2 Número de terremotos entre 2000-2010 localizados por el servicio geológico de Estados Unidos.....	12
Tabla 2–3 Promedio anual de eventos según rangos de magnitud.....	13
Tabla 2–4 Resumen de daños en hospitales y escuelas por terremotos entre 1960 y 2001.....	13
Tabla 2–5 Resumen de los eventos considerados en el documento .....	17
Tabla 2–6 Recomendaciones de corto plazo para la intervención en hospitales.....	36
Tabla 2–7 Recomendaciones de largo plazo para la intervención en hospitales.....	36
Tabla 3–1 Descripción de los niveles de comportamiento.....	46
Tabla 3–2 Periodos de retorno para los diferentes niveles de amenaza .....	46
Tabla 3–3 Niveles de comportamiento y amenaza según tipo de instalación .....	46
Tabla 3–4 Niveles de comportamiento estructural.....	47
Tabla 3–5 Nivel de comportamiento no estructural .....	47
Tabla 3–6 Niveles de comportamiento para la rehabilitación sísmica de edificios.....	48
Tabla 3–7 Control de daño y niveles de comportamiento de los edificios.....	48
Tabla 3–8 Relación entre los niveles de comportamiento del edificio y los niveles de amenaza .....	49
Tabla 3–9 Objetivos de seguridad para el reforzamiento de edificios .....	49
Tabla 3–10 Objetivos de seguridad para el reforzamiento de los edificios.....	49
Tabla 3–11 Categorías de edificios, atendiendo a su importancia, en normas sismoresistentes seleccionadas .....	51
Tabla 3–12 Factores de importancia según grupos de edificios en normas sismoresistentes seleccionadas .....	51
Tabla 3–13 Listado de edificios y su clasificación según categorías de importancia en normas de construcción sismoresistente seleccionadas.....	52
Tabla 4–1 PGA ( $\text{cm/s}^2$ ) estimado en Barcelona y Vielha .....	76
Tabla 4–2 Valores del error absoluto medio (MAE) en $\text{cm/s}^2$ .....	79
Tabla 4–3 Descripción de los tipos de suelo considerados en el proyecto SISpyr.....	81
Tabla 4–4 Parámetros de los espectros de respuesta propuestos en el proyecto SISpyr .....	82
Tabla 4–5 Tipologías estructurales consideradas .....	84
Tabla 4–6 Definición de los umbrales de los diferentes estados de daño de acuerdo a la propuesta Risk-UE.....	87
Tabla 4–7 Niveles de comportamiento esperado para edificios esenciales.....	89
Tabla 4–8 Índices de daño en diferentes escalas (estructuras de hormigón armado).....	89
Tabla 4–9 Costos de pérdida como porcentaje del valor de reposición del edificio.....	91

Tabla 4–10 Límite inferior, límite superior y valor de máxima pertenencia de los costos de la pérdida (en porcentaje del valor de reposición del edificio), según estado de daño .....	92
Tabla 4–11 Niveles de comportamiento para hospitales .....	94
Tabla 4–12 Tiempo de recuperación .....	95
Tabla 4–13 Parámetros del espectro de capacidad de la tipología .....	97
Tabla 4–14 Parámetros de la curva de fragilidad de la tipología .....	97
Tabla 4–15 Matriz de probabilidad de daño, grado de daño medio, índice de pérdida e índice de funcionalidad (Espitau de Val d’Aran) .....	98
Tabla 4–16 Parámetros del espectro de capacidad de la tipología .....	100
Tabla 4–17 Parámetros de la curva de fragilidad de la tipología .....	100
Tabla 4–18 Matriz de probabilidad de daño, grado de daño medio, índice de pérdida e índice de funcionalidad (CEIP Estudi Alejandro Casona) .....	101
Tabla 5–1 Número y porcentaje de edificios según tipologías estructurales .....	109
Tabla 5–2 Número de edificios y porcentaje según periodos de construcción .....	110
Tabla 5–3 Número de edificios según tipología estructural y periodo de construcción .....	111
Tabla 5–4 Número y porcentaje de edificios según número de plantas .....	112
Tabla 5–5 Número y porcentaje de edificios según irregularidad en planta .....	113
Tabla 5–6 Número y porcentaje de edificios según irregularidad en altura .....	113
Tabla 5–7 Número de edificios según reformas para redistribuir espacios .....	114
Tabla 5–8 Número de edificios con reformas para reparar el edificio .....	114
Tabla 5–9 Número de edificios según fisuras en elementos estructurales .....	115
Tabla 5–10 Número de edificios según tipología estructural y uso .....	115
Tabla 5–11 Edificios según uso y periodo de construcción .....	116
Tabla 5–12 Valor de los edificios y contenidos de la residencia y el hospital .....	118
Tabla 5–13 Número de centros y alumnos según nivel educativo (2006) .....	119
Tabla 5–14 Número de profesores según nivel de educación (2006) .....	119
Tabla 5–15 Número de alumnos según centro educativo y nivel de instrucción .....	119
Tabla 5–16 Número aproximado de oficiales según institución .....	120
Tabla 5–17 Superficie aproximada de los polideportivos inspeccionados .....	121
Tabla 5–18 Referencias empleadas para definir los parámetros de los espectros de capacidad de los edificios .....	121
Tabla 6–1 Número de alumnos según nivel de educación .....	137
Tabla 6–2 Tipos de volumetría de las escuelas de la muestra .....	139
Tabla 6–3 sistemas constructivos industrializados encontrados en centros educativos .....	140
Tabla 6–4 Clasificación de los sistemas industrializados en tipologías HAZUS y RISK UE .....	142
Tabla 6–5 Tipologías estructurales consideradas .....	143

Tabla 6–6 Referencias empleadas para definir los parámetros de los espectros de capacidad de los edificios.....	146
Tabla 6–7 Probabilidades de excedencia de los diferentes estados de daño y costos esperados durante la vida útil .....	155
Tabla 7–1 Numero de hospitales y camas según nivel de atención de los hospitales .....	160
Tabla 7–2 Tipologías estructurales consideradas .....	164
Tabla 7–3 Listado de hospitales con las tipologías estructurales asignadas, nivel de atención y número de camas .....	165
Tabla 7–4 Referencias empleadas para definir los parámetros de los espectros de capacidad de los edificios.....	168
Tabla 7–5 Porcentaje de hospitales y camas según rangos del grado de daño medio Tr 475 años .....	170
Tabla 7–6 Porcentaje de hospitales y camas según rangos del grado de daño medio Tr 975 años .....	170
Tabla 7–7 Número y porcentaje de hospitales según rangos del Índice de pérdida económica.....	171
Tabla 7–8 Número y porcentaje de hospitales según rangos del Índice de funcionalidad .....	172
Tabla 7–9 Resumen de resultados del Grado de daño medio, índice de pérdida económica y del índice de funcionalidad para cada hospital y para cada periodo de retorno .....	174
Tabla 8–1 Valores de pérdida asociados a los puntos del espectro de capacidad bilineal .....	186
Tabla 8–2 Ejemplos de factores de atrapamiento y afectación para edificios según materiales de construcción .....	191
Tabla 8–3 Valores de pérdida asociados a los puntos del espectro de capacidad bilineal .....	193
Tabla 9–1 Referencias usadas para la modelización de la peligrosidad sísmica en cada país .....	204
Tabla 9–2 Rangos de población y porcentajes de centros de educación pública .....	206
Tabla 9–3 Área total y de salones por estudiante .....	207
Tabla 9–4 Ejemplos de costos de reforzamiento de escuelas en Ecuador.....	213
Tabla 9–5 Ejemplos de costos de la intervención estructural de algunos colegios en Bogotá. ....	214
Tabla 9–6 Resumen de resultados del análisis de beneficio-costos por países.....	215
Tabla 9–7 Clasificación de países de acuerdo a la PAE , al índice de desarrollo en educación y a la inversión en educación (%PIB) .....	218
Tabla 9–8 Valores expuestos.....	219
Tabla 10–1 Periodos de duración del rescate de heridos según el número de heridos.....	229
Tabla 10–2 Tiempo límite de tratamiento según nivel de herido .....	231
Tabla 10–3 Número de heridos y parámetros de la función de rescate de los heridos.....	231
Tabla 10–4 Caso I: Parámetros de los hospitales y reparto de los heridos en el hospital .....	231
Tabla 10–5 Caso II: Parámetros de los hospitales y reparto de los heridos en el hospital .....	232
Tabla 10–6 Heridos ingresados al hospital D según su severidad.....	232
Tabla 10–7 Número total de equipos, porcentaje y tasa por 10.000 habitantes según regiones sanitarias.....	238
Tabla 10–8 listas de espera y actividad según regiones sanitarias .....	238

Tabla 10–9 Porcentaje de hospitales según tasa de atención de pacientes .....	239
Tabla 10–10 Respuesta sísmica de la red de hospitales en el escenario.....	241
Tabla 10–11 Resultados de la simulación del escenario según hospitales .....	245
Tabla 10–12 Número de eventos considerados según rangos de magnitud .....	249
Tabla 10–13 Clasificación de los hospitales según el porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el análisis de riesgo y para diferentes periodos de retorno .....	251
Tabla 10–14 Tasa de mortalidad estandarizada, camas y personal sanitario por cada mil habitantes .....	257
Tabla 10–15 Parámetros de la regresión del modelo de producción de salud $y=F(K,L,A)$ .....	258

## Glosario

<i>Amenaza y/o peligrosidad sísmica</i>	Corresponde a la probabilidad de que durante un tiempo $t$ y en una zona $z$ , se iguale o exceda el valor de un parámetro $x$ indicativo del movimiento del suelo.
<i>Comportamiento sísmico</i>	Describe el estado (de daño, de operación) de un elemento (un edificio) después de la acción de un sismo de determinada severidad.
<i>Conjunto difuso</i>	Corresponde a un conjunto que puede contener elementos de forma parcial. Es decir que si $x$ es un elemento y $A$ es un conjunto difuso, la propiedad $x \in A$ puede ser cierta con un grado de verdad. Dicho grado de verdad se expresa a través de funciones de pertenencia. <a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Conjunto_difuso">http://es.wikipedia.org/wiki/Conjunto_difuso</a> [Última consulta 20/11/2012]
<i>Costo de oportunidad</i>	Representa el coste de la inversión de los recursos disponibles, en una oportunidad económica, a costa de la mejor inversión alternativa disponible, o también, el valor de la mejor opción no realizada. Ver: <a href="http://es.wikipedia.org/wiki/Coste_de_oportunidad">http://es.wikipedia.org/wiki/Coste_de_oportunidad</a> [Última consulta 20/11/2012]
<i>Deriva de piso</i>	Corresponde a la diferencia de los desplazamientos laterales totales entre dos niveles consecutivos.
<i>Edificio esencial</i>	<p>Un edificio se considera esencial de acuerdo a las siguientes características:</p> <p>(i) <i>Producción de servicios de atención a la comunidad:</i> implica la necesidad de su reposición en caso de pérdida; esta condición hace referencia a su rol en la sociedad. Son edificios y/o sistemas que producen servicios necesarios para el funcionamiento de las comunidades en situaciones de normalidad; su función no es exclusiva para situaciones de emergencia. Por lo tanto, en las fases de recuperación post desastre, estos edificios y/o sistemas deben rehabilitarse para garantizar un normal funcionamiento en las comunidades.</p> <p>(ii) <i>Potencial de crisis:</i> Este criterio hace referencia a los efectos negativos que tiene la pérdida de su funcionamiento durante eventos desastrosos. En este sentido, su fallo puede agravar las condiciones de una emergencia, dada la reducción de un servicio necesario para la atención de eventos desastrosos. Por otro lado, pueden desencadenar otros eventos peligrosos u ocasionar otras pérdidas debido a su fallo.</p> <p>(iii) <i>El valor y posibilidad de su recuperación:</i> en general, un edificio o un sistema se considera esencial si su costo de reposición es elevado o si es de difícil recuperación/reconstrucción. Esta valoración puede incluir dimensiones económicas, sociales, culturales y ambientales, entre otras.</p>
<i>Matriz de probabilidad de daño</i>	Representan, para un determinado escenario sísmico (descrito por uno o varios parámetros del movimiento del suelo) la probabilidad de que el daño esperado en el elemento sea menor o igual a un determinado estado de daño.
<i>Peak Ground Acceleration - PGA</i>	La aceleración pico del terreno (PGA) es la máxima amplitud de una serie temporal de aceleración. En términos de la respuesta estructural, el PGA representa el valor pico de la aceleración para un sistema de un grado de libertad de rigidez infinita, lo cual equivale a un periodo de vibración natural igual a cero.
<i>Prima actuarialmente justa</i>	En un contrato de seguro, una prima actuarialmente justa corresponde a la prima (al monto que debe pagar la persona que desea asegurarse) cuyo valor es igual al valor esperado de la pérdida. El valor esperado de la pérdida representa el producto entre el valor asegurado (la indemnización pactada) y la probabilidad de pérdida.

<i>Producción de salud</i>	De acuerdo con Auster et al. (1969) la producción de salud se considera como el resultado de los servicios médicos que prestan las instalaciones sanitarias, a través de los cuales se logran efectos en la salud de los habitantes.
<i>Resiliencia</i>	Bruneau et al. (2003), Bruneau y Reinhorn (2007) y Cimellaro et al. (2010) definen la resiliencia como la habilidad de un sistema para reducir las pérdidas potenciales, para absorber dichas pérdidas si estas ocurren y para recuperar su nivel de funcionamiento luego de un evento desastroso.
<i>Riesgo</i>	Corresponde a la probabilidad de excedencia de un determinado valor de pérdida en un elemento expuesto a eventos potencialmente dañinos durante un determinado tiempo <i>t</i> .
<i>Seguridad sísmica</i>	La seguridad sísmica hace referencia al conjunto de estándares de comportamiento requeridos para un elemento ante la ocurrencia de eventos sísmicos de determinada severidad. La evaluación de la seguridad sísmica hace referencia al cálculo del comportamiento del elemento ante un evento de determinada severidad. Al comparar este resultado con los estándares requeridos, es posible determinar si el elemento cumple o no con tales estándares.
<i>Sistema de referencia de pacientes</i>	En la gestión de servicios médicos, el sistema de referencia corresponde al conjunto de procedimientos administrativos y asistenciales por el cual se dirigen usuarios de un establecimiento de salud de menor capacidad a otro de mayor capacidad, para evaluación diagnóstica y/o tratamiento, con el fin de asegurar la continuidad de la prestación de servicios. Ver: “Protocolos de referencia – contrareferencia como una estrategia de gestión de la demanda en red” [En línea]. Disponible en: <a href="http://es.scribd.com/doc/7714095/capitulo4OKbaja">http://es.scribd.com/doc/7714095/capitulo4OKbaja</a> [última consulta: 30/10/2012]
<i>Tasa de mortalidad</i>	Índice empleado para medir el número de habitantes que fallecen en un determinado periodo (por ejemplo, un año) con respecto a un rango de población. Suele expresarse en el número de muertos por cada 1000 o 100000 habitantes. Esta tasa también se conoce como la tasa bruta de mortalidad.
<i>Tasa estandarizada de mortalidad</i>	Corresponde a una estandarización (normalización) de la tasa bruta de mortalidad en la cual se considera una referencia estándar de la composición de la población según edades. Para esto, suele tomarse como referencia la composición de la población (según edades) para un año determinado. De esta manera, la tasa estandarizada se calcula a partir de la tasa de personas que mueren en cada grupo de edad y se normaliza considerando el número de personas en dichos grupos de edad en la población de referencia, así como el total de la población del grupo de referencia.
<i>Vulnerabilidad sísmica</i>	Propensión de un elemento a sufrir daños por la ocurrencia de un evento sísmico al que se encuentra expuesto.



# 1 Introducción

El interés y avance en la gestión de la seguridad sísmica de los edificios y sistemas esenciales ha estado motivado por los daños y colapso de estos edificios durante terremotos, así como por los costos sociales y de oportunidad asociados a su pérdida. A su vez, estos daños han motivado el desarrollo de códigos de construcción, en cuanto a la definición de la seguridad sísmica de nuevas instalaciones, así como de edificios existentes, con el fin de prevenir pérdidas económicas y de funcionalidad. Estos avances han dado soporte para la gestión de programas nacionales y supranacionales enfocados hacia la reducción de la fragilidad de estos edificios.

La gestión de la seguridad de los edificios esenciales está relacionada con el cumplimiento de estándares de comportamiento establecidos en códigos de construcción o reportes técnicos. En el cumplimiento de dichos estándares influyen la evaluación del riesgo y el grado de aversión a las pérdidas potenciales, así como los recursos necesarios para garantizar los niveles de seguridad deseados. Al respecto, es posible que los administradores de la infraestructura deseen altos niveles de seguridad dado el valor de las pérdidas potenciales. Por otro lado, es posible que las inversiones necesarias para alcanzar dicha seguridad sean tan elevadas que impidan que se cumplan dichos estándares, siendo poco factibles.

En este sentido, es relevante que la gestión de la seguridad de los edificios y sistemas esenciales se fundamente en la estimación de daños y pérdidas (económicas, funcionales) y de impactos esperados, considerando diferentes niveles de peligrosidad. De esta manera, es posible valorar apropiadamente la seguridad de estos edificios, evaluar la factibilidad de los programas de reducción de riesgos, y priorizar las inversiones en las instalaciones con mayores pérdidas potenciales.

En este trabajo se adoptan y proponen metodologías para la evaluación de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales, con el fin de valorar los beneficios de la mitigación del riesgo. Para ello, se definen y utilizan índices de pérdida económica y de funcionalidad, entre otros, para evaluar las pérdidas potenciales y, en consecuencia poder establecer prioridades de actuación. A su vez se desarrollan metodologías para la estimación de los efectos asociados a la interrupción de sus servicios durante emergencia, así como para valorar los impactos de los daños luego del desastre. Estas metodologías se aplican a escala local, regional, nacional y supranacional, en la evaluación de dos tipos de edificios considerados de importancia especial, como son los centros educativos y los centros de salud.

## *1.1.1 Seguridad sísmica de edificios y sistemas esenciales*

La evaluación de la seguridad sísmica de los edificios esenciales tiene tres componentes principales: 1) los niveles de peligrosidad o amenaza, 2) el comportamiento requerido de los edificios ante los niveles de peligrosidad y 3) la evaluación del comportamiento esperado de los edificios. Al respecto, el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995), definió la amenaza en términos del periodo de retorno de los eventos. A su vez describió niveles de comportamiento sísmico requeridos en términos de los daños esperados, la funcionalidad de las instalaciones y los peligros sobre la vida de los ocupantes. Estos niveles de comportamiento se especifican según la importancia de las instalaciones y los niveles de peligrosidad.

En lo que respecta a la evaluación, para verificar la seguridad de los edificios, en el documento FEMA 273 (1997) se sugieren procedimientos para evaluar su comportamiento sísmico, en los cuales se compara la capacidad de los edificios con la demanda sísmica asociada a los niveles de amenaza de interés. Siguiendo este enfoque, en el proyecto RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003) se proponen metodologías para evaluar la seguridad y estimar el daño esperado. Estas metodologías han sido aplicadas para la evaluación de escenarios de daños a nivel local (Pitalakis et al. 2006, Lantada et al. 2009, Irizarry et al. 2010) y se adoptan en este trabajo para evaluar la seguridad y estimar los daños esperados en centros educativos y de salud, los cuales son considerados como edificios esenciales.

Además de la verificación de los estándares de comportamiento, resulta de interés identificar otras variables que orienten la toma de decisiones frente a la gestión de la seguridad de los edificios esenciales, considerando las estimaciones de las pérdidas esperadas, y abarcando en lo posible, tanto los efectos directos como los indirectos. Esto permite dimensionar correctamente los costos asociados a la pérdida, o deterioro de un edificio, instalación o servicio.

### *1.1.2 Variables de decisión en la gestión de la seguridad y del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales*

En este trabajo se considera que la estimación de las pérdidas económicas, de la funcionalidad según el daño de los edificios, así como estimaciones de la capacidad de respuesta en situaciones de emergencia y de los impactos luego del desastre, son resultados útiles para la toma de decisiones frente a la seguridad y riesgo sísmico de los edificios esenciales.

Para estimar las pérdidas económicas, en este trabajo se propone un índice para calcular el porcentaje de pérdida (respecto al valor del edificio), a partir de la matriz de probabilidad de daños obtenida para un evento determinado. Por otro lado, se adoptan metodologías para definir curvas de vulnerabilidad en las cuales se relaciona el valor esperado de la pérdida económica y su desviación estándar, con el desplazamiento espectral estimado para el edificio ante un determinado evento sísmico.

Para evaluar la operatividad de las instalaciones durante emergencias, se propone un índice de funcionalidad que relaciona la operatividad de los edificios en términos del daño físico sufrido, siguiendo las indicaciones de los niveles de comportamiento establecidos por el comité VISION 2000 (SEAOC 1995) y en los documentos FEMA 273 (1997) y FEMA 356 (2000).

La vulnerabilidad sísmica de los edificios y sistemas esenciales, entendida en un sentido amplio, incluye tanto la propensión al daño físico de los elementos estructurales y no estructurales, como la capacidad de respuesta del personal y las instituciones. Este enfoque de la vulnerabilidad sistémica que va más allá de la vulnerabilidad estructural es de gran complejidad. Por esta razón, en este trabajo se exploran métodos simplificados de evaluación que incluyen los aspectos relacionados con la fragilidad estructural y no estructural, así como el nivel de organización para la respuesta a emergencias.

En el caso de los hospitales y sistemas de salud, se revisan metodologías para evaluar su respuesta a la crisis dados los daños en la infraestructura. Para este fin, se desarrolla un modelo para estimar el número de heridos ingresados, en espera y no tratados oportunamente en un sistema de hospitales. Dicho análisis se presenta para diferentes periodos de retorno e incluye la estimación de los heridos potenciales que pueden llegar a cada instalación, así como los daños esperados y el grado de funcionalidad de los hospitales una vez ocurrido el terremoto.

Además de la estimación de los daños directos y de la respuesta durante emergencias, es relevante identificar el impacto socioeconómico de los daños. Para el caso de los servicios de salud, se exploran alternativas para estimar la posible reducción en la producción de salud, dados los daños estimados en los hospitales ante diferentes eventos sísmicos. De acuerdo con Auster et al. (1969), la producción de salud se considera como el resultado de los servicios médicos ofrecidos con la infraestructura y recursos hospitalarios disponibles. Así, en el modelo que se propone, la producción de salud se relaciona con indicadores del número de camas, del personal médico y del diagnóstico de pacientes empleando nuevas tecnologías. La salud se mide en términos de la tasa de mortalidad (número de personas fallecidas anualmente por cada mil habitantes). De esta manera, los daños estimados en los hospitales ante un determinado evento son útiles para estimar impactos sobre la salud de la población, ya que corresponden a aumentos en la tasa de mortalidad.

Este conjunto de variables permiten identificar diferentes costos asociados a la degradación o pérdida de los edificios y sistemas esenciales, siendo útiles para priorizar el estudio detallado de las instalaciones y, si es necesario, el desarrollo de acciones y programas orientados a la reducción de la vulnerabilidad.

Adicionalmente, incluir estas variables de decisión en estudios de riesgo, permite desarrollar análisis más completos de los beneficios y costos de las obras de mitigación.

### 1.1.3 Evaluación de riesgo en edificios esenciales y toma de decisiones

Las actividades de mitigación de riesgos y de preparativos de emergencia implican la definición de un nivel de pérdidas aceptables. Escoger unos niveles de seguridad demasiado altos (por ejemplo, una exigencia de daños mínimos para eventos de periodo de retorno de 2500 años) puede resultar en inversiones elevadas, no factibles; escoger niveles de seguridad demasiado bajos puede resultar en pérdidas e impactos excesivos, no aceptables. En cualquier caso, dado que no se conoce con certeza la acción sísmica, ni la respuesta de la infraestructura ante tal acción (Jablonowsk 2005), es necesario resaltar que las decisiones frente al riesgo deben realizarse bajo incertidumbre.

De esta manera, las decisiones en mitigación de riesgos y preparativos para emergencia deben tomarse entendiendo los criterios y limitaciones de las evaluaciones. Para esto, conviene buscar alternativas en las cuales se determine una seguridad objetivo, considerando un conjunto de escenarios de pérdidas posibles, con el fin de formular soluciones con mayores posibilidades de éxito. Esto es, pasar de un proceso de decisión-acción basado en un solo valor de referencia (como el daño esperado para eventos de periodo de retorno específico), a un proceso de administración de riesgos, en el cual sea posible ajustar los niveles de pérdida aceptable.

Este trabajo se enmarca en el proceso de optimizar la evaluación de pérdidas esperadas (en sentido amplio) para dar soporte a la toma de decisiones frente a la seguridad de los edificios esenciales. Así, se exploran metodologías para estimar las pérdidas e impactos esperados, considerando todas las intensidades posibles del movimiento del suelo a los cuales se encuentran potencialmente expuestos los edificios. Al realizar este análisis considerando diferentes hipótesis sobre la vulnerabilidad de la infraestructura, y empleando valores aproximados de los costos de tales intervenciones, es posible obtener relaciones de beneficio costo que señalen la idoneidad y bondades de tales inversiones.

## 1.2 Objetivos y alcance

### 1.2.1 Objetivos

El objetivo de esta tesis es desarrollar y aplicar metodologías avanzadas para la evaluación de la seguridad y para la priorización de la mitigación del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Estas metodologías se aplican a edificios de importancia especial en la Comarca de Val d'Aran (España), a un conjunto de centros educativos y hospitales públicos de Cataluña. A nivel supranacional, estos procedimientos se aplican para evaluar en forma aproximada el riesgo de los centros educativos de países de América Latina. Por un lado, se adoptan procedimientos para calificar el comportamiento sísmico de edificios. Por otro, se presentan metodologías para la estimación de las pérdidas probables considerando un conjunto de eventos sísmicos acordes con la peligrosidad sísmica de la zona de análisis. Estos resultados son empleados para la evaluación de relaciones de beneficio-costos que conlleven actuaciones específicas orientadas a la reducción de la vulnerabilidad sísmica de las instalaciones.

### *Seguridad sísmica de edificios esenciales*

En cuanto a la evaluación de la seguridad, los objetivos específicos de la tesis son los siguientes:

- Diseñar formularios y guías para la inspección de la vulnerabilidad estructural de edificios esenciales.
- Realizar una inspección visual rápida de los edificios de importancia especial de la Comarca de Val d'Aran (España) y de un conjunto de centros educativos de Cataluña (España); clasificarlos en tipologías estructurales y asociarles los espectros de capacidad correspondientes.

- Comparar las formas espectrales del Eurocódigo 8 con los espectros de amenaza uniforme obtenidos en un estudio de peligrosidad sísmica elaborado para Cataluña, para periodos de retorno de 475 y 975 años. Identificar alternativas para simplificar el cálculo de la acción sísmica en roca firme.
- Identificar el tipo de suelo correspondiente a cada una de las instalaciones inspeccionadas, utilizando un estudio de mesozonación sísmica elaborado para Cataluña. Evaluar la acción sísmica en superficie empleando las formas espectrales especificadas para cada tipo de suelo.
- Evaluar el comportamiento sísmico de los edificios empleando el método simplificado de espectros de capacidad, considerando los espectros de capacidad de las tipologías asociadas y los espectros de demanda correspondientes a la ubicación de los edificios.
- Estimar la probabilidad de excedencia de los estados de daño, la matriz de probabilidad de daño y el grado de daño medio para eventos de periodos de retorno de 475 y 975 años.
- Desarrollar índices de pérdida económica, de funcionalidad y del tiempo de recuperación considerando los resultados de las matrices de probabilidad de daño y del grado de daño medio.
- Desarrollar un nuevo índice de Vulnerabilidad de Hospitales que incluya el daño estructural, así como simplificaciones al daño en elementos no estructurales y calificaciones de la capacidad de respuesta ante eventos desastrosos. Aplicar dicho índice a los hospitales públicos de Cataluña.

#### *Riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales*

En este trabajo se presenta una metodología para la evaluación del riesgo sísmico, así como su aplicación en edificios esenciales. Por un lado, se desarrolla un caso de estudio para estimar en forma aproximada las pérdidas probables en los centros educativos públicos en países de América Latina. Por otro lado, se presenta un caso de estudio para la evaluación del riesgo sísmico de un conjunto de hospitales públicos de Cataluña. Para el primer caso, los objetivos específicos son los siguientes:

- Definir curvas de vulnerabilidad para las tipologías estructurales representativas de los centros educativos.
- Generar un conjunto de escenarios sísmicos acordes con la peligrosidad de cada país incluido en el estudio.
- Evaluar la curva de excedencia de pérdidas económicas y la pérdida anual esperada del área construida de centros educativos públicos de países de América Latina, considerando su estado actual, así como una hipótesis de reforzamiento estructural.
- Adoptar una metodología para el análisis de beneficio-costos de la mitigación del riesgo sísmico de los centros educativos de países en América Latina y el Caribe

Para el caso de estudio del riesgo sísmico de los hospitales de Cataluña, los objetivos específicos son los siguientes:

- Definir curvas de vulnerabilidad para las tipologías estructurales representativas de los hospitales públicos de Cataluña.
- Generar un conjunto de escenarios sísmicos acordes con la peligrosidad de Cataluña.
- Desarrollar una metodología para evaluar la capacidad de respuesta del sistema de hospitales durante eventos sísmicos.
- Estimar la respuesta del sistema para el conjunto de escenarios sísmicos generados y calcular la probabilidad anual de excedencia.

- Desarrollar y aplicar una metodología para la evaluación del impacto socioeconómico de los daños en los hospitales considerando eventos de diferente periodo de retorno.

### 1.2.2 Alcance

*Uso de los resultados:* los procedimientos empleados en este trabajo corresponden a evaluaciones preliminares de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Sus resultados se consideran útiles para identificar órdenes de magnitud de las pérdidas esperadas, para orientar planes de reducción de la vulnerabilidad, así como para priorizar los edificios y/o las regiones que puedan requerir el desarrollo de estudios más detallados.

*Simplificaciones en la descripción de los edificios:* en este trabajo los edificios se clasifican en tipologías estructurales simplificadas. En la clasificación, además del tipo de construcción, se tiene en cuenta la edad y la altura. Al respecto, Grossi (2005) señala que el uso de información parcial sobre las características estructurales puede resultar en una estimación imprecisa del daño. Así, debe considerarse que los resultados de este tipo de análisis son útiles para dimensionar las pérdidas potenciales. A pesar de que se obtengan resultados individuales, debe considerarse que estos valores son válidos en el contexto del análisis y que por lo tanto, son útiles para realizar comparaciones dentro del conjunto de edificios analizados.

*Vulnerabilidad y funcionalidad:* la estimación de daños, pérdidas potenciales y de la funcionalidad de los edificios se asocia en la mayoría de los casos al daño físico de elementos estructurales. El desarrollo y aplicación de curvas de fragilidad /vulnerabilidad de elementos no estructurales queda fuera del alcance del estudio. Así mismo, la estimación de daños en líneas vitales y sus efectos en la funcionalidad de los edificios queda también fuera del alcance del estudio. En el Índice de Vulnerabilidad de Hospitales se presentan simplificaciones y criterios para calificar en forma cualitativa estos aspectos.

*Evaluación de daños inducidos:* La evaluación de pérdidas potenciales asociadas a explosiones, derrames de sustancias peligrosas, o eventos similares asociados a la falla de los edificios y sistemas esenciales queda fuera del alcance de este estudio.

## 1.3 Contenido de la memoria

Este trabajo se puede dividir en cuatro secciones (ver Figura 1-1). En la primera se presenta el problema asociado a las pérdidas en los edificios y sistemas esenciales y se discuten los enfoques para definir la seguridad y tomar decisiones frente al riesgo sísmico de los edificios y sistemas esenciales (Capítulos 1 a 3). En la segunda sección se presentan y aplican metodologías para la evaluación de la seguridad de edificios esenciales, y se usan índices para describir la pérdida económica, la funcionalidad y los tiempos de recuperación (Capítulos 4 a 7). En la tercera sección se presentan y aplican metodologías para evaluar el riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales, y se usan relaciones de beneficio-costos de la reducción de la vulnerabilidad (Capítulos 8 a 10). Por último, se presentan las conclusiones y trabajos futuros (Capítulo 11). A continuación se describen, con mayor detalle el contenido de los diferentes capítulos.

En el Capítulo 2 se presentan los efectos de grandes terremotos ocurridos entre los años 2002 y 2011, resaltando los efectos en centros educativos y de salud, con el fin de identificar los tipos de daños y sus efectos. A la vez, se presentan planes nacionales y supranacionales enfocados a la reducción de la vulnerabilidad de este tipo de edificios, señalando en forma general los procedimientos empleados para evaluar la seguridad sísmica de las instalaciones.

En el Capítulo 3 se presentan diferentes enfoques para la gestión de la seguridad de los edificios esenciales. Por un lado, se presentan los criterios establecidos en normas de construcción sismoresistente para definir la seguridad de estas instalaciones, y se discute el alcance y limitaciones del diseño basado en comportamiento y la clasificación de edificios en niveles de importancia. Por otro lado, se describen

marcos conceptuales para la gestión del riesgo de los edificios esenciales, con el fin de identificar niveles de riesgo aceptable y evaluar los beneficios y costos de la reducción de las pérdidas esperadas. A su vez, se discuten el alcance y limitaciones de las estimaciones de riesgo.

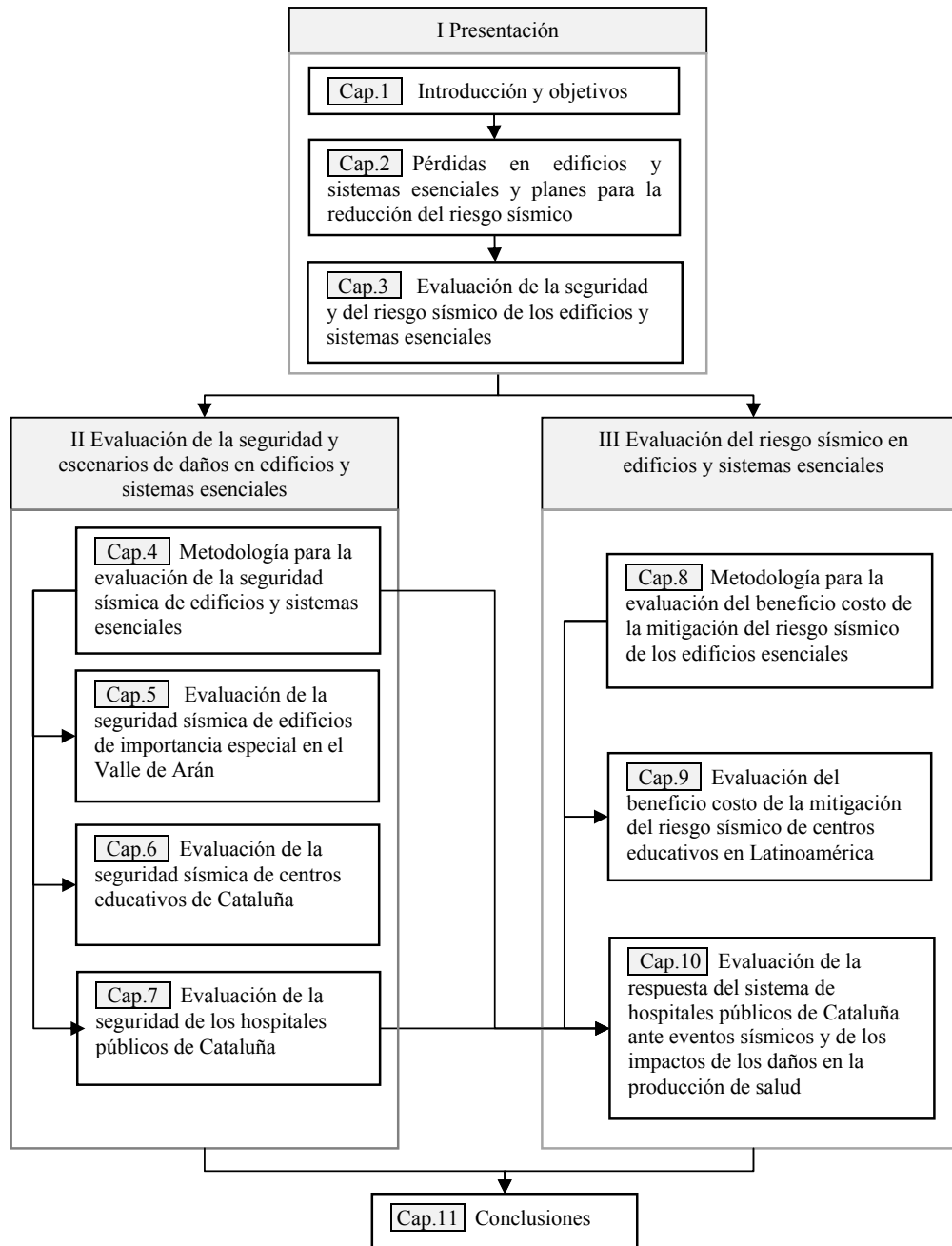


Figura 1-1 Esquema de la memoria

En el Capítulo 4 se presentan procedimientos para la evaluación de la seguridad de los edificios esenciales, adoptando un método simplificado de espectros de capacidad. Respecto a la descripción de la acción sísmica, se comparan las formas espectrales sugeridas en códigos de construcción sismoresistente con los espectros de amenaza uniforme obtenidos para Cataluña (España). A partir de las estimaciones de daño, se proponen nuevos índices para estimar las pérdidas económicas, la funcionalidad de las instalaciones y los periodos esperados de recuperación.

Estos procedimientos se aplican para evaluar la seguridad de los edificios esenciales de la Comarca de Val d'Aran (Capítulo 5), de un conjunto de centros educativos de Cataluña (España) (Capítulo 6) y de los hospitales públicos de Cataluña (Capítulo 7).

En el Capítulo 8 se presentan metodologías para la estimación de riesgos, siguiendo un modelo de catástrofe. Se describen los procedimientos para la generación de escenarios sísmicos acordes a la peligrosidad de la zona de estudio, los pasos para definir curvas de vulnerabilidad de los edificios, así como para evaluar la curva de excedencia de pérdidas y la pérdida anual esperada. Bajo este enfoque, se presenta una metodología para la evaluación de relaciones de beneficio-costos. En el Capítulo 9 se presenta la aplicación de procedimientos para evaluar en forma aproximada la viabilidad económica de la reducción de la vulnerabilidad estructural de los centros educativos públicos en países de América Latina.

En el capítulo 10 se desarrollan metodologías para evaluar la respuesta de un sistema de hospitales ante eventos sísmicos, así como los impactos socioeconómicos de los desastres. Estos procedimientos se aplican al sistema de hospitales públicos de Cataluña, considerando eventos de periodo de retorno de 475 y 975 años, para los cuales se evalúan los daños y pérdidas de acuerdo a las metodologías sugeridas en el Capítulo 4. A su vez, se evalúan la probabilidad anual de excedencia de los valores de la respuesta del sistema de hospitales adoptando las metodologías descritas en el Capítulo 8.

Por último, en el Capítulo 11 se presentan las conclusiones de este trabajo, así como orientaciones para trabajos futuros. En los documentos anexos se presentan los siguientes aspectos: (i) formularios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales; (ii) un listado de los parámetros de los espectros de capacidad y curvas de vulnerabilidad empleadas en el estudio; (iii) los resultados de la inspección de daños en centros educativos y hospitales afectados durante el terremoto del 11 de mayo del 2011 en Lorca, España; (iv) una descripción de la evolución de la arquitectura escolar en Cataluña en el siglo XX; (v) la base de datos empleada para el análisis de la seguridad y riesgo sísmico de un conjunto de hospitales públicos de Cataluña; (vi) las metodologías empleadas para la evaluación de un Índice de Vulnerabilidad de Hospitales; (vii) los formularios y resultados de la evaluación de la seguridad de edificios de importancia especial de la comarca de Val d'Aran y (viii) los formularios y resultados de la evaluación de la seguridad de un conjunto de centros educativos de Cataluña.





## **2 Revisión de pérdidas en edificios y sistemas esenciales y de planes para la reducción del riesgo**

### **2.1 Introducción**

La seguridad de edificios esenciales ha sido el objetivo de campañas promovidas por la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (EIRD) y de diferentes programas a nivel regional y local para reducir la vulnerabilidad estructural y no estructural, así como para incrementar la capacidad de respuesta de la sociedad. Estas campañas han resultado en gran parte como una respuesta a las pérdidas ocurridas durante desastres sísmicos.

En este Capítulo se presenta un resumen de las pérdidas ocurridas en hospitales y escuelas por este tipo de desastres en el periodo 2002-2010, señalando para cada evento, los daños a la infraestructura, a la vivienda, a las personas y las pérdidas económicas. De acuerdo a la información disponible, se describe el comportamiento de los edificios durante el evento y las consideraciones de diseño sismoresistente en las zonas afectadas. Ya que para algunos desastres se ha encontrado información más detallada sobre la tipología de edificios, los daños estructurales y funcionales, se presentan 3 casos más detallados sobre la evaluación de pérdidas en instalaciones de salud y educativas. Posteriormente, se presentan algunas iniciativas orientadas hacia el conocimiento y la reducción del riesgo en hospitales y escuelas.

Estos contenidos se complementan con las definiciones que se han propuesto en algunos códigos de construcción sismoresistente para los edificios esenciales. Así mismo, se presentan series temporales de desastres y de población con el fin de resaltar la relación que existe entre la construcción de infraestructura sin provisiones sismoresistentes y la ocurrencia de desastres.

### **2.2 Edificios esenciales**

El problema de la seguridad sísmica ha sido gradualmente conocido y enfrentado a medida que han ocurrido eventos desastrosos, realizándose así progresivas mejoras en los estudios de la peligrosidad sísmica, en los códigos de construcción sismoresistente, en los métodos para evaluar la vulnerabilidad de las infraestructuras así como en el desarrollo de alternativas para reducirla. Si bien cada país ha realizado avances de acuerdo a su contexto, los códigos sismoresistentes, por lo general, tienen como principal objetivo proveer estándares mínimos de seguridad para preservar la vida, la salud, la propiedad y el bienestar y riqueza pública mediante el control y regulación del diseño y construcción de los edificios, de la calidad de los materiales empleados, del uso de la infraestructura, su ubicación y mantenimiento (Holmes 2009).

En el caso de los hospitales, centros educativos, edificios de gobierno y protección civil, dado su valor añadido, así como sus costos de reposición y/o los servicios que ofrecen durante situaciones de emergencia, los códigos de construcción han definido mayores niveles de seguridad de este tipo de edificios, considerándolos como esenciales y/o de importancia especial.

El Eurocódigo 8 (EN-1998-1 2004) define los edificios esenciales en términos de los valores económicos de su reposición, las consecuencias asociadas a su colapso y su importancia para el desarrollo de actividades de protección civil durante la atención de emergencias. Así mismo, La Norma de Construcción Sismoresistente Española NCSE-02 (2002) considera los edificios esenciales como aquellos cuya destrucción por el terremoto puedan interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos. En esta categoría se incluyen hospitales, edificios e instalaciones de operación de líneas vitales, organismos para la respuesta a emergencias, monumentos históricos y edificios de almacenamiento de sustancias peligrosas. Curiosamente no se citan explícitamente las escuelas si bien,

atendiendo estrictamente a la definición de edificio de importancia especial como aquel cuya destrucción o inutilización puede interrumpir un servicio imprescindible, permitiría considerar las escuelas como edificaciones de importancia especial.

De manera similar, en Venezuela, la Norma Venezolana Covenin 1756-1 (2001) clasifica los edificios según grupos de uso. Al grupo A pertenecen aquellos edificios que albergan instalaciones esenciales, de funcionamiento vital en condiciones de emergencia o cuya falla pueda dar lugar a cuantiosas pérdidas humanas o económicas.

En Colombia, la Norma Sismo Resistente NSR-10 (2010) define los edificios indispensables como aquellos en los que se presta atención a la comunidad, que deben funcionar durante y después de un sismo y cuya operación no puede ser trasladada rápidamente a un lugar alterno. Adicionalmente considera otro tipo de estructuras, denominadas “de ocupación especial” y que están asociadas a la concentración de personas en un mismo recinto.

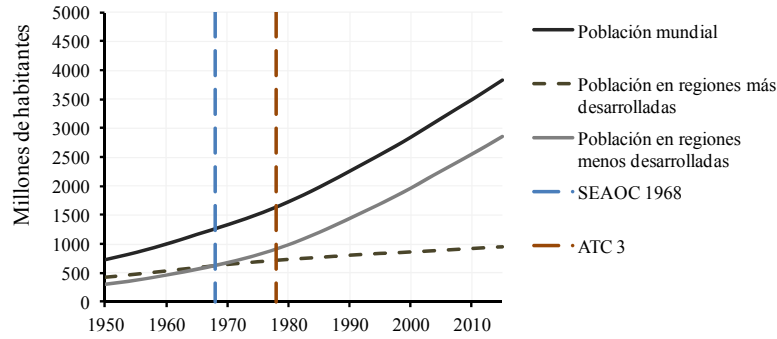
Igualmente, en Guatemala, Las Normas Estructurales de Diseño Recomendadas para Guatemala AGIES NR-1:2000 (2002) establecen la categoría de “obras importantes” en la que se incluyen aquellas que albergan o pueden afectar un gran número de personas, en donde los ocupantes están restringidos a desplazarse, las que prestan servicios importantes pero no esenciales para responder ante desastres, así como aquellas que albergan valores culturales reconocidos o equipo de alto costo.

### **2.3 Revisión de desastres sísmicos**

En la Figura 2-1 se presenta la población urbana mundial y por regiones de desarrollo económico en el periodo 1950-2010, según las estimaciones de Naciones Unidas (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2010). Así mismo, se señalan las fechas en las que se desarrollaron documentos técnicos relevantes para el diseño sismoresistente como el del comité SEAOC (1968), el ATC 3-06 (1978) y el ATC-40 (1996). De esta gráfica se observa que desde 1950 se ha presentado un crecimiento acelerado de la población, llegando a ser más de tres veces en el año 2010 y que, en mayor medida, se ha producido en regiones en vía de desarrollo.

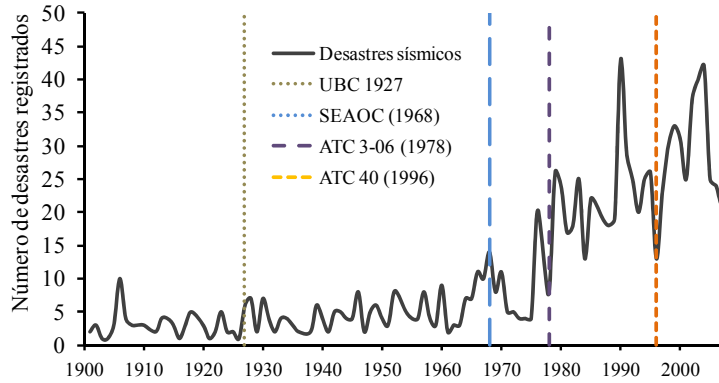
El crecimiento de la población urbana implica la construcción de infraestructuras y de edificios para cubrir las necesidades de vivienda, transporte, comunicación, salud, educación y dar apoyo a actividades comerciales, entre otras. No obstante, las consideraciones sismoresistentes en el diseño de las infraestructuras no han sido contemporáneas al crecimiento de los bienes expuestos. Así, el aumento de la infraestructura sin previsiones sísmicas ha propiciado que el número de desastres ocasionados por terremotos también haya crecido. La Figura 2-2 presenta el número de desastres en los cuales se han registrado algún tipo de pérdida entre 1900 y 2008 y sobre esta gráfica también se presentan las fechas de aparición de los códigos de construcción atrás mencionados incluyendo al Uniform Building Code en 1927.

En la Tabla 2-1 y en la Figura 2-3 se presentan los efectos (muertos y pérdidas económicas) de tales eventos. Si bien es cierto que en los últimos años se han mejorado los medios de información y que es más fácil recopilar información sobre desastres, de la comparación de estas gráficas se evidencia que en proporciones similares a las que ha crecido la población, bajo condiciones de vulnerabilidad ante la amenaza sísmica, han ocurrido mayores desastres por terremotos.



**Figura 2-1 Población mundial y previsiones sísmicas relevantes**

Fuente United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2010)



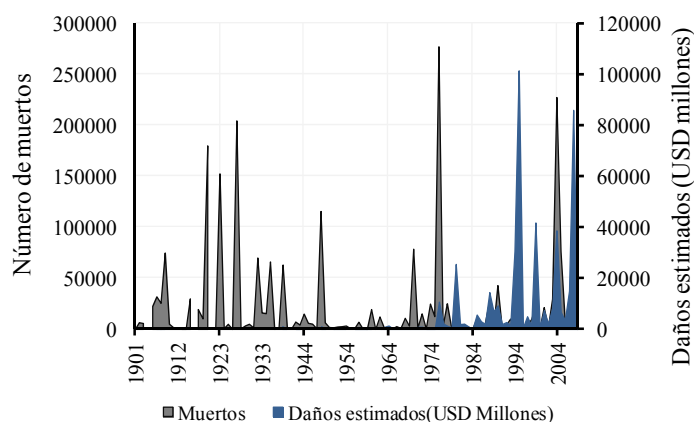
**Figura 2-2 Número de desastres registrados que han tenido efectos (daños) por terremotos y previsiones sismoresistentes relevantes**

Fuente EM-DAT: <http://www.emdat.be/disaster-list>

**Tabla 2-1 Principales terremotos catastróficos entre 1900 y 2009**

Fecha	País	Muertos	Pérdidas económicas (Millones USD)
28/12/1908	Italia	75000	116
16/12/1920	China	180000	Sin datos
01/09/1923	Japón	143000	600
22/05/1927	China	200000	Sin datos
26/12/1932	China	70000	Sin datos
31/05/1935	Pakistán	60000	Sin datos
05/10/1948	Unión soviética	110000	25
31/05/1970	Perú	66794	530
27/07/1976	China	242000	5600
04/02/1976	Guatemala	23000	1000
17/01/1994	Estados Unidos	60	30000
17/01/1995	Japón	5297	100000
17/08/1999	Turquía	17127	20000
26/12/2004	Indonesia	165708	4451
12/05/2008	China	87476	85000

Fuente EM-DAT: <http://www.emdat.be/disaster-list>


**Figura 2-3 Número de muertos y daños estimados en terremotos**

Fuente EM-DAT: <http://www.emdat.be/disaster-list>

En la Tabla 2-2 se presentan el número de terremotos localizados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por su sigla en inglés) en el periodo 2000-2010 según rangos de magnitud. A su vez, en la Tabla 2-3 se presenta el promedio anual de eventos según rangos de magnitud. De acuerdo a estas observaciones, anualmente ocurren 15 eventos de magnitud entre 7 y 7.9, 134 entre 6 y 6.9. El mejoramiento de las redes de sismógrafos ha permitido que cada vez sea más posible identificar terremotos. No obstante, el número de terremotos de magnitud mayor a 6 se ha mantenido relativamente constante<sup>1</sup>. Por otro lado, la Figura 2-4 presenta el número de desastres sísmicos registrados con algún valor de daño y los eventos con magnitudes mayores a 6.5; en la cual se puede apreciar alguna coincidencia.

**Tabla 2-2 Número de terremotos entre 2000-2010 localizados por el servicio geológico de Estados Unidos**

Magnitud	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
8.0 a 9.9	1	1	0	1	2	1	2	4	0	1	1
7.0 a 7.9	14	15	13	14	14	10	9	14	12	16	23
6.0 a 6.9	146	121	127	140	141	140	142	178	168	144	151
5.0 a 5.9	1344	1224	1201	1203	1515	1693	1712	2074	1768	1896	2227
4.0 a 4.9	8008	7991	8541	8462	10888	13917	12838	12078	12291	6805	10154
3.0 a 3.9	4827	6266	7068	7624	7932	9191	9990	9889	11735	2905	4337
2.0 a 2.9	3765	4164	6419	7727	6316	4636	4027	3597	3860	3014	4623
1.0 a 1.9	1026	944	1137	2506	1344	26	18	42	21	26	39
0.1 a 0.9	5	1	10	134	103	0	2	2	0	1	0
Sin magnitud	3120	2807	2938	3608	2939	864	828	1807	1922	17	24
<b>Total</b>	<b>22256</b>	<b>23534</b>	<b>27454</b>	<b>31419</b>	<b>31194</b>	<b>30478</b>	<b>29568</b>	<b>29685</b>	<b>31777</b>	<b>14825</b>	<b>21579</b>
Muertos estimados	231	21357	1685	33819	228802	88003	6605	712	88011	1790	320120

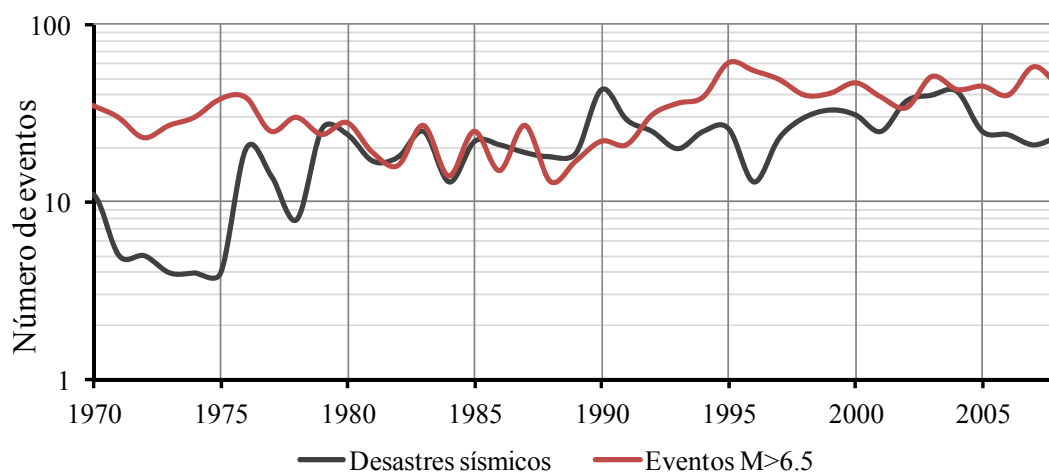
Fuente: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/eqstats.php> [Último acceso 19/10/2012]

<sup>1</sup> Ver: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/eqstats.php> [Último acceso 19/10/2012]

**Tabla 2-3 Promedio anual de eventos según rangos de magnitud**

Magnitud	Promedio anual
Mayor que 8	1 <sup>2</sup>
7 - 7.9	15 <sup>3</sup>
6 - 6.9	134 <sup>2</sup>
5 - 5.9	1319 <sup>2</sup>
4 - 4.9	13000
3 - 3.9	130000
2 - 2.9	1300000

Fuente: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/eqstats.php> [Último acceso 19/10/2012]



**Figura 2-4 Desastres sísmicos y eventos de magnitud>6.5**

Fuentes: EM-DAT y Advanced National Seismic System (ANSS)

## 2.4 Daños observados en hospitales y escuelas

Safina (2003) presenta un resumen de las pérdidas en hospitales y escuelas durante el periodo 1960-2001 y que sirven de referencia para justificar la necesidad de la protección de este tipo de infraestructuras (ver Tabla 2-4)

**Tabla 2-4 Resumen de daños en hospitales y escuelas por terremotos entre 1960 y 2001**

Fecha	Región	Magnitud	Daños en edificios y sistemas esenciales
22/05/1960	Chile-Valdivia	8.4	Daños graves en el <i>Hospital Traumatológico</i> y el <i>Hospital de Valdivia</i>
28/03/1964	Estados Unidos - Alaska	7.9	Colapso del <i>Hospital Elmendorf</i> . Interrupción de los servicios de agua, gas, electricidad y teléfono
31/05/1970	Perú-	7.7	Casi todos los edificios escolares de la población de Casma colapsaron. Se presentaron daños en los muros de mampostería y en la estructura de un centro de salud construido recientemente y aún no ocupado; los equipos médicos que aún no habían sido anclados resultaron averiados

<sup>2</sup> Basado en observaciones desde 1900

<sup>3</sup> Basado en observaciones desde 1990

Fecha	Región	Magnitud	Daños en edificios y sistemas esenciales
09/02/1971	California, Estados Unidos	6.8	Colapso del <i>Olive View Hospital</i> . El <i>Holy Cross Hospital</i> sufrió severos daños estructurales y tuvo que ser demolido. El colapso de una de las alas del <i>Veterans Administration Hospital</i> provocó la muerte de 49 pacientes. También colapsó el <i>Sylmar Hospital</i> de reciente construcción. Graves daños sufrió el <i>Santa Cruz Hospital</i>
23/12/1972	Managua, Nicaragua	6.5	El <i>Hospital General</i> fue severamente dañado; todos los pilares del primer piso fallaron. Este fue evacuado y luego demolido. Muchos planteles educativos fueron seriamente dañados e incluso algunos colapsaron
1976	Guatemala	7.5	Un total de cuatro hospitales resultaron afectados, de los cuales dos debieron ser demolidos
05/05/1976	Italia - Friuli	6.2	El <i>Hospital de Gemona</i> , un edificio viejo de mampostería de tres niveles sin previsiones sísmicas sufrió una falla parcial de su techo de madera y daños en los muros de carga. Asimismo, un hospital nuevo de 10 niveles de hormigón reforzado sin previsiones sísmicas, sufrió severos daños y debió ser demolido
23/11/1980	Italia - Irpina	6.8	Colapso completo del <i>Hospital de San Angelo dei Lombardi</i> , un edificio nuevo de hormigón armado de 7 niveles diseñado con consideraciones sísmicas
18/05/1980	Venezuela – San Antonio del Táchira	Sin dato	Agrietamiento en los muros de mampostería del <i>Centro Clínico</i> (de reciente construcción) y del <i>Hospital Central de San Cristóbal</i> . También se observó este tipo de daños en el <i>Hospital de San Antonio</i> y en el <i>Hospital del Instituto Colombiano del Seguro Social en Cúcuta</i>
1983	Colombia - Popayán	5.5	Reducción de la capacidad de funcionamiento del <i>Hospital Universitario San José</i> debido a los daños estructurales y no estructurales
1985	Mendoza Argentina	6.2	Varias instalaciones de la salud fueron afectadas, una de las cuales fue desalojada y otras dos fueron posteriormente demolidas. El total de camas disponibles fue reducido en más de un 10% a consecuencia del terremoto
03/03/1985	Chile	7.8	Fallas estructurales del <i>Hospital de San Antonio</i> , que presentó un fuerte agrietamiento en las columnas del primer piso. Importante daño en los <i>Hospitales de Melipilla, Rengo, Enrique Deformes, Psiquiátrico, las Residencias Médicas y Maternidad</i>
19/11/1985	Ciudad de México, México	8.1	Colapsaron 5 instalaciones médico-asistenciales y otras 22 sufrieron daños mayores que causaron la muerte a más de 700 personas. Al menos 11 instalaciones de la salud tuvieron que ser evacuadas
1986	San Salvador, El Salvador	5.4	Varias instalaciones hospitalarias sufrieron daño o fueron afectadas, de las cuales 10 fueron desalojadas; se perdieron más de 2000 camas para la atención de la emergencia sísmica. El <i>Hospital Bloom</i> se perdió totalmente
11/06/1986	Pilar, Venezuela	5.9	Daños en la tabiquería de escuelas, así como en el <i>Hospital Central de Caripano</i> el cual ya había sufrido daños no estructurales en sismos pasados
21/08/1988	Bihar-Nepal, India	Sin dato	Daños severos en el <i>Medical College Old Hospital</i> y el <i>Surgical Ward-Medical College Hospital, en Darbhanga</i> . Este último permaneció en servicio por ser el principal hospital para la atención de emergencias. <i>The L. R. Girls High School</i> fue severamente dañado y posteriormente evacuado.
07/12/1988	Armenia, USSR	6.9	En la ciudad de <i>Spitak</i> todas las escuelas, hospitales y servicios públicos fueron severamente afectados
17/10/1989	Loma Prieta, Estados Unidos	7.1	<i>The Palo Alto Medical Center</i> sufrió significativos daños estructurales y posteriormente fue sustituido por un edificio nuevo
1990	Negras, Costa Rica	Sin dato	<i>El Hospital San Rafael</i> sufrió fallos graves requiriendo su evacuación
14/07/1990	Eastern Kazakh	Sin dato	Un hospital de cuatro niveles fue severamente dañado. Cuatro escuelas presentaron diferentes niveles de daños, de las cuales tres fueron posteriormente reparadas y reforzadas y una demolida

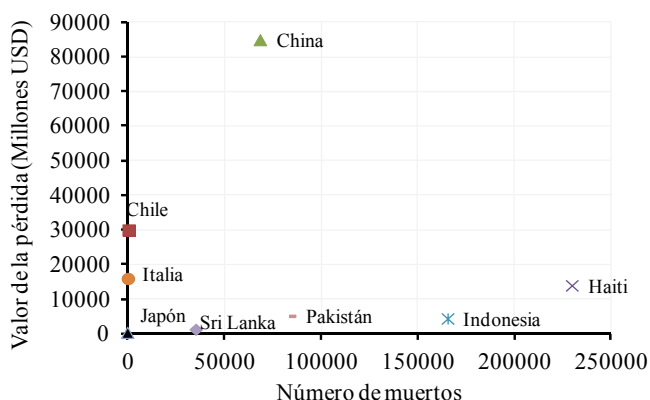
Fecha	Región	Magnitud	Daños en edificios y sistemas esenciales
16/07/1990	Luzon, Islas Filipinas	7.8	Daños severos en escuelas y en otras instalaciones educacionales y sanitarias Daños considerables en el hospital <i>the Barrington Medical Building</i> , evidenciando fuerte agrietamiento de corte en columnas, por lo que fue necesario evacuarlo y posteriormente demolerlo. <i>The Indian Hills Medical Center</i> sufrió agrietamiento en sus muros y, aunque en la primera evaluación rápida fue declarado como inseguro, permaneció operativo al determinarse después de una pronta y exhaustiva inspección que los daños no eran significativos como para cerrar la instalación. <i>The St. John Hospital en Santa Mónica</i> fue evacuado y cerrado. En <i>Los Angeles</i> y en las cercanías del epicentro, varios hospitales fueron severamente dañados por sus bajos requerimientos de diseño y/o insuficiente refuerzo. De hecho, la mayoría de estos hospitales fueron puestos fuera de servicio debido a la cantidad de daños en componentes no estructurales y daños en el sistema de rociadores de agua contra incendio. El reconstruido <i>Olive View Hospital</i> resistió sin serios daños estructurales aunque su contenido fue severamente dañado. <i>The Holy Cross Medical Center, the Granada Hills Community Hospital y the Northridge Hospital Medical Center</i> , tuvieron que ser evacuados.
17/01/1994	Northridge, Estados Unidos	Sin dato	Una de las alas del <i>Hospital de Kobe</i> colapsó. Una escuela de hormigón armado de cuatro niveles, ubicada en el área epicentral de Rokkomichi no sufrió daños y fue utilizada como un centro de refugio durante las semanas siguientes al sismo El colapso de dos unidades educacionales de la población de <i>Cariaco</i> provocó la muerte de muchos de sus estudiantes. Ocurrieron daños no estructurales en diversos dispensarios médicos así como en el <i>Hospital Antonio Patricio de Alcalá</i> , también conocido como el <i>Hospital Central de Cumaná</i> , el más importante complejo sanitario de la región noreste de Venezuela. Este hospital fue desalojado aunque sólo sufrió daños menores no estructurales; la evacuación de los pacientes fue traumática y no pudo atender víctimas del sismo. El colapso funcional se extendió hasta por dos semanas Una sucesión de al menos 5 eventos con magnitudes similares al evento principal, provocaron importantes daños estructurales y no estructurales en varios hospitales de la región afectada. El más afectado fue el <i>Hospital de Assisi</i> que mostró daños en las columnas, con agrietamiento y colapso de muros que impidió el funcionamiento del mismo. Otros como el <i>Hospital de Trevi, Tria, Foligno y Camerino</i> sufrieron niveles de daño que limitaron su funcionalidad. Finalmente <i>los Hospitales de Gualdo Tadino, Gubbio, Montefalco y Spello</i> , sufrieron daños menores que les permitió mantener sus funciones
17/01/1995	Kobe, Japón	7.2	Daños severos en la <i>Escuela Santa Teresa de Jesús</i> . Colapso de los <i>Hospitales de Circasia y Córdoba</i> . El <i>Hospital de Calarcá</i> sufrió un colapso parcial
09/07/1997	Cariaco Venezuela	6.9	Una escuela de tres niveles en Thrace Macedonis perdió el primer nivel. Afortunadamente, no se encontraban alumnos en ese momento en las instalaciones El <i>Hospital de Veteranos</i> en Puli sufrió significativos daños tanto estructurales como no estructurales, a pesar de ser el edificio más nuevo del centro médico
1997	Umbria-Marche, Italia	5.8	Se reportaron fallas en las conexiones de una edificación prefabricada de la <i>escuela primaria de Kukma en Bhuj</i> . La limitada capacidad de atención médica fue cubierta posteriormente por unidades médicas móviles aportados por la ayuda internacional
25/01/1999	Armenia, Colombia	6	
07/09/1999	Atenas, Grecia	7,4	
21/09/1999	Chi-Chi, Taiwan	7.6	
26/01/2001	India	Sin dato	

Fecha	Región	Magnitud	Daños en edificios y sistemas esenciales
13/01/2001 13/02/2001	El Salvador	7.6 y 6.6	Como consecuencia del primer evento, fueron afectadas 113 instalaciones de salud, entre los que se encontraban 19 hospitales (63% de la infraestructura hospitalaria), quedando fuera de servicio aproximadamente 2021 camas que representan el 40% del total disponible. El segundo evento afectó 46 instalaciones de salud, entre los que se encontraban 7 hospitales (23%), de los cuales fue necesario evacuar a tres de ellos, quedando otras 273 camas fuera de servicio

Fuente: Safina (2003)

En la Tabla 2-5, en la Figura 2-5 y en la Figura 2-6 se presenta el número de muertos, afectados<sup>4</sup> y las pérdidas económicas estimadas de un conjunto de terremotos ocurridos en el periodo 2002-2010. Dados los eventos ocurridos en el año 2010 en Haití y Chile, centros informativos, como por ejemplo la British Broadcasting Corporation (BBC), realizaron breves listados de los terremotos más fuertes ocurridos en los últimos años y sus consecuencias. Considerando estas listas de desastres, se consultó la información disponible en los informes de misiones de evaluaciones de daños, como las realizadas por el grupo de investigación del Earthquake Engineering Research Institute (EERI), en los cuales se hace una breve descripción de los aspectos sismológicos del evento y de los daños observados, así como de las características de los edificios, de la normativa sísmica y del comportamiento de edificios y líneas vitales. También se consideró de utilidad la información recopilada por el grupo de investigadores del Multidisciplinary Center of Earthquake Engineering Research (MCEER) sobre los efectos de terremotos en los últimos años.

Otras fuentes de información utilizadas fueron los informes de situación de la emergencia presentados por organismos como la Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Cruz Roja Internacional, en los cuales se describen los daños y necesidades en diferentes sectores, incluidos salud y educación. Cuando no se tuvo acceso a las anteriores fuentes, se optó por emplear la información disponible en artículos periodísticos. En las secciones siguientes se presentan por evento, desde los más recientes hasta los más antiguos, un resumen de los efectos en la población y construcciones, daños en hospitales y escuelas, así como el comportamiento de los edificios según tipologías estructurales y aplicación de normas sismoresistentes.



**Figura 2-5 Número de muertos y valor de pérdidas económicas en algunos de los desastres analizados**

<sup>4</sup> En la base de datos EM-DAT, el total de afectados hace referencia al total de personas que requieren asistencia inmediata para su supervivencia durante el periodo de emergencia. Personas que requieren alimento, agua, albergue, asistencia sanitaria y médica. Se incluyen personas heridas y sin hogar después del evento.  
Ver: <http://www.emdat.be/glossary/9> [Última consulta 20/10/2012]



**Tabla 2-5 Resumen de los eventos considerados en el documento**

ID	País	Parámetros del terremoto						Daños estimados			
		H0 UTC	H0 Local	Ubicación del epicentro		Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Daños a la población		Pérdida económica	
				Latitud	Longitud			Afectados	Muertos	(millones USD)	(%PIB)
1	España	Mayo 11, 2011 16:47:25	Mayo 11, 2011, 06:47:25 PM	37.699	1.673	5.1	1	15300	9	393	0.03%
2	Haití	Enero 12, 2010 21:53:10	Enero 12, 2010 04:53:10 PM	18.457°N	72.533°W	7.0	13	1500000	230000	14000	117.65%
3	Chile	Febrero 27, 2010 2010, 06:34:14	Febrero 27, 2010 03:34:14 AM	35.909°S	72.733°W	8.8	35	2000000	708	30000	12.31%
4	Indonesia	Septiembre 30, 2009, 10:16:09	Septiembre 30, 2009, 05:16:09 PM	0.725°S	99.856°E	7.6	81	679402	1115	2000	0.21%
5	Italia	Abril 6 2009 01:32:39	Abril 6, 2009, 03:32:39 AM	42.334°N	13.334°E	6.3	8.8	56000	305	16000	0.91%
6	Pakistán	Octubre 28, 2008, 23:09:58	Octubre 29, 2008, 04:09:58 AM	30.656°N	67.361°E	6.4	15	75320	166	10	0.01%
7	China	Mayo 12, 2008, 06:28:01	Mayo 12, 2008, 02:28:01 PM	30.986°N	103.364°E	7.9	19	45976596	68620	85000	3.47%
8	Perú	Agosto 15, 2007, 23:40:57	Agosto 15, 2007, 06:40:57 PM	13.354°S	76.509°W	8 <sup>5</sup>	39	658331	519	600	0.02%
9	Indonesia	Mayo 26, 2006, 22:53:58	Mayo 27, 2006, 05:53:58 AM	7.962°S	110.458°E	6.3	10	3177923	5176	3100	0.85%
10	Irán	Marzo 31, 2006, 01:17:01	Marzo 31, 2006, 04:47:01 AM	33.581°N	48.794°E	6.1	7	161418	63	42262	18.96%
11	Irán	Noviembre 27, 2005, 10:22:19	Noviembre 27, 2005 at 01:52:19 PM	26.784°N	55.847°E	6	10	100	13	Sin datos	Sin datos
12	Pakistán	Octubre 08, 2005, 03:50:40	Octubre 08, 2005 at 08:50:40 AM	34.493°N	73.629°E	7.6	26	5128000	83750	5200	4.75%
13	Indonesia	Marzo 28, 2005, 16:09:36	Marzo 28, 2005 at 11:09:36 PM	2.074°N	97.013°E	8.6	30	105313	915	Sin datos	Sin datos
14	Irán	Febrero 22, 2005, 02:25:22	Febrero 22, 2005, 05:55:22 AM	30.741°N	56.877°E	6.4	14	94766	612	80	0.04%
15	Bangladesh	Diciembre 26, 2004, 00:58:53	Diciembre 26, 2004 at 07:58:53 AM	3.316°N	95.854°E	9.1	30	Sin datos	2	500	0.88%
	India							654512	16389	1023	0.15%
	Indonesia							532898	165708	4452	1.73%
	Kenia							Sin datos	1	100	0.62%

<sup>5</sup> Magnitud Me

ID	País	Parámetros del terremoto						Daños estimados			
		H0 UTC	H0 Local	Ubicación del epicentro		Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Daños a la población		Pérdida económica	
				Latitud	Longitud			Afectados	Muertos	(millones USD)	(%PIB)
	Malasia	Diciembre 26, 2004, 00:58:53	Diciembre 26, 2004 at 07:58:53 AM	3.316°N	95.854°E	9.1	30	5063	80	500	0.40%
	Maldives							27214	102	470	60.54%
	Myanmar							15700	71	500	Sin datos
	Seychelles							4830	3	30	4.29%
	Somalia							105083	298	100	Sin datos
	Sri Lanka							1019306	35399	1317	6.37%
	Tanzania							Sin datos	10	Sin datos	Sin datos
	Tailandia							67007	8345	1000	0.62%
16	Argentina	Septiembre 7, 2004, 11:53:06		28.573 S	65.840 W	6.4	22	22019	Sin datos	Sin datos	Sin datos
17	Irán	Diciembre 26, 2003, 01:56:52	Diciembre 26, 2003, 5:26:52 AM	29.004°N	58.337°E	6.6	10	267628	43200	500	0.37%
18	Japón		Julio 26 2003, 07:13 AM	38.40° N.	141.175° E.	6.2	12	18191	0	411	0.01%
19	Algeria	Mayo 21, 2003, 18:44:19	Mayo 21, 2003, 07:44:19 PM	36.90N	3.71E	6.8	10	210261	2287	5000	7.35%
20	Turquía	Mayo 01, 2003, 00:27:04	Mayo 01, 2003, 03:27:04 AM	39.00N	40.44E	6.4	10	290520	177	135	0.04%
21	China	Febrero 24, 2003, 02:03:41	Febrero 24, 2003 10:03:41 AM	39.61N	77.24E	6.4	11	517000	268	157	0.01%
22	México	Enero 22, 2003, 02:06:34		18.84N	103.82W	7.6	24	178603	21	116	0.02%
23	Italia	Octubre 31, 2002, 10:32:58	Octubre 31, 2002, 11:32 AM	41.728N	14.893E	5.7	10	8533	30	796	0.07%
24	Afganistán	Marzo 25, 2002, 14:56:33		36.06N	69.31E	6.1	8	91228	800	Sin datos	Sin datos

Fuentes EM –DAT (Versión v12.07), United States Geological Survey (USGS), ANSS

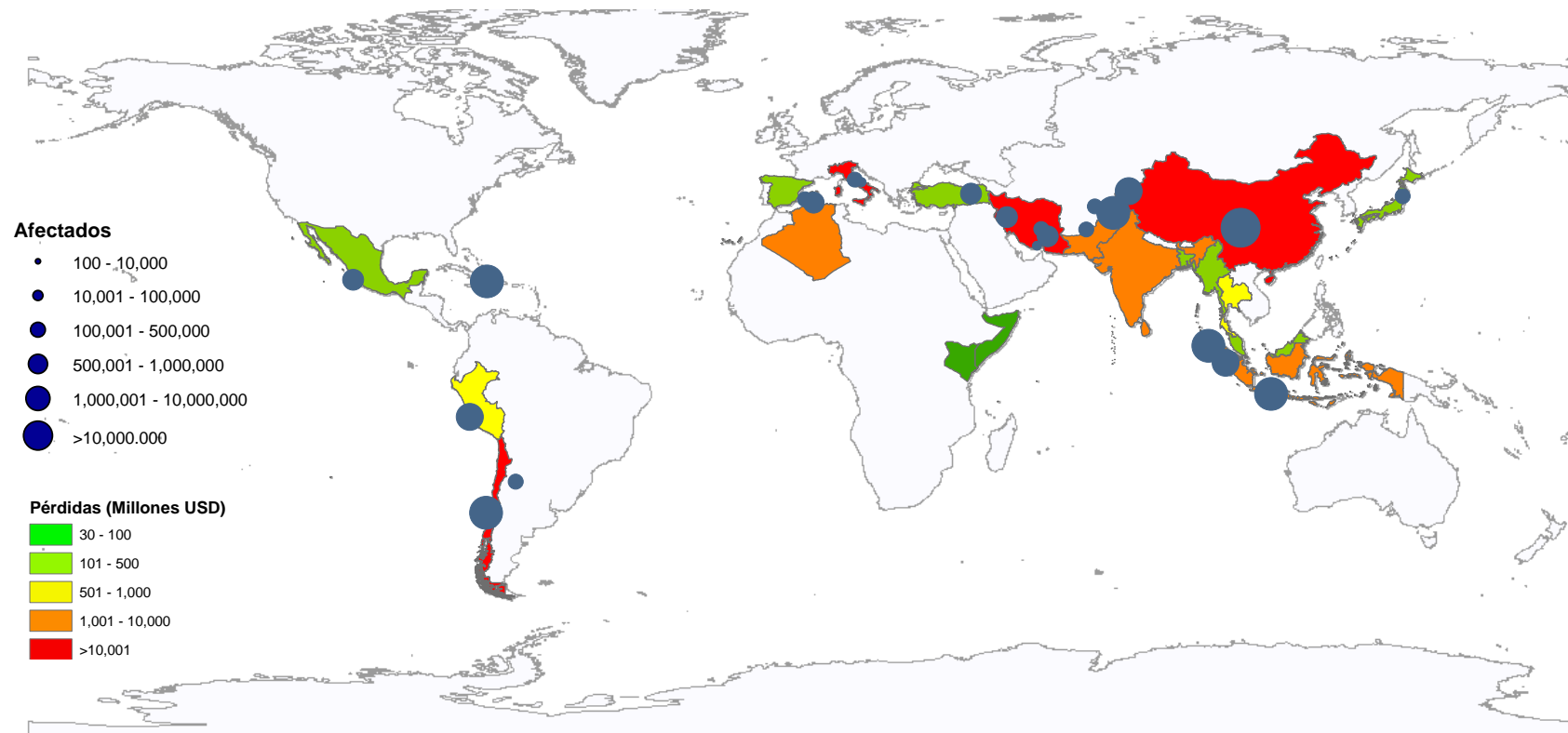


Figura 2-6 Mapa de muertos y pérdidas de los eventos analizados

#### 2.4.1 España, Lorca, 11 de mayo de 2011

##### *Daños estimados*

Al 19 de abril de 2012, más de un mes después del terremoto, el daño de los edificios se consideró como sigue: de 6419 edificios inspeccionados por sus daños (que representan cerca del 35% del total de los edificios de la ciudad<sup>6</sup>), 63% fueron clasificados como habitables, 21% tuvieron daños estructurales leves y 11% presentaron daños que limitaron su ocupación. El 5% sufrió daños fuertes y tuvieron que ser demolidos (Ayuntamiento de Lorca 2012).

##### *Daños en hospitales*

En la zona se encuentran dos hospitales y tres centros de salud. Un centro de salud sufrió daños estructurales considerables. Otras dos instalaciones resultaron con daños no estructurales fuertes que limitaron su funcionamiento. El Centro de Salud *Lorca Sur* presentó daños severos en los muros de fachada y divisiones internas. El Hospital Rafael Méndez, que es el hospital de referencia para la ciudad, tuvo daños estructurales calificados entre nulos y leves. No obstante, sufrió daños en elementos no estructurales que limitaron su funcionamiento. La instalación fue evacuada por consenso de los responsables del hospital y sus pacientes fueron transferidos a otros centros del Servicio de Salud de la Región de Murcia.

##### *Daños en escuelas*

De 17 centros de educación primaria identificados en Lorca, 7 instalaciones (41%) sufrieron daños que limitaron su ocupación. De 8 Institutos de Educación Secundaria, 3 (37%) sufrieron daños que limitaron su ocupación. Las clases se reanudaron en un periodo de entre 5 y 12 días. Los alumnos de los centros con ocupación restringida (cerca de 6600) fueron trasladados a otros centros en jornadas adicionales (el Periódico 16/05/2011).

Una descripción más detallada de los daños en centros educativos y de salud se presenta en el Anexo C.

#### 2.4.2 Haití, Puerto Príncipe, enero 12 de 2010

##### *Daños estimados*

Cerca del 20% de las estructuras colapsaron; de las 80% restantes se considera que muchas sufrieron daños graves. 180 edificios gubernamentales fueron destruidos o sufrieron daños severos, incluyendo el Palacio Nacional, el Palacio de Justicia, La Asamblea Nacional, La corte Suprema, La prisión civil de Puerto Príncipe, y edificios de los ministerios de finanzas, educación, trabajos públicos, comunicación y cultura (MCEER 2010). 20000 estructuras comerciales y 225000 residenciales colapsaron o sufrieron daños severos por lo que debieron ser demolidas. Las líneas vitales de electricidad, agua y comunicaciones sufrieron dañadas considerables (Fierro y Perry 2010).

##### *Daños en hospitales*

Por lo menos 8 hospitales y/o centros de servicios colapsaron o sufrieron daños que los hicieron inoperables. La capacidad de las instalaciones de salud fue desbordada, lo que obligó a que las personas fueran atendidas en áreas provisionales. Dos hospitales en República Dominicana, país vecino a Haití, sufrieron daños pero no afectaron su funcionamiento (PAHO 2010 a). En total, 43 hospitales de los 59 hospitales de Haití, se mantuvieron en funcionamiento, pero con serias dificultades para solucionar la demanda de servicios. El personal médico de emergencia tuvo que solucionar primero la emergencia en sus hogares (BBC 2010).

---

<sup>6</sup> De acuerdo con el Censo de Población y Viviendas del año 2001, en el municipio de Lorca, el número total de edificios es cercano a 18242. Ver:

[http://www.ine.es/censo\\_accesible/es/listatablas.jsp?table=tablas/provincial/30/E1.html](http://www.ine.es/censo_accesible/es/listatablas.jsp?table=tablas/provincial/30/E1.html)  
[Última consulta 22/10/2012]

#### *Daños en escuelas*

Más del 97% de las escuelas en Puerto Príncipe fueron destruidas. (MCEER 2010). La mitad de las escuelas de la nación y las tres universidades principales sufrieron daños severos (Fierro y Perry 2010).

#### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

La construcción Haitiana carecía de previsiones sismoresistentes. El estilo de construcción predominante es muros de mampostería, que por los detalles de construcción, carecen de confinamiento, con el agravante de emplear materiales de poca calidad, realizados con pobre mano de obra y sin mantenimiento (Fierro y Perry 2010). El PGA registrado por una estación en la costa norte, lejos del epicentro fue de 0.3. Basado en estimaciones de los expertos de la misión de evaluación de daños, el PGA en Puerto Príncipe pudo haber sido de 0.45 g. (Fierro y Perry 2010).

#### *2.4.3 Chile, Maule, febrero 27 de 2010*

#### *Daños estimados*

Unos 500000 hogares sufrieron daños serios. Se consideró que las estructuras de adobe fueron las más afectadas. El terremoto generó maremotos en los que 350 personas murieron en la ciudad costera de Constitución (PAHO 2010 b).

#### *Daños en hospitales*

En la zona de la catástrofe, de los 94 establecimientos hospitalarios existentes, 8 de ellos quedaron inhabilitados (6 colapsaron en el sur del país y otros 2 sufrieron daños severos); 10 presentaron problemas importantes y se sometieron a un proceso de evaluación y 76 estuvieron operativos sin mayores dificultades (Ministerio de Salud. Gobierno de Chile 2010). Se estima que la capacidad hospitalaria se redujo en un equivalente a 4000 camas (OCHA 2010).

#### *Daños en escuelas*

De la evaluación en 4432 instituciones educativas, se encontró que el 63% estaban en capacidad de funcionar, el 14% parcialmente operativos y el 23% completamente inhabitables (CERF 2010).

#### *2.4.4 Indonesia, Sur de Sumatra, septiembre 30 de 2009*

#### *Daños estimados*

Se estima que 1214 personas resultaron seriamente heridas y 1688 tuvieron heridas leves. En cuanto a los daños en viviendas, 135299 resultaron seriamente dañadas, 65306 con daños ligeros y con daños menores 78591. (Antara 2009).

#### *Daños en hospitales*

Del evento resultaron dañados 4 hospitales, 12 centros comunitarios de salud y 10 puestos de salud, lo cual dificultó la atención de la emergencia (OCHA 2009). El hospital Mohammed Djamil que era el principal centro de la ciudad de Padang resultó seriamente afectado (AmeriCares 2009). De las visitas realizadas por expertos de la OMS se resaltó la urgente necesidad de garantizar la seguridad de los hospitales y clínicas frente a terremotos, considerando que son infraestructuras indispensables en situaciones de emergencia, lo cual refuerza los objetivos de la campaña de 2009 “Hospitales a Salvo de Desastres” (Reliefweb 2009b).

#### *Daños en escuelas*

241 escuelas resultaron con daños severos, 175 con daños moderados, y 87 con daños ligeros. Se estimó que cerca de 90000 estudiantes estuvieron con necesidades urgentes de materiales educativos (OCHA 2009).

#### 2.4.5 Italia, L'Aquila, abril 6 de 2009

##### *Daños estimados*

Se presentaron daños significativos en más de 10000 edificios en el área de L'Aquila y daños en puentes y estructuras comerciales e industriales (Miyamoto 2009). Otras estructuras estratégicas como la estación de policía (construida en mampostería) tuvieron daños significantes. Los puentes y las tuberías de gas y agua tuvieron fallas localizadas (Liel y Lynch 2009).

##### *Daños en hospitales*

Luego del colapso de centros educativos en el terremoto de Molise en el año 2002, se centró la atención sobre los edificios y estructuras esenciales. A pesar de esto, varias instalaciones esenciales sufrieron daños. El hospital San Salvatore, de tres plantas, era una instalación moderna construida en el 2000 que debería haber soportado el evento sin sufrir daño alguno. No obstante, los muros de relleno de mampostería no reforzada colapsaron en el tercer nivel, en la entrada del área de emergencias. Los pacientes fueron evacuados y atendidos en las afueras y en áreas de aparcamiento (Miyamoto 2009).

##### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

Los edificios de hormigón armado presentaron daños no estructurales considerables y en un número limitado de edificios se presentaron daños estructurales significativos. De un total de 438 edificios inspeccionados, la mayoría (68%) presentaron daños insignificantes, requiriendo sólo reparaciones cosméticas. Sólo se presentó un edificio colapsado (0.2%). Los edificios dañados fueron desocupados y se suspendieron las actividades comerciales, del gobierno y las escuelas. Los edificios de mampostería en el centro histórico de L'Aquila sufrieron los daños más graves. El colapso de las casas de mampostería causó la mayoría de los muertos (Liel y Lynch 2009).

En el estudio de evaluación de daños realizado por Liel y Lynch (2009), se resalta el interés en relacionar la vulnerabilidad física de los edificios con la vulnerabilidad social de sus ocupantes y así identificar las posibles barreras en el desarrollo de programas de reforzamiento. En la evaluación de Liel y Lynch (2009), además de la inspección del nivel de daño del edificio y su impacto en su funcionalidad, se investigaron las condiciones socioeconómicas relacionadas con el nivel de ingresos, educación, edad y género de sus ocupantes.

#### 2.4.6 Pakistan, Balochistan, octubre 29 de 2008

##### *Daños estimados*

Se estima que 370 personas resultaron heridas y 7000 quedaron sin hogar siendo desplazadas (OCHA 2008 b).

##### *Daños en hospitales*

De las 38 instalaciones de salud en el distrito de Ziarat, 10 fueron destruidas (incluyendo 3 unidades básicas de salud), mientras que 3 centros rurales de salud y 4 edificios con unidades básicas de salud (también rurales) quedaron parcialmente dañados. De las 57 instalaciones de salud de Pishin, 3 hospitales tuvieron daños parciales. Los servicios de salud fueron instalados en tiendas en las afueras de los hospitales tomando precaución sobre las réplicas del evento y los daños de las instalaciones. Se pusieron en marcha sistemas de alerta temprana de enfermedades<sup>7</sup> en las zonas afectadas para controlar infecciones (OCHA 2008 b).

##### *Daños en escuelas*

100 escuelas primarias en el distrito de Ziarat y 28 escuelas primarias en el distrito de Pishin resultaron parcialmente dañadas. El 30 de octubre se anunció que las escuelas del área afectada cesarían actividades por una semana. Esta interrupción afectó a 20000 niños de educación primaria en Pishin y 3845 niños de educación primaria en Ziarat (OCHA 2008 c).

---

<sup>7</sup> Disease Early Warning System (DEWS)

#### 2.4.7 China, Sichuan, mayo 12 de 2008

##### *Daños estimados*

Se considera que hubo cerca de 374142 heridos; Más de 700 personas fueron sepultadas por un deslizamiento en Qingchuan. 160000 personas fueron evacuadas de Tangjiashan. Cerca de 5 millones de personas quedaron sin hogar. (USGS 2008). 420000 casas quedaron destruidas en el condado de Qingchuan. En Beichuan, cerca del 80% de los edificios la parte antigua y 60% de la parte nueva fueron destruidos (MCEER 2009 b). Un estimado de 5.36 millones de edificios colapsaron y más de 21 millones sufrieron daños en Sichuan y en partes de Chongqing, Gansu, Hubei, Shaanxi y Yunnan. Por lo menos 2400 presas sufrieron daños y 34 represamientos de aguas se formaron a causa de deslizamientos, los cuales también afectaron vías de montaña, ferrocarriles y sepultaron edificios en el área de Beichuan-Wenchuan. Más de 53000 km de vías y 48000 km de tuberías de agua fueron afectados. (USGS 2008). Las autoridades sanitarias y ambientales de china identificaron cerca de 5000 toneladas de materiales peligrosos ubicados en los escombros (OCHA 2008).

##### *Daños en hospitales*

La mayoría de la infraestructura de salud resultó afectada. 12 hospitales de campaña se instalaron para asistir la emergencia (OCHA 2008). El número de muertos en escuelas y hospitales excedió los 10000. En la práctica, estos edificios son considerados esenciales y son diseñados con mayores fuerzas sísmicas usando factores de importancia para alcanzar un mayor nivel de seguridad. A pesar de esto, en este evento, estos edificios fueron desproporcionalmente afectados. Los fallos principales fueron la ausencia de un sistema resistente a cargas bien definido, irregularidades en el edificio y la inadecuada ductilidad (Miyamoto et al. 2009).

##### *Daños en escuelas*

Más de 7000 aulas de clase colapsaron (MCEER 2008). En Sichuan y en Gansu, más de 12000 y 6500 escuelas resultaron afectadas, respectivamente (Reliefweb 2009). Muchas escuelas construidas con mampostería no reforzada colapsaron (Miyamoto et al. 2009).

##### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

El terremoto de Wenchuan fue un evento mucho más grande que los considerados por el código sísmico de China del 2001. El área de Wenchuan era considerada de sismicidad moderada, con una intensidad de diseño de VII en la escala de Mercalli Modificada (MM-56), mientras que para este evento se asignó la intensidad XI. La aceleración básica del terreno, para un periodo de 475 años se consideraba en la norma igual a 0.1g y 0.22 para terremotos extremos. Sin embargo, en las zonas cercanas al epicentro, se registraron valores de aceleración entre 0.4 y 0.6 g, siendo entre 3 y 5 veces mayores a los considerados para el diseño. Por esta razón no pueden ser sorprendentes los daños causados por el evento. En la zona de Chengdu, en la cual los registros del movimiento fueron similares a los de diseño, los edificios se comportaron bien (Free et al. 2008).

El tipo predominante de construcción en la región de Sichuan son los pórticos de hormigón armado resistentes a momento de entre 4 y 6 plantas, con muros de relleno de mampostería. La mayoría de los edificios fueron construidos después de 1980, lo cual implica que tuvieron algún nivel de diseño sismoresistente. No obstante cerca del 70% de los edificios sufrieron daños, muchos con fallos por piso blando en la planta baja, falta de confinamiento en las columnas y nodos, así como efectos de pilares cortos (Free et al. 2008, Miyamoto et al. 2009). Los edificios de mampostería son usados para actividades comerciales, residenciales y escuelas. Los más bajos (de 1-2 plantas) se comportaron bien. Las fallas en los edificios de mampostería no reforzada se debieron a la falta de anclaje entre el forjado y los muros (Miyamoto 2009). Los edificios tradicionales consistían de pórticos de madera con muros de relleno de mampostería y se observaron en las regiones más pobres. Estas viviendas son de uno a dos niveles; los techos son de madera y láminas de acero. Estos edificios tuvieron un pobre comportamiento en el evento (Free et al. 2008).

#### 2.4.8 Perú, Pisco, agosto 15 de 2007

##### *Daños estimados*

Se estima que cerca de 56363 casas quedaron destruidas y otras 14959 resultaron afectadas (OCHA 2007). La mayor parte de los sistemas de suministro de agua no fueron operacionales debido a fallos en la energía eléctrica o por el colapso de su infraestructura. Se emplearon camiones cisterna para suplir las necesidades de agua de la población afectada. Los sistemas de recolección y transporte de basura estuvieron fuera de servicio. Se presentaron dificultades para el manejo de excretas. También se encontraron problemas para la remoción de escombros, así como para el manejo de residuos hospitalarios y de cadáveres (PAHO 2007).

##### *Daños en hospitales*

14 hospitales destruidos y 96 hospitales afectados (OCHA 2007). En Pisco, 2 hospitales quedaron destruidos y 22 centros de salud resultaron afectados (OPS 2007 b).

##### *Daños en escuelas*

18 centros de educación fueron destruidos, 118 fueron afectados (OPS 2007 b). Los centros educativos típicos, en su mayoría, correspondían a edificios de hormigón armado con muros de relleno. En algunos casos, los paneles de relleno estaban rígidamente unidos a la estructura y formaron pilares cortos que fueron severamente agrietados en el evento (EERI 2007).

##### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

El evento causó enormes daños en los edificios de adobe. La mayoría de las casas tenían más de 50 años de antigüedad. En Pisco, más del 80% de las casas de adobe colapsaron o tuvieron daños severos. Aparentemente, los bloques de adobe y mortero de la región afectada fueron hechos con suelos arenosos que no proporcionan la suficiente adhesión entre el mortero y los bloques. Debido a una insuficiente separación entre edificios, fallaron también los muros frontales de varias viviendas en conjunto (EERI 2007).

Algunos edificios de mampostería confinada que colapsaron presentaban pisos blandos e irregularidades considerables. Por otro lado, edificios bien diseñados resistieron el evento con daños menores. De los edificios de hormigón armado con previsiones sismoresistentes, los que más sufrieron daños fueron los pórticos de hormigón armado con muros de relleno. Estos edificios presentaron daños en las particiones. Este comportamiento se observó en escuelas y hospitales. Por otro lado, los edificios de muros estructurales de hormigón se comportaron bien durante el evento (EERI 2007).

#### 2.4.9 Indonesia, Java, Yogyakarta, mayo 27 de 2006

##### *Daños en hospitales*

41 centros de salud y un hospital resultaron afectados (WHO 2008). Para la rehabilitación de las instalaciones claves de salud se consideró un total de 3.5 millones USD (WHO 2006).

##### *Daños en escuelas*

Un total de 1890 escuelas primarias en Yogyakarta y las provincias de Java Central sufrieron daños y necesitaron asistencia. En Bantul se necesitaron tiendas para las escuelas y centros de salud provisionales. Un total de 115 escuelas ligeramente dañadas se consideraron para iniciar un proceso de rehabilitación usando presupuesto del distrito (1.2 millones de USD). Para rehabilitar el total se consideró necesario financiación adicional, siendo 3.2 millones de USD del ministerio nacional de educación y 0.3 millones de USD de donaciones (OCHA 2006).

##### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

Se perdió más del 7% del stock de vivienda en los distritos afectados. En algunas villas, entre el 70 y 90% de las casas fueron completamente destruidas. Las casas pueden dividirse en tres categorías generales: mampostería no confinada (viviendas más antiguas, anteriores a 1990), mampostería parcialmente confinada (viviendas construidas después de 1990) y pórticos de madera con muros de mampostería. Las



viviendas de mampostería no confinada sufrieron daños severos y su colapso fue el responsable de la mayoría de muertes y lesiones. Estos daños estuvieron asociados a la pobre calidad de los materiales, a la falta de conexión entre los muros, techos y pisos (EERI 2006).

Las estructuras de acero de instalaciones industriales presentaron daños menores. Por otro lado, los edificios comerciales y los edificios públicos hechos de pórticos de hormigón armado con muros de relleno de mampostería sufrieron colapso o tuvieron serios daños. Los daños se atribuyeron a la falta de ductilidad, al pobre confinamiento de las columnas, a la ausencia de sistemas resistentes a cargas laterales y a la pobre calidad de la construcción. Efectos de pilar corto y plantas débiles contribuyeron a los daños. Daños no estructurales en los muros de relleno se observaron en varios edificios de baja altura, especialmente en la plantas baja (EERI 2006).

#### *2.4.10 Irán, Borujerd, marzo 31 de 2006*

##### *Daños estimados*

De acuerdo a los evaluadores de la misión realizada por Naciones Unidas, 320 villas fueron afectadas con 35000 a 40000 hogares parcialmente destruidos. En la ciudad de Boroujerd 150000 casas sufrieron daños (Reliefweb 2006 b).

##### *Daños en hospitales*

32 casas de salud, 8 centros rurales, un centro de salud urbano y tres hospitales (uno en la ciudad de Bojured, otro en Khorramabad y otro en Doroud) resultaron dañados. Los daños totales se estimaron en 9.2 millones de USD (IFRC 2006).

##### *Daños en escuelas*

11 escuelas colapsaron. 25 escuelas quedaron fuera de servicio. Los porcentajes de daño de estos edificios variaron entre el 30% y el 80%. 62 escuelas quedaron operativas, cuyos porcentajes de daño fueron menores al 30%. Las pérdidas económicas se estimaron en más de 4.3 millones de USD (IFRC 2006).

#### *2.4.11 Iran, Isla de Qeshm, noviembre 27 de 2005*

##### *Daños estimados*

En la zona del epicentro, dos villas fueron en su mayoría destruidas, cuyo porcentaje de destrucción se estimó entre el 80% y 90%. En otras villas, los porcentajes de destrucción variaron entre el 10% y el 80%. Las líneas de electricidad fueron cortadas en algunas zonas y el aeropuerto internacional de la isla también sufrió daños (IFRC 2005 a).

##### *Daños en hospitales*

La capacidad de atención del único hospital en la ciudad de Qeshm fue desbordada por al número de heridos que acudieron a sus instalaciones. Por esta razón se presentó un déficit de servicios médicos (IFRC 2005 b).

##### *Daños en escuelas*

1500 escuelas sufrieron daños, 65 de las cuales fueron destruidas por completo; sin embargo, ningún estudiante resultó afectado. El sismo ocurrió a la 1:52 p.m hora local. (IFRC 2005 a).

#### *2.4.12 Pakistán, Cachemira, octubre 8 de 2005*

##### *Daños estimados*

El terremoto afectó más de 500000 familias. Se estima que más de 780000 edificios fueron destruidos o dañados (EERI 2006 b).

#### *Daños en hospitales*

Los hospitales más importantes fueron destruidos o seriamente dañados. De los dos hospitales más importantes, el hospital Militar (Combined Military Hospital) colapsó por completo, matando o hiriendo gravemente a muchos pacientes y trabajadores. El hospital tuvo que ser evacuado y los pacientes reubicados. Los residentes de la ciudad estuvieron frente a una emergencia médica que tuvo la asistencia del ejército, organizaciones no gubernamentales y de la cruz roja (EERI 2006b)

#### *Daños en escuelas*

Más de 17000 edificios escolares resultaron seriamente dañados. Alrededor de 19000 niños murieron en el terremoto, la mayoría de ellos en colapsos de los centros educativos. El terremoto ocurrió a las 8:50 a.m hora local. En las escuelas colapsadas se encontró pobre calidad de la construcción y la falta de diseño sísmico. A pesar de que la mayoría de las escuelas colapsaron, otras estuvieron funcionando en zonas adyacentes (EERI 2006 b).

#### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

La mayoría de los edificios afectados fueron de mampostería no reforzada o edificios sin previsiones sismoresistentes (EERI 2006 b).

### *2.4.13 Indonesia, Sumatra, Nias, marzo 28 de 2005*

#### *Daños estimados*

Las instalaciones de telecomunicación quedaron destruidas, la electricidad estuvo parcialmente interrumpida; los puentes fueron destruidos y el transporte terrestre quedó bloqueado (WHO 2005).

#### *Daños en hospitales*

Junto con el terremoto del 23 diciembre del año 2004<sup>8</sup>, se considera que 8 hospitales y 114 centros de salud fueron destruidos en Nias y Aceh (Nazara y Resosudarmo 2007).

#### *Daños en escuelas*

Entre los dos fuertes terremotos de los años 2004 y 2005, cerca de 2000 escuelas resultaron seriamente afectadas en Nias y Aceh (Nazara y Resosudarmo 2007).

#### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

En las inspecciones de evaluación de daños, los edificios fueron clasificados según los requerimientos sísmicos considerados en su diseño. Sólo cerca del 5% de los edificios contaban con previsiones; el 95% restante no. Los edificios de hormigón armado no estaban diseñados para la sismicidad de la zona. Se encontró que la calidad del hormigón empleado era pobre. A pesar de que en Indonesia se cuenta con un código sismoresistente, al parecer este no fue aplicado en la región (EERI 2005).

Dentro de los edificios sin previsiones sismoresistentes se encuentran los de mampostería no reforzada, los cuales eran empleados para vivienda, escuelas y centros comunitarios de salud. Dentro de las causas de colapso de los edificios de vivienda se encuentra el procedimiento de construcción por etapas, el cual depende de la disponibilidad de recursos de los propietarios. La primera fase consiste en la construcción de la cimentación, columnas y muros de las primeras plantas. Cuando se encuentran mayores recursos, el proceso de construcción se extiende a plantas superiores. Los largos periodos de construcción hacen que se presenten conexiones débiles y que por lo tanto los edificios sean altamente vulnerables (EERI 2005).

### *2.4.14 Iran, Kerman, febrero 22 de 2005*

#### *Daños en hospitales*

De las 78 instalaciones de salud en Zarand, 5 quedaron completamente dañadas (1 centro rural y 4 casas de salud). El día del evento, 360 pacientes se remitieron a los dos hospitales de referencia en Kerman (El

---

<sup>8</sup> En la Tabla 2-5 se encuentran los parámetros del terremoto de Sri Lanka del año 2004 (el ID del evento es el número 15). En el apartado 2.4.15 se encuentran un resumen de los daños de dicho terremoto.

Hospital General Alfzalipur y el Hospital Shahid Bahunar). 5 murieron allí y 10 fueron atendidos en unidades de cuidados intensivos. Las heridas eran en su mayoría cortes, fracturas de las extremidades inferiores y trauma abdominal. Los dos hospitales reportaron en ese momento un número adecuado de personal y de inventario de medicamentos (WHO 2005).

*Daños en escuelas*

120 escuelas resultaron afectadas; en estos edificios, el porcentaje de daño varió entre el 20% y el 100%. (IFRC 2005 c).

*2.4.15 Sri Lanka, Maldives, Tailandia, diciembre 26 de 2004.*

*Daños estimados*

Este evento tuvo efectos en Indonesia, Kenya, Malasia, Maldives, Myanmar, Seychelles, Somalia, Sri Lanka Tanzania y Tailandia.

*Daños en hospitales*

En Indonesia se encontraron daños en un centro médico regional, 2 hospitales, 20 centros de salud y 21 puestos de salud. En la provincia de Aceh quedaron destruidos o tuvieron daños graves 20 de 240 clínicas, 8 hospitales y 41 de 51 instalaciones de salud. Más de 700 trabajadores en salud (de un estimado de 9800 en la provincia) murieron o resultaron desaparecidos (WHO 2008).

*Daños en escuelas*

En Indonesia 750 escuelas quedaron destruidas; en Sri Lanka 55; en Maldives 44 y en Tailandia 30 (Petal 2008).

*2.4.16 Argentina, Catamarca, septiembre 7 de 2004*

*Daños estimados*

En la provincia de Catamarca se presentaron los mayores daños. En las localidades de Los Ángeles, Miraflores y Concepción, en algunas casas, capillas y edificios escolares, construidos en la década de los cincuenta, colapsaron los techos y aparecieron grietas en las paredes (Clarín 08/09/2004).

*Daños en hospitales*

El centro pediátrico de mayor complejidad de la provincia, el Hospital de niños “Eva Perón”, sufrió daños en la mampostería del piso superior y los internos debieron ser evacuados a planta baja. (Clarín 08/09/2004).

*2.4.17 Irán, Bam, diciembre 26 de 2003*

*Daños estimados*

24000 hogares quedaron destruidos en áreas rurales. La mayoría de edificios en la ciudad colapsaron y los edificios que se mantuvieron en pie sufrieron daños severos. Adicionalmente, el centro histórico de Arge-Bam, probablemente el complejo de adobe más antiguo del mundo, con 2000 años de historia, sufrió daños considerables. La estación de bomberos tuvo un colapso asociado a una característica de piso débil. Como consecuencia, las máquinas quedaron inservibles. Similarmente, el colapso de un garaje de buses afectó los vehículos de transporte de la ciudad (EERI 2004).

*Daños en hospitales*

Los dos hospitales más importantes en la ciudad experimentaron daños significativos o colapsos parciales. Estas estructuras eran de pórticos de acero con muros de relleno de mampostería. También se presentaron daños considerables en 94 casas de salud, 14 hogares rurales de salud y 10 centros urbanos de salud (IFRC 2004).

#### *Daños en escuelas*

131 escuelas en Bam y en las villas de alrededor quedaron destruidas o dañadas seriamente impidiendo su funcionamiento. Una semana después del terremoto, se estimó que entre 18000 y 20000 estudiantes quedaron sin establecimientos de educación (IFRC 2004).

#### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

Muchos edificios residenciales estaban contruidos siguiendo las técnicas de la ciudad antigua, siendo muros de adobe con arcos y domos de adobe. El colapso extendido de estas estructuras causó la mayoría de las víctimas. Este mismo sistema estructural se empleaba en algunas escuelas y otros edificios públicos. Ya que el evento fue temprano en la mañana, los estudiantes y trabajadores públicos no estuvieron expuestos. El otro sistema estructural representativo en la región son pórticos de acero con muros de relleno. Se consideró que los daños en estos edificios estaban relacionados con prácticas inadecuadas en la construcción, fallas en el control de calidad e irregularidades en altura por piso débil (EERI 2004).

#### *2.4.18 Japón, Miyagi, julio 26 de 2003*

#### *Daños estimados*

De acuerdo a los informes de evaluación de daños, 218 casas fueron totalmente destruidas. Con daños graves se encontraron 1180 y con daños parciales 4426. (ADRC 2003).

#### *Daños en hospitales y escuelas*

El hospital Hukaya, el hospital Kashimadai y el colegio Kitamura, fueron contruidos antes de 1975. Estos edificios tenían alturas menores a 4 plantas; durante el evento presentaron daños en sus columnas que limitaron su funcionamiento (The Disaster Control Research Center 2003).

#### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

El tipo estructural de los edificios de gobierno (escuelas, hospitales, oficinas) es por lo general hormigón armado de tres a cuatro plantas. Los daños de los edificios diseñados con el código de 1981 fueron menores. Pocos edificios de hormigón armado diseñados con el código más antiguo tuvieron daños considerables (The Disaster Control Research Center 2003).

#### *2.4.19 Algeria, mayo 21 de 2003*

#### *Daños estimados*

Cerca de 182000 viviendas fueron afectadas, de las cuales 19000 colapsaron o quedaron inhabitables. Las instalaciones industriales sufrieron daños también. La distribución de agua fue interrumpida por el terremoto y tuvo que realizarse por medio de camiones cisterna (Brzev 2004).

#### *Daños en hospitales*

Más del 50% de las instalaciones de salud quedaron afectadas o seriamente dañadas. En la zona epicentral, el hospital del municipio de Thenia fue destruido; el ejército estableció una instalación temporal en la misma ubicación (EERI 2004 b).

#### *Daños en escuelas*

Más de 550 escuelas quedaron afectadas o seriamente dañadas. Además de las escuelas de Boumerdes, las de las provincias de Blida, Bouira, Tizi, Ouzou, Tipaza y Medéa fueron también dañadas (Brzev 2004).

#### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

En pórticos de hormigón armado se observaron rótulas plásticas en los pilares del primer piso; en algunos casos éstos daños llevaron al colapso de los edificios. Este tipo de fallo está asociado al inadecuado reforzamiento de los pilares y a la irregularidad en altura del edificio. Tal irregularidad se debe a la adecuación de la estructura para que el edificio tenga diferentes usos, siendo comercial en la primera

planta y residencial en las restantes. Dichas condiciones propiciaron que se desarrollaran grandes desplazamientos en los pilares del primer piso.

Otras causas de los daños están asociadas a la existencia de pilares cortos, los cuales fueron encontrados tanto en edificios residenciales como en escuelas. También fue causa de daños la insuficiente separación entre edificios adyacentes, lo cual favoreció la posibilidad de golpeteo (EERI 2004 b).

#### *2.4.20 Turquía, Bingol, mayo 1 de 2003*

##### *Daños en hospitales*

En Bingol, el hospital ubicado en el centro del pueblo se cerró parcialmente luego del evento (Ellul y D'Ayala 2003).

##### *Daños en escuelas*

Más del 48% de las escuelas sufrieron daños entre moderados a graves. De un total de 27 escuelas en la zona, 4 colapsaron o resultaron fuertemente dañadas, 9 tuvieron daños moderados, 11 daños leves y 3 se mantuvieron sin daños. En la escuela de Celtiksuyu se presentó el colapso del bloque de dormitorios en el que 84 personas murieron, siendo casi todos niños. El sismo ocurrió a las 3:27 a.m hora local (Ellul y D'Ayala 2003).

##### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

Los edificios oficiales como escuelas, colegios, estaciones de policía y hospitales fueron diseñados siguiendo un modelo estándar. Esta característica permitió identificar en algunos casos patrones de daños. En otros, las diferencias en los daños observados se relacionaron a los efectos de sitio según las clases de suelos identificadas (Ellul y D'Ayala 2003).

#### *2.4.21 China, Xinjiang, febrero 24 de 2003*

##### *Daños estimados*

Más de 70000 unidades de vivienda colapsaron (ADRC 2003 b).

##### *Daños en hospitales*

Una clínica de un solo piso resultó gravemente dañada. (Embajada de China 2003). 16 hospitales resultaron destruidos (Li y Tao 2003).

##### *Daños en escuelas*

103 colegios colapsaron (correspondientes a 900 aulas). Muchas de las víctimas fueron estudiantes de la escuela del condado Bachu que colapsó (Embajada de China 2003, Li y Tao 2003).

#### *2.4.22 México, Colima, enero 21 de 2003*

##### *Daños estimados*

13943 estructuras residenciales reportaron daños. De estas, 11009 fueron inspeccionadas en las cuales se encontraron 2728 con daño total, 4150 con daño parcial y 4131 de ocupación segura (EERI 2003 b).

##### *Daños en hospitales*

De las evaluaciones de daños realizadas se encontró que el hospital de Colima sufrió daños físicos que redujeron al 50% su capacidad. Otros 11 centros de salud sufrieron daños en su infraestructura, como el centro de salud "Las Conchas" ubicado en el municipio de Ixtlahuacán y otros cuatro de Manzanillo que quedaron sin funcionamiento. Se inició una evaluación especializada de los 84 establecimientos de salud que reportaron algún tipo de daño (PAHO 2003).

#### *Daños en escuelas*

Después del evento, el gobierno ordenó que todas las escuelas cerraran y se llevaron a cabo inspecciones de daños. De las 703 escuelas de primaria y secundaria, 220 sufrieron algún nivel de daño. Después de las inspecciones, las escuelas sin daños considerables volvieron a su funcionamiento, mientras que los estudiantes de las escuelas afectadas continuaron su instrucción en instalaciones temporales (EERI 2003 b).

#### *Comportamiento de los edificios y previsiones de sismoresistencia*

Se encontraron daños en edificios de adobe y de mampostería no reforzada mientras que edificios de acero y hormigón armado en los que se consideraron previsiones sísmicas no tuvieron daños mayores (EERI 2003 b).

#### *2.4.23 Italia, Molise, octubre 31 de 2002*

##### *Daños estimados*

Este terremoto causó daños dispersos en 50 villas; 30 personas murieron, de las cuales 27 fueron niños que quedaron atrapados en la escuela elemental de San Giuliano di Puglia. El evento ocurrió a las 11:32 a.m hora local. (EERI 2003).

##### *Daños en hospitales*

Ninguno de los hospitales del área resultó afectado, ni se desarrollaron problemas de sanidad (EERI 2003).

##### *Daños en escuelas*

Todas las escuelas fueron cerradas como consecuencia del sismo para garantizar la seguridad. De las escuelas evaluadas, aproximadamente entre el 20% y 30% fueron consideradas como no seguras y no se permitió que pudieran volver a estar en funcionamiento hasta no recibir una intervención estructural (EERI 2003).

#### *2.4.24 Afganistán, Hindu Kush, marzo 25 de 2002*

##### *Daños estimados*

Cerca de 4000 personas resultaron heridas y 10000 quedaron sin hogar. El 25% de los edificios colapsaron y el 60% tuvo daños serios, con colapsos de muros o techos. Las viviendas estaban construidas de mampostería de barro. De acuerdo a los informes de la Cruz Roja Internacional, las condiciones socioeconómicas de los habitantes de la zona afectada representaban fuertes limitaciones para la construcción de viviendas con diseño sismoresistente (Reliefweb 2002).

##### *Daños en hospitales*

La mayoría de las instalaciones de salud resultaron destruidas (Reliefweb 2002).

##### *Daños en escuelas*

La mayoría de escuelas resultaron destruidas. Antes del terremoto existían 12 escuelas primarias en el distrito de Nahrin que tuvieron que ser substituidas temporalmente por carpas (Reliefweb 2002).

## **2.5 Casos de estudio**

### *2.5.1 Informe de la situación de la emergencia en el terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010*

Sobre el estado y avance de la emergencia por el terremoto del 27 de febrero de 2010, se encontraron datos relevantes en informes de la Organización Panamericana de la salud (PAHO 2010 b, Reliefweb 2010) así como del ministerio de salud de Chile e informes periodísticos, en los cuales se describe el daño

y grado de operación de los hospitales en cada región, así como aspectos relacionados con el traslado de pacientes, la operación de hospitales de campaña, sistemas de comunicación y manejo de farmacias. A continuación se presenta un resumen de tales informes según regiones. La Figura 2-7 presenta el mapa de organización administrativa de Chile según regiones (a) y el Shakemap<sup>9</sup> del evento (b).

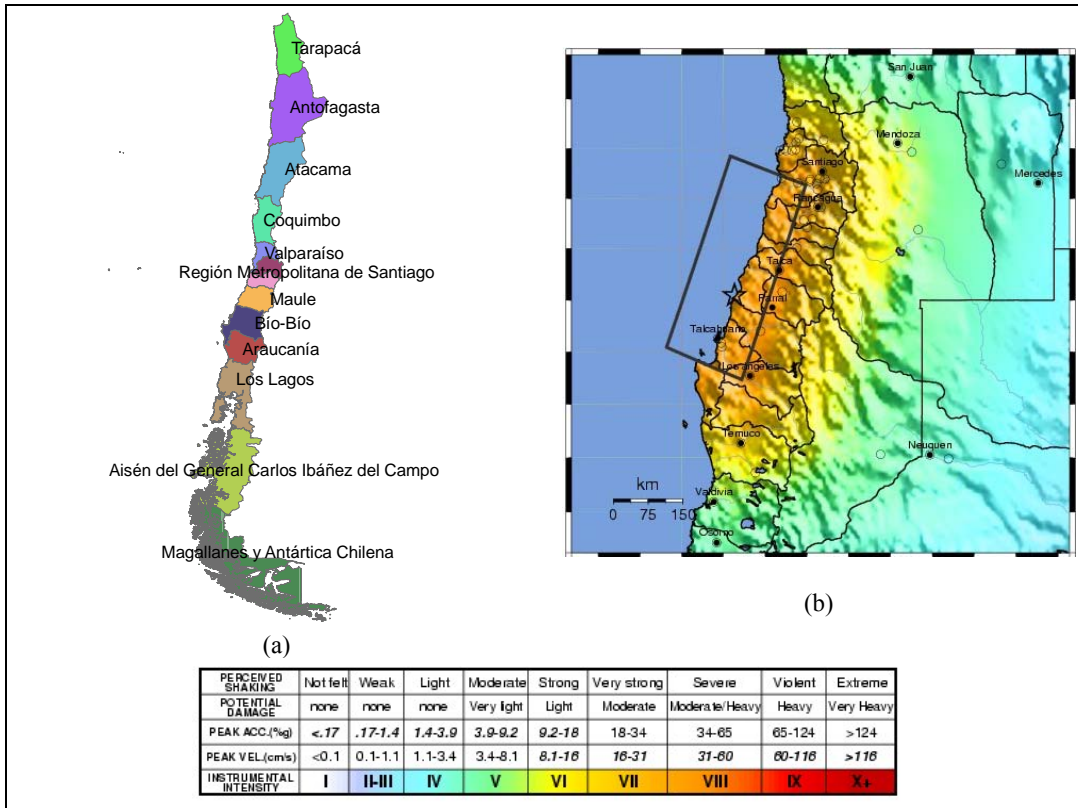


Figura 2-7 (a) Mapa administrativo de Chile según regiones; (b) Shakemap del terremoto de Maule, Chile, 27 de febrero de 2010

Fuente: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2010tfan/> [Última consulta 21/10/2012]

### Valparaíso

- El Hospital Gustavo Fricke estuvo siendo abastecido mediante sistema de suministro externo de agua potable lo cual permitió que estuviera operativo para atención de pacientes.
- El Hospital de Putaendo sufrió daños estructurales severos y fue cerrado. 7 de sus pacientes fueron trasladados al Hospital de Llay-Llay.
- El Hospital "Claudio Vicuña" de San Antonio sufrió daños estructurales; permanecieron en funcionamiento el servicio de urgencias y las unidades prioritarias.
- El Hospital Geriátrico Paz de la Tarde (Limache) disminuyó su capacidad de camas, de 40 a 16, por daños estructurales.
- El Hospital de Quilpué sufrió algunos daños estructurales por lo que cerraron 12 camas de maternidad y 5 pediátricas. Los pacientes se distribuyeron dentro del mismo hospital. El abastecimiento de agua se realizó por medio de camiones.

### Región Metropolitana

- Esta región se consideró como la receptora de heridos de otras zonas (Maule, Bio Bio). Se estimó un total de 307 camas generales disponibles y 50 camas traumatológicas para tratar a las víctimas.

<sup>9</sup> Shakemap: nombre usado por el USGS para describir los mapas de movimiento del suelo que suele poder darse mediante uno de los siguientes parámetros: Intensidad Macrosísmica (MM-56), aceleración pico (PGA) velocidad pico (PGV). También suelen incorporar las incertidumbres.

- La gran mayoría de los recintos sufrieron daños no estructurales (caídas de cielos falsos, revestimientos, tabiquerías) que no afectaron su funcionamiento. En revisiones preliminares no se encontraron daños estructurales mayores. En algunos recintos se trasladaron los pacientes al interior del mismo establecimiento de manera preventiva.
- La Superintendencia de Salud declaró el cierre del Hospital Félix Bulnes por condiciones inadecuadas para la atención a la comunidad.

#### *Región de O'Higgins*

- Varios hospitales de la región se mantuvieron funcionando con normalidad; sólo presentaron daños no estructurales menores.
- En el hospital de Santa Cruz se evacuaron pacientes de la parte antigua. La operatividad general del recinto fue reducida.
- El Hospital de Chimbarongo fue evacuado y funcionó en un consultorio adosado.
- Los Hospitales de baja complejidad presentaron problemas de agua y energía eléctrica que limitaron su operación.
- Los Hospitales de Santa Cruz y Peumo presentaron algunos daños estructurales que fueron evaluados. No obstante, permanecieron en funcionamiento.

#### *Región de Maule*

- Los heridos que no pudieron recibir atención fueron destinados a la región metropolitana
- El Consultorio de San Rafael, el Hospital de Linares y el Parral tuvieron problemas estructurales y reorganizaron los espacios de atención.
- El Hospital Base de Cauquenes quedó fuera de operación y la atención se realizó a la intemperie.
- El Hospital de Curicó fue evacuado
- Los hospitales de Hualañé y Parral estuvieron fuera de servicio.
- Frente al hospital de Talca se instalaron dos centros de diálisis y un hospital de campaña con capacidad para 143 camas de medicina y 5 post operados no críticos.
- Los hospitales comunitarios de baja complejidad estuvieron operativos

#### *Región del Biobío*

- En la Región del Biobío cuatro helicópteros (Bell 412), estuvieron dispuestos para labores de rescate, sobrevuelos, traslado de elementos de ayuda, evacuación de heridos, etc. Asimismo se constituyó un Hospital de Campaña en la ciudad de Lota con una Escuadrilla de Despliegue Sanitario Aerotransportable Modular (ERSAM).
- Los pacientes de la Región de Bío-bío fueron derivados a los centros asistenciales de la Región de Los Lagos y Región de Los Ríos
- Los hospitales comunitarios de baja complejidad estuvieron operativos.
- Hospital de Chillán (Hermina Martín) presentó daños estructurales y se redujo a su capacidad de servicios de urgencia. Las camas de neonatología se redistribuyeron a otros edificios. Los pacientes fueron trasladados a Valdivia y Puerto Montt.
- El Hospital de San Carlos contó con los servicios de agua y luz pero presentó daños severos en el edificio. Fueron evacuados los servicios de urgencia, pabellones, servicios de cirugía, pediatría y maternidad.
- El Hospital "Víctor Ruiz" de Los Ángeles redistribuyó parte de las camas dentro del mismo establecimiento.
- El Hospital de Laja tuvo daños estructurales. Continuó funcionando sólo para servicios de urgencias y entrega de alimentos.
- El Hospital de Yumbel y de Huépil no presentaron daños estructurales, suspendieron consultas y sólo prestaron servicios de urgencia y de entrega de alimentos.
- En el Centro de Atención Ambulatorio se habilitó el servicio de urgencia.
- El Hospital de Coronel tuvo daños parciales que podrían ser recuperados en un corto plazo.
- El Hospital de Lota fue evacuado y funcionó en un colegio.
- Los hospitales "Higuera" de Talcahuano y el de Tomé quedaron sin abastecimiento de agua y energía eléctrica, pero pudieron continuar en funcionamiento.



- Los hospitales de Lirquén y Curanilahue tuvieron daños severos que requirieron evaluación.
- El hospital de Lebu quedó fuera de funcionamiento y fue evacuado en su totalidad; los servicios que se dejaron de cubrir se distribuyeron al hospital de Los Álamos;
- El Hospital de Tirúa estuvo inundado

#### *Región de La Araucanía*

- El Hospital de Angol sufrió daños considerables. Se evacuaron 80 pacientes, de los cuales 20 fueron trasladados al consultorio Piedra del Águila. El resto fue trasladado a sus domicilios.
- El antiguo hospital Hernán Henríquez Aravena sufrió daños considerables, en especial la rotura de muros, pisos y cañerías. Se evacuaron 450 pacientes a otros establecimientos clínicos y a nuevas dependencias del mismo hospital, que aún no habían sido inauguradas.
- El Hospital de Angol fue evacuado y sus pacientes se dirigieron al centro "Piedra del Águila" ubicado cerca al hospital.
- Los hospitales de mediana y baja complejidad de la región funcionaron sin problemas estructurales y con servicios básicos.
- El Hospital de Villarrica sufrió fisuras y grietas menores que requirieron la evaluación de los daños.
- El Hospital de Puerto Saavedra sufrió daños menores.

El gobierno y representantes de las cadenas de farmacias coordinaron el funcionamiento de estos establecimientos y el suministro de medicamentos en los lugares afectados. De la ayuda internacional se encontraron 3 hospitales de campaña, medicamentos y vacunas para el control de enfermedades y equipos de comunicación. Se instalaron puestos de atención médica de emergencia en Curicó y en Talca y hospitales de campaña en Chillán más otros 5 organizados por las fuerzas armadas. Se emplearon dos números telefónicos de emergencia como medio de información para resolver inquietudes de la población y orientar a los afectados a los centros asistenciales (Ministerio de Salud. Gobierno de Chile 2010).

#### *2.5.2 Evaluación de daños de los hospitales afectados por el terremoto de Pisco, Perú*

Para la evaluación de daños en el terremoto de Pisco, Perú, en el año 2007, grupos de evaluadores del EERI y de la Organización Panamericana de la Salud realizaron inspecciones detalladas de los hospitales afectados. De estas evaluaciones se encuentran descripciones de las tipologías estructurales y de los daños encontrados. La Figura 2-8 (a) presenta el mapa administrativo de Perú según departamentos; la Figura 2-8 (b) la ubicación de las ciudades de Ica, Pisco, Chíncha Alta y Chíncha Baja; la Figura 2-8 (c) presenta el Shakemap del evento.

En Ica, cuatro hospitales resultaron afectados. El Hospital Regional del Ica sufrió daños significativos; los tanques de agua se derrumbaron y causaron una inundación en el edificio (PAHO 2007). El Hospital tuvo que ser evacuado, sin embargo, la sala de emergencias continuó funcionando en el edificio. La Unidad de Cuidados Intensivos se trasladó a otra área dentro del edificio y se establecieron carpas en el patio del hospital para la atención ambulatoria. Este hospital estaba compuesto por 16 edificios, la mayoría diseñados y construidos en 1964. Geométricamente, el edificio del hospital tenía bloques de 4 plantas sobre rasante, en forma de T. Los muros de relleno y los acabados arquitectónicos sufrieron daños severos. Asimismo, debido a la falta de anclaje de las conducciones de líneas vitales y equipos mecánicos, estos elementos sufrieron daños extensivos (EERI 2007).

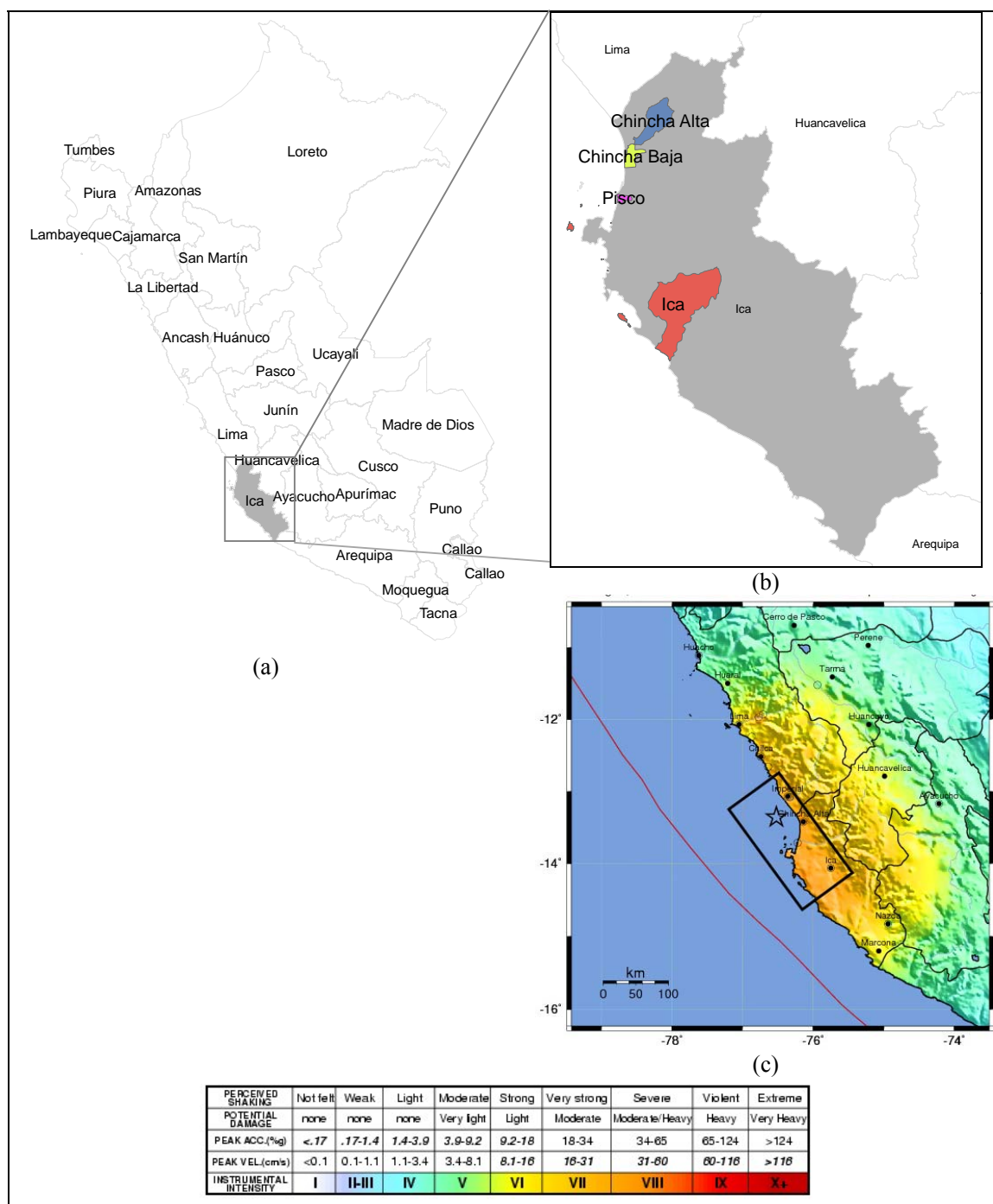


Figura 2-8 (a) Mapa administrativo de Perú según departamentos; (b) localización de las ciudades de Pisco, Ica, Chíncha Alta y Chíncha Baja, Departamento de Ica; (c) Shakemap del terremoto de Pisco, Perú 15 de agosto de 2007

Fuente USGS <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/global/shake/2007gbcv/download/intensity.jpg> [Última consulta 21/10/2011]

En Pisco, el Hospital San Juan de Dios sufrió 80% de daños en la estructura, tuvo escasez de agua y contó con energía eléctrica limitada sólo para las emergencias, por esta razón se tuvo que transferir 140 pacientes. Este hospital estaba compuesto por 8 edificios, dos de los cuales eran de muros de hormigón armado. La mayoría de los edificios originales eran estructuras rectangulares de un piso construidas hace más de 70 años. La única estructura original que no sufrió daños fue la cocina y sala de equipos

mecánicos. Luego del evento, se trasladaron camas y equipos médicos a los edificios más recientes (EERI 2007, PAHO 2007).

El Hospital de Antonio Skabronja (ubicado en Pisco) también tuvo daños severos y tuvo cortes de abastecimiento de agua y electricidad. La atención de pacientes se realizó en tiendas de campaña ubicadas en la Plaza de Armas de Ica (PAHO 2007).

El Hospital San José en Chincha Alta, el segundo más grande en la región, consistía de estructuras de un solo piso que habían sido reemplazadas como resultado de una evaluación sísmica previa. Varios edificios de adobe no intervenidos y usados para almacenamiento, morgue y como sala de generación de energía eléctrica en emergencia, tuvieron colapsos parciales. Por esta razón, el hospital tuvo que pedir prestado un nuevo generador de electricidad. Otros edificios construidos en 1989, ya con requerimientos sísmicos, tuvieron buen comportamiento. Debido a la falta de anclaje de elementos no estructurales y equipos, estos tuvieron daños considerables. El hospital quedó sin oxígeno, electricidad y agua durante varios días. Los pacientes tuvieron que permanecer fuera y luego ser trasladados a otro edificio (EERI 2007).

### 2.5.3 Evaluación de los daños del colegio San Giuliano afectado en el terremoto de Molise, Italia

Para la evaluación de daños en el terremoto de Molise, Italia en el año 2002, grupos de evaluadores del EERI realizaron inspecciones detalladas de las escuelas afectadas (EERI 2003). De estas evaluaciones se encuentran descripciones de las tipologías estructurales y de los daños encontrados. La Figura 2-8 presenta el mapa de organización administrativa de Italia (a) y el Shakemap del evento (b).

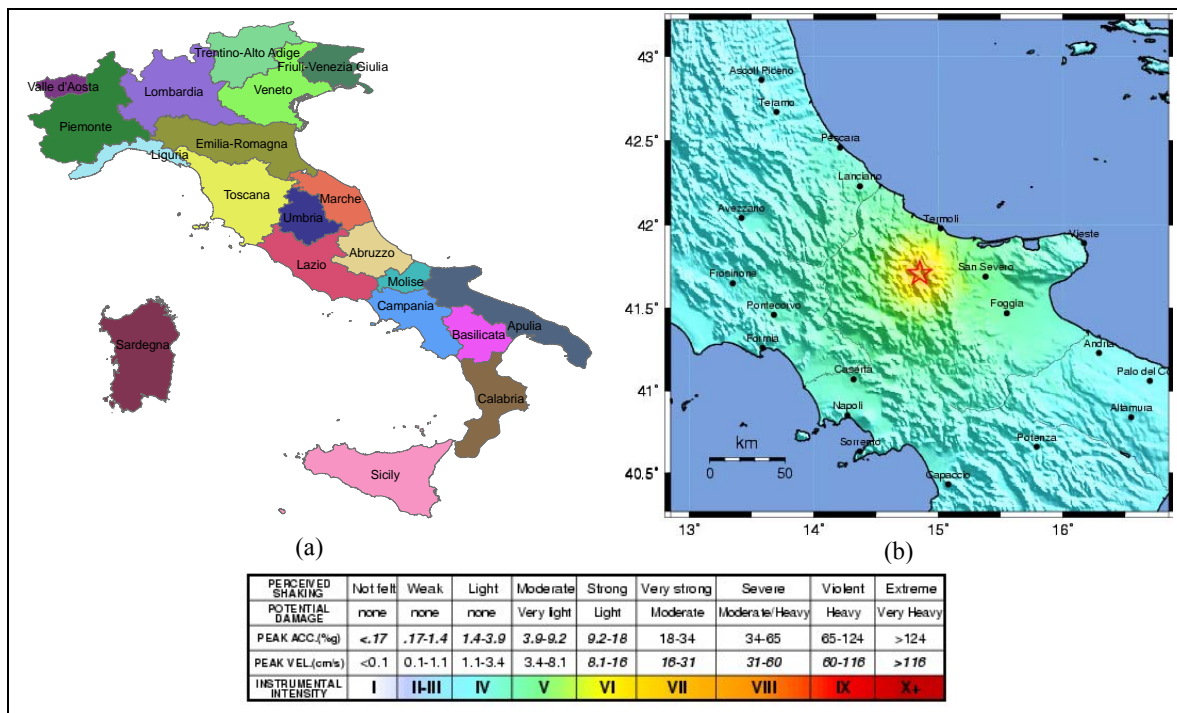


Figura 2-9 (a) Mapa administrativo de Italia; (b) Shakemap del terremoto de Molise, Italia, 31 de octubre de 2002

Fuente USGS <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/shakemap/atlas/shake/200211011509/>  
[Última consulta 21/10/2012]

El colegio de San Giuliano puede considerarse como un ejemplo de una construcción mixta de mampostería y hormigón. La primera fase de la escuela fue construida en 1953 como un edificio de un solo piso con planta en forma de “L” de muros de mampostería no reforzada. En 1970, se añadió la segunda planta en un lado de la “L” con un piso de hormigón armado y muros de mampostería. En abril

de 2002 se añadieron más aulas en una esquina del edificio. El principal inconveniente de esta construcción por fases está en no considerar el refuerzo de los muros de las plantas bajas ni provisiones sísmicas en su ejecución. Ya que la zona, antes del evento, no estaba identificada como una zona de alta sismicidad, el reforzamiento no se había considerado necesario (Decanini et al. 2003).

## 2.6 Planes para la reducción del riesgo en edificios y sistemas esenciales

### 2.6.1 Instalaciones de salud

En los últimos años, la Organización Mundial de la Salud ha promovido la campaña hospitales seguros ante desastres. Dicha campaña invita a los gobiernos a definir políticas y programas de reducción de la vulnerabilidad de las instalaciones de salud, en las cuales se fomente el diseño sísmoresistente de los nuevos hospitales, así como el reforzamiento estructural y no estructural de los existentes. Esta campaña toma como referencia las pérdidas directas e indirectas durante eventos desastrosos para así presentar la prevención como una actividad rentable, considerando otros factores sociales, sanitarios y económicos que justifican las inversiones<sup>10</sup>.

En el documento ATC 51-1(2002) se presenta un conjunto de recomendaciones a corto y largo plazo para mejorar la seguridad sísmica de los hospitales en Italia, enfocadas hacia el diseño sísmico, la evaluación de la vulnerabilidad y el reforzamiento de hospitales, así como hacia la preparación de procedimientos de respuesta y desarrollo de inventarios de datos. Tales recomendaciones consideran la amenaza sísmica de la región, las características de los edificios, su comportamiento en terremotos pasados y las normativas existentes para su diseño y construcción. En la Tabla 2-6 se resumen las recomendaciones a corto plazo en y en la Tabla 2-7 se resumen las recomendaciones a largo plazo.

**Tabla 2-6 Recomendaciones de corto plazo para la intervención en hospitales**

	Recomendaciones de corto plazo	Aplicable a
1	Establecer revisiones consistentes y refuerzos de la calidad del diseño y construcción, empezando con la preparación de guías específicas para tal revisión	Edificios nuevos y existentes
2	Evaluar las opciones para los programas de reducción de riesgos sísmicos, incluyendo los objetivos de desempeño, las estrategias de largo plazo y los programas posibles de reforzamiento sísmico activo o pasivo.	Edificios nuevos y existentes
3	Implementación de anclajes y arriostramientos para las nuevas instalaciones y para los sistemas no estructurales	Edificios nuevos y remodelaciones
4	Restringir el uso de mampostería no reforzada en los sistemas resistentes a cargas de nuevos edificios según la sismicidad de la zona de emplazamiento	Edificios nuevos y remodelaciones
5	Mejorar el inventario de datos de los sistemas estructurales mediante la recolección y documentación en vulnerabilidad sísmica	Edificios existentes
6	Desarrollo de planes para la respuesta a emergencias y para la inspección post evento.	Edificios nuevos y existentes.

**Tabla 2-7 Recomendaciones de largo plazo para la intervención en hospitales**

	Recomendaciones de largo plazo	Aplicable a
1	Establecer un plan activo para el arriostramiento de elementos no estructurales	Edificios existentes
2	Mejorar las provisiones de los códigos sísmicos para nuevos edificios	Edificios nuevos
3	Unir los códigos de diseño sísmico al diseño basado en comportamiento	Edificios nuevos y remodelaciones
4	Llevar a cabo inspecciones rápidas de la vulnerabilidad sísmica de los hospitales en forma sistemática para un programa activo de reforzamiento sísmico	Edificios existentes

<sup>10</sup> Para mayor información consultar:

[http://safehospitals.info/index.php?option=com\\_content&task=view&id=109&Itemid=167&lang=spanish](http://safehospitals.info/index.php?option=com_content&task=view&id=109&Itemid=167&lang=spanish)  
[Última consulta 10/11/2012]

Lee et al. (2001) proponen un enfoque multidisciplinar para desarrollar actividades de reforzamiento de hospitales en zonas de baja a moderada sismicidad. En este análisis se integran la amenaza sísmica, la vulnerabilidad estructural y no estructural, diferentes tasas de llegada de pacientes con diferentes grados de afectación y la disponibilidad de recursos para su tratamiento, con el fin de evaluar el flujo de pacientes y el tiempo de espera. Estas variables de decisión son útiles para estimar relaciones de beneficio-costos sobre las que se fundamenten la toma de decisiones y las inversiones para el reforzamiento de los hospitales.

En el caso de zonas de alta sismicidad, se da por hecho que deben realizarse actividades de reducción de la vulnerabilidad de los hospitales y el problema consiste en cómo realizarlas de la manera más efectiva posible (Lee et al. 2001). Por ejemplo, en el caso de California, dada la experiencia del terremoto de Northridge en 1994, la ley SB 1953 (1994) obliga a los administradores de aquellos hospitales construidos antes de 1973 a que garanticen que la infraestructura cumpla con los actuales estándares de seguridad sísmica y funcionalidad. El plazo estipulado para cumplir este mandato es el año 2030 y no existe apoyo financiero para ayudar a que las organizaciones de salud lo cumplan. Dadas las dificultades financieras de la operación de los centros hospitalarios, los administradores de servicios consideran seriamente la posibilidad de no alcanzar este mandato en el plazo previsto por no contar con los recursos suficientes, lo que podría implicar el cierre de algunas instalaciones y como consecuencia reducir la oferta de servicios médicos a la población (Alesch y Petak 2004).

Ante las restricciones de presupuestos y los elevados costos de las intervenciones, debe considerarse cuáles son las fuentes disponibles para realizar las actividades de reforzamiento. Teniendo en cuenta que los edificios se deterioran y deprecian a lo largo de su vida útil, los fondos para el reforzamiento de los hospitales pueden obtenerse de ahorros programados para el mejoramiento y renovación de la infraestructura existente. Por otro lado, si se utilizan créditos, aún si son de bajo interés, es posible que la situación financiera de las instituciones sea una limitante para asumir más gastos de capital y pagos de deuda. Como agravante, los usuarios pueden llegar a ser quienes financien las actividades de mitigación si se aplican cargos extras a los pagos que realizan por los servicios de salud. (Alesch y Petak 2004).

De esta manera, la campaña mundial de hospitales seguros ante desastres, así como la normativa SB 1953 (1994) de California y en general, cualquier norma que busque alcanzar un nivel de seguridad, al aplicarse se enfrenta a dificultades según la percepción del riesgo y las condiciones socioeconómicas de la región. La ocurrencia de desastres y las pérdidas de las instalaciones de salud han hecho que exista voluntad política para enfrentar esta problemática y optar por medidas de reducción de riesgos. Para lograr satisfactoriamente su ejecución se requiere encontrar alternativas de financiación y desarrollar un proceso de evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de las instalaciones en múltiples etapas de complejidad a diferentes escalas; es decir, a escala local, regional, nacional y supranacional.

En Chile, como consecuencia de los efectos del sismo de 1985 sobre los establecimientos de salud, se decidió realizar un programa de identificación y evaluación de la vulnerabilidad hospitalaria con el fin de elaborar una priorización y mitigación del riesgo de su infraestructura. Así, se seleccionó una muestra y se realizó un análisis sistemático sobre el grupo de edificaciones considerando aspectos estructurales, no estructurales, organizacionales y funcionales. Similar al caso chileno, En Ecuador, en el estudio denominado “Vulnerabilidad sísmica de estructuras importantes de la ciudad de Guayaquil” se evaluó la vulnerabilidad de los hospitales de la ciudad teniendo en cuenta que son estructuras críticas para el manejo de emergencias. En el proyecto se evaluaron 12 hospitales de forma cuantitativa y otros 8 de forma cualitativa. De igual manera, en Costa Rica, en 1984 se iniciaron proyectos de investigación sobre la vulnerabilidad de todos los hospitales del país a cargo de la Universidad de Costa Rica y con fondos del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (OPS 1999).

En Colombia, la norma de Construcción Sismo Resistente NSR 98 (Ley 400 de 1997, Decreto- Ley 33 de 1998) estableció la obligatoriedad de la evaluación de la vulnerabilidad y reforzamiento adecuado de los edificios indispensables, a los cuales pertenecen los hospitales de mayor nivel de complejidad localizados en las zonas de mayor amenaza sísmica. Esto implicó la asignación de presupuestos de los gobiernos departamentales y municipales para alcanzar los estándares de seguridad establecidos.

No obstante, con anterioridad a la norma sísmica, ya se encontraban ejemplos en el estudio de la vulnerabilidad de instalaciones de salud. Tal es el caso del hospital Ramón González Valencia, construido a principios de los años 50 en la ciudad de Bucaramanga y significativamente vulnerable a sismos dada la inexistencia de restricciones de diseño para este tipo de eventos durante la época de su diseño. En 1996, el ministerio de Salud obtuvo recursos para financiar los estudios de vulnerabilidad del hospital tanto estructural como no estructural y se consideró como un ejemplo para el desarrollo de estas prácticas en Bogotá y Manizales (OPS 1999).

En cuanto a la seguridad que se exige en el reforzamiento de los edificios, en la actual norma de construcción sismo resistente (NSR -10), se introduce el nivel de seguridad limitada como alternativa para los edificios construidos antes de 1998. Este nivel de seguridad corresponde a eventos de periodo de retorno de 225 años (probabilidad del veinte por ciento de ser excedidos en un lapso de cincuenta años) y se considera como un estándar menos exigente y de más fácil acceso: si el cumplimiento de un estándar de seguridad mayor no es factible por la disponibilidad de recursos, el nivel de seguridad limitada se considera como una solución a este inconveniente.

### *2.6.2 Centros educativos*

Ante emergencias y desastres, los centros educativos son considerados como instalaciones alternativas para establecer centros de evacuación, clínicas de emergencia médica, estaciones de abastecimiento y alojamientos temporales, entre otras funciones. Además de ser útiles en situaciones de emergencia, las instalaciones educativas juegan un rol vital en toda comunidad y contribuyen al desarrollo humano. En este sentido, la mitigación del riesgo sísmico en escuelas representa la disminución de efectos indirectos en el sector educativo.

La Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres (EIRD), en cooperación con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO por su sigla en inglés), coordinó en el periodo 2006-2007 la campaña “La reducción del riesgo inicia en la escuela” buscando promover la integración de la gestión del riesgo en el currículo de las escuelas así como el desarrollo de intervenciones estructurales para disminuir la vulnerabilidad (Fujieda et al. 2008).

El Centro Regional para el Desarrollo de Naciones Unidas promovió durante el año 2008 la iniciativa de Seguridad Sísmica de las Escuelas, a través del proyecto, “Reduciendo la vulnerabilidad de niños en Escuelas a Terremotos” en la región de Asia y el Pacífico. Este proyecto incluyó el reforzamiento de escuelas con la participación de comunidades y gobiernos locales y el entrenamiento de técnicos en prácticas de construcción. Las escuelas se priorizaron de acuerdo a su ubicación, el tipo de construcción y su vulnerabilidad así como su potencial para funcionar como un centro de servicios durante la atención de emergencias (Fujieda et al. 2008). En los últimos años, la EIRD promovió la campaña, “Un millón de escuelas y hospitales seguros” la cuál es una iniciativa global para hacer estas instalaciones más seguras ante desastres, como parte del programa “Construyendo ciudades resilientes” (ISDR 2010).

En Italia, después del terremoto de Molise, por interés de la autoridad regional, el Consejo Nacional de Investigación y el Instituto de Tecnologías de Construcción de L’Aquila, prepararon guías para la evaluación de la vulnerabilidad de escuelas, un conjunto de formularios<sup>11</sup> y bases de datos con la información necesaria para el análisis. Se desarrolló un estudio de priorización de las escuelas a intervenir en la región. Este estudio implicó la recopilación de datos administrativos y la investigación de las propiedades geotécnicas, geológicas y estructurales consideradas útiles para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo del conjunto de edificios. En este estudio se identificaron posibles mecanismos de colapso, se realizaron análisis de las estructuras bajo modelos simplificados y se establecieron medidas de la resistencia sísmica de cada edificio (Martinelli et al. 2008).

---

<sup>11</sup> El proyecto, los formularios y las metodologías de análisis se encuentran en los siguiente vínculos:  
<http://archivio.pubblica.istruzione.it/argomenti/edilizia/anagrafe.htm> [Última consulta 21/10/2012]  
[http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe\\_edilizia\\_scolastica.html](http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe_edilizia_scolastica.html) [Última consulta 21/10/2012]

El ministerio de educación de Italia realizó encuestas a todas las escuelas<sup>12</sup> recopilando información relacionada con la identificación de la institución, ubicación, seguridad del entorno en cuanto a eventos de origen tecnológico o industrial, año de construcción y transformaciones, el cumplimiento de normas de seguridad en el interior del edificio, características funcionales y dimensiones de los espacios, número de plantas, la tecnología de construcción prevalente y material de particiones entre otras características (Casciati et al. 2004).

En cuanto a los métodos empleados para evaluar la vulnerabilidad, se señala que el uso de metodologías sofisticadas implica la disponibilidad de información, tiempo y recursos económicos que las hacen poco factibles (Casciati et al. 2004). Así, los enfoques simplificados en los que se puede obtener una puntuación de la seguridad son útiles cuando se debe afrontar un problema con un gran volumen de edificios. Por esta razón son deseables procedimientos que balanceen el nivel de detalle del estudio con la extensión de los elementos analizados, con el fin de establecer prioridades de intervención, así como el análisis de medidas de rehabilitación.

En este sentido, Grant et al. (2007) presentan una metodología de múltiples niveles para la priorización de la intervención sísmica de centros educativos en Italia. Esta metodología se inicia con índices basados en el PGA, índices de vulnerabilidad (Benedetti and Petrini 1984), métodos simplificados de propiedades mecánicas basados en información básica de los materiales y geometría. El último nivel de esta metodología se basa en la definición de curvas de capacidad propias para cada estructura y su comparación con la demanda de desplazamiento. En Crowley et al. (2008) se presentan algunas modificaciones y aplicaciones de esta metodología.

Martinelli et al. (2008) introducen en estos procedimientos criterios asociados a los costos de intervención. Estos costos se estiman en términos del área de los edificios, el número de estudiantes, el número de aulas y el nivel de instrucción. Para afinar la priorización y la distribución de recursos las escuelas fueron agrupadas de acuerdo a las puntuaciones de riesgo obtenidas y dentro de cada grupo, se categorizaron de acuerdo al número de alumnos.

Ferreira et al. (2008) y Ferreira y Proença (2008) presentan la estimación del daño de centros educativos en la Isla Faial (Portugal) y en Bucarest, respectivamente. En estos estudios, la peligrosidad sísmica se evalúa siguiendo la escala macrosísmica EMS 98 para periodos de retorno específicos. Los edificios se clasifican en clases de vulnerabilidad. El grado de daño medio de cada edificio se estima siguiendo el índice de vulnerabilidad propuesto por Giovinazzi y Lagomarsino (2004).

En el caso de Bucarest, para la recopilación de la información se preparó una encuesta que se divulgó a través de un sitio en Internet. Dicha encuesta está compuesta por 9 componentes en los cuales se recogió información general de la escuela (nombre, dirección), así como propiedades de las áreas externas, las propiedades de cada estructura que compone el edificio, las características de las áreas de deporte, de la disponibilidad de líneas vitales, las condiciones de habitabilidad, como por ejemplo, la ventilación y el aislamiento térmico y acústico, y las condiciones de seguridad relacionadas con las rutas de evacuación y la existencia de extintores contra incendios, entre otros (Ferreira y Proença 2008).

En Estambul, el colapso del dormitorio de la escuela primaria Çeltiksuyu en Bingöl, en el año 2003, así como los efectos sobre los alumnos, motivaron a que el gobierno local adoptara el proyecto “Proyecto de Preparación de emergencias y mitigación del Riesgo Sísmico en Estambul” (ISMEP por su sigla en Inglés). Se realizó una inspección de cada instalación (cerca de 70 edificios) para obtener su esquema estructural, el tamaño de los elementos, la geometría y las propiedades de los materiales. La evaluación se realizó tomando como referencia el código de sismoresistencia de Turquía. Para el conjunto de instalaciones se obtuvo un índice de capacidad, comparando la capacidad a cortante en la base del edificio

<sup>12</sup> Ver: “Questionario Sede Scolastica”, disponible en:

[http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe\\_edilizia\\_scolastica/M1\\_QuestionarioSedeScolastica.pdf](http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe_edilizia_scolastica/M1_QuestionarioSedeScolastica.pdf)  
[Última consulta 21/10/2012].

Ver: “Questionario Edificio”, disponible en:

[http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe\\_edilizia\\_scolastica/M3\\_QuestionarioEdificio.pdf](http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe_edilizia_scolastica/M3_QuestionarioEdificio.pdf)  
[Última consulta 21/10/2012]

con la demanda a cortante estimada con el código sismoresistente. A su vez, se desarrollaron análisis lineales y no lineales a partir de los cuales se establecieron criterios para identificar las necesidades y alternativas de rehabilitación, así como para servir de soporte para optar por la demolición de los edificios. Para la evaluación del estado de ocupación inmediata, se emplearon los espectros de respuesta elástica correspondientes a un periodo de retorno de 475 años. Para el de seguridad de la vida, éste se amplificó por un factor de 1.5 para representar un escenario de 2475 años de periodo de retorno (Yakut et al. 2008).

En Venezuela, se llevó a cabo un programa nacional con el fin de evaluar y reducir el riesgo de los centros educativos del país. En este proyecto participaron la Universidad Central de Venezuela, el Ministerio de vivienda y hábitat y la fundación venezolana para la investigación sismológica con la financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Los objetivos del programa eran identificar los edificios de mayor edad y completar información básica sobre las propiedades estructurales que influyen en el comportamiento sísmico para cerca de 28000 escuelas en el país; estimar las pérdidas y heridos por eventos probables; inspeccionar 250 escuelas ubicadas en zonas de alta amenaza; calificar de acuerdo al grado de daño medio cada edificio, evaluar en forma detallada 10 tipologías estándar de escuelas, las cuales fueron identificadas como proyectos piloto; desarrollar las alternativas óptimas de reforzamiento; instalar acelerómetros en cuatro escuelas y por último desarrollar una guía para reducir la vulnerabilidad no estructural, las cuales fueron difundidas a la comunidad (López et al. 2008).

El ministerio de educación llevó a cabo el Censo Nacional de Escuelas en el año 2006; la información fue recolectada por 4000 estudiantes propiamente instruidos con la intención de completar información general sobre la escuela, así como información básica como el año de construcción, el número de pisos, la ubicación, la población y el tipo estructural. Éste último campo fue identificado con la ayuda de dibujos y fotografías que describían las técnicas de construcción representativas de la región. El censo del periodo 2007-2008 abarca información similar y ha sido difundida a través de Internet y está actualmente en proceso (López et al. 2008).

Los daños de los edificios se evaluaron usando curvas de fragilidad que relacionan la probabilidad de exceder un determinado estado de daño según el PGA al cual está expuesto el edificio. Los costos de intervención se obtuvieron como el producto entre el grado de daño normalizado y el valor del edificio. A su vez se consideraron el nivel de instrucción y un factor de importancia social. Para la estimación del número de alumnos heridos se utilizaron las tasas de fatalidad sugeridas en el ATC 13 (ATC 1985), considerando el caso cuando las instalaciones están completamente ocupadas (López et al. 2008, López et al. 2007). En el caso de los análisis detallados, las aceleraciones pico del terreno se amplificaron por un factor de 1.3 de acuerdo a los parámetros de diseño de las escuelas en la norma sismoresistente Covenin 1756-1 (López et al. 2008)

En Colombia, la secretaría de Educación de Bogotá contrató un estudio para identificar las condiciones estructurales de centros educativos públicos. Se seleccionaron 710 instalaciones; la mayoría construidas hacia el año 1960 sin consideraciones sismoresistentes. La vulnerabilidad de los edificios se evaluó usando índices de capacidad y de deriva basados en estimaciones aproximadas del cortante, de las cargas verticales y de información básica en cuanto a la geometría y configuración del sistema estructural (Proyectos y Diseños – P&D 2000). Del estudio se encontró que 434 tenían una alta vulnerabilidad. Debido a los altos costos implicados en la reducción de la vulnerabilidad y en la reubicación de dichas instalaciones, las más críticas (cerca de 201) fueron declaradas prioritarias (Coca 2006). Con el respaldo del Banco Mundial, se aprobó un crédito para la reducción de la vulnerabilidad sísmica de los edificios más vulnerables. El objetivo del proyecto fue el refuerzo de los centros de educación no sólo para cumplir con los requisitos de seguridad de estos edificios, sino también para mejorar la infraestructura educativa. Adicionalmente, el programa se basó en la implementación de una estrategia pedagógica para incorporar la gestión del riesgo en la cultura. Estos objetivos estructurales y no estructurales fueron integrados para conseguir que las escuelas fueran buenas, confortables y seguras, con altos niveles de servicio a la vez que un aumento de la cobertura de la educación.



## **2.7 Resumen y discusión**

En este capítulo se ha presentado una síntesis de los daños ocurridos en hospitales y escuelas por terremotos en el período 2002-2011 identificando, en lo posible, el comportamiento de las estructuras, la severidad de los daños y la pérdida de funcionalidad de estas instalaciones. Adicionalmente, se han resumido diversas iniciativas regionales y locales que se han desarrollado para reducir la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de este tipo de edificios.

De acuerdo a los registros del servicio geológico de Estados Unidos, en promedio, cada año ocurren 134 eventos de magnitud entre 6 y 6.9, 17 de magnitud entre 7 y 8 y 1 de magnitud mayor a 8. Al comparar la serie de eventos de magnitud mayor o igual a 6.5 con la serie de desastres sísmicos registrados en la base de datos EM-DAT se observa que existen coincidencias entre estas series. Así, cualquier evento de magnitud mayor o igual a 6.5, que ocurra en entornos densamente construidos y de alta vulnerabilidad, puede considerarse como un evento cuyas pérdidas potenciales son considerables.

El rápido crecimiento de la población a partir de 1950, en especial en regiones en desarrollo, ha implicado que parte de la infraestructura que ahora se emplea no haya sido diseñada con criterios y requisitos sismoresistentes. Al no ser renovada o rehabilitada para cumplir estándares de seguridad aceptados, ésta ha permanecido expuesta a la ocurrencia de terremotos con la misma vulnerabilidad.

En desastres sísmicos ocurridos en el periodo 2002 -2011 resultaron afectados tanto hospitales como escuelas. De la información obtenida se observa que cada desastre tiene aspectos particulares y no siempre se encuentran disponibles reportes para describir los daños estructurales, no estructurales y funcionales. Así, de la observación en conjunto de estos desastres es posible obtener una idea más completa de la problemática en estas instalaciones en cuanto a los daños observados, la organización para la respuesta a emergencia y las previsiones de seguridad existentes.

Frente a la seguridad sísmica de los edificios esenciales, se señala que la falta de previsiones sismoresistentes tiene serias consecuencias como los daños generalizados en Haití luego del terremoto. Así mismo, los daños ocurridos en escuelas en los terremotos de Cachemira, Sichuan y Molise han sido fuertes llamados de atención para continuar promoviendo la seguridad de estos edificios y garantizar la vida de los niños.

En zonas de alta sismicidad como el caso de Chile, se observa que debe revisarse la efectividad y vigilar la aplicación de las medidas de mitigación del riesgo en edificios esenciales. En este país se desarrolló un proyecto de reducción de la vulnerabilidad de hospitales como respuesta a los daños causados por el terremoto de 1985. En el terremoto de 2010 cerca del 10% de las instalaciones de salud del área mesosísmica, resultaron fuertemente averiadas, lo cual muestra que si bien se había logrado reducir la vulnerabilidad de estas instalaciones, aún se presentaron pérdidas notables.

En zonas de baja a moderada sismicidad, la protección de edificios esenciales debe ser también considerada una prioridad. En el caso del terremoto Molise, la falta de previsiones sismoresistentes durante los procedimientos de ampliación de la escuela de San Giuliano fue la principal causa de que el edificio no tuviera un comportamiento adecuado durante el evento.

Los daños por terremotos en edificios construidos recientemente y sobre los cuales se han exigido diseños sismoresistentes llevan a preguntarse cuáles han sido los motivos de su falla, como en el caso del Hospital afectado en el terremoto de L'Aquila y los edificios construidos recientemente en Sichuan. En el caso del terremoto de China, el desastre se puede explicar en parte por la magnitud del evento, la cual sobrepasó las previsiones de los códigos de construcción hasta la fecha aplicados en la zona más cercana al epicentro. En la evaluación de daños se señala que en las zonas en las cuales la demanda sísmica alcanzó niveles similares a los considerados en el código sismoresistente, los edificios tuvieron un adecuado comportamiento. Este ejemplo muestra que la aplicación de una normativa sismoresistente no puede calificarse como un esfuerzo en vano y que la definición de los niveles de seguridad, así como la de los niveles de peligrosidad, están sujetas a incertidumbres. A su vez, la aplicación de los códigos

sismoresistentes requiere de adecuadas capacidades técnicas para la construcción de los proyectos y de una constante vigilancia y control de calidad en los procedimientos de obra.

En cuanto al comportamiento de las tipologías estructurales, en los reportes de evaluación de daños se observa un conjunto de deficiencias estructurales que han sido identificadas años atrás. Así, se encuentra repetitivamente que los edificios de adobe son muy vulnerables, (como en el caso de Pisco en Perú) así como los edificios de mampostería no reforzada. Así mismo, se señalan las deficiencias estructurales por pilares cortos, irregularidades en planta y en altura, la falta de confinamiento en los nudos y columnas, los daños en los muros de relleno de edificios de pórticos resistentes a momento y la pobre calidad de los materiales. De esta manera, hace falta llevar a cabo intervenciones que corrijan estos problemas de acuerdo a los criterios de seguridad adoptados. Esto implica realizar esfuerzos sobre identificación y percepción del riesgo y búsqueda de alternativas para la financiación de estos proyectos.

Igualmente, las estructuras construidas con técnicas de construcción tradicionales y/o por etapas han sido seriamente afectadas por los terremotos, como se observa en los casos de los terremotos de Perú en el año 2007, Sichuan en 2008, Sumatra en 2005, Iran en 2003 e Hindu Kush en 2002. Estas técnicas por lo general corresponden a comunidades de bajos recursos, lo cual muestra cómo el contexto económico restringe la construcción de estructuras seguras y que como consecuencia de los desastres, se pueden desencadenar también importantes crisis y emergencias sociales, como por ejemplo en el caso de Perú en el terremoto de 2007.

En cuanto al tipo de daños en hospitales, los casos de estudio presentados en este capítulo han permitido observar problemas asociados con los daños no estructurales y con la capacidad de organización de espacios tanto internos como externos para que se continúen prestando los servicios médicos, así como al traslado de pacientes a otras instituciones. En lo que respecta a la funcionalidad de los hospitales, se resalta la importancia de reducir la vulnerabilidad de las estructuras en las cuales se encuentran los equipos relacionados con las líneas vitales para así evitar interrupciones en el servicio.

En cuanto a la atención de la emergencia, se resalta la necesidad de coordinación entre diferentes instituciones (gubernamentales, cruz roja, ejército, Organizaciones no Gubernamentales) para garantizar inventarios y logística de medicamentos, de materiales y de personal, necesarios para la respuesta inmediata y el control de enfermedades. Así mismo, es de gran importancia contar con grupos de evaluadores de daños que puedan realizar inspecciones rápidas para verificar la seguridad de la ocupación y de funcionamiento de los hospitales y escuelas luego de un evento y tomar decisiones de evacuación. En cuanto a la financiación de la emergencia, así como en referencia a la posterior reconstrucción, se observa la importancia que tiene el diseño, disposición y administración de fondos de emergencia que permita a los gobiernos y a los agentes de protección civil tener rápido acceso a recursos.

En el caso de los hospitales, la Organización Mundial de la Salud, basada en los daños ocurridos por desastres sísmicos, ha elaborado guías y series de publicaciones enfocadas a la mitigación de riesgos en estas instalaciones, considerando aspectos estructurales y no estructurales, así como los preparativos para la respuesta a la emergencia. Por otro lado, diferentes centros de investigación han producido guías técnicas y recomendaciones para las estrategias y técnicas de la rehabilitación a corto y largo plazo de estos edificios, así como marcos metodológicos para evaluar la vulnerabilidad y riesgo y relaciones de beneficio-costos de las acciones e intervenciones orientadas a la mitigación de pérdidas. El hecho que aún sigan presentándose daños muestra que existen dificultades para la aplicación de estos programas de intervención, ya sea por la percepción del riesgo de los gobiernos, la falta de organización y recursos para ejecutarlos, los plazos que se tienen para alcanzarlos y las condiciones de vulnerabilidad social del contexto.

En cuanto a los planes para la reducción del riesgo en los centros educativos, diversos gobiernos, motivados por los severos efectos de los terremotos en estas instalaciones, han adoptado programas de identificación de riesgos y de reducción de la vulnerabilidad de estos edificios. En estos programas se busca establecer prioridades de intervención, evaluar las posibilidades de reforzamiento y decidir si el edificio debe ser intervenido o derrumbado. Uno de los problemas a los que se deben enfrentar este tipo de planes es el extenso número de elementos expuestos. Razón por la cual se han establecido encuestas y

mecanismos para la recopilación de la información haciendo uso de sitios en internet. Con la información disponible, se han aplicado métodos simplificados para la evaluación de la vulnerabilidad que permiten obtener una primera aproximación al problema. No obstante, se resalta que estos análisis deben realizarse sólo con fines indicativos y que la definición de medidas de reforzamiento y de la priorización de intervenciones debe estar fundamentada en análisis más detallados y de carácter probabilista.

De la revisión de los daños en escuelas y hospitales en eventos sísmicos, se concluye que la gestión del riesgo debe considerarse como un proceso de decisión sobre la seguridad de la infraestructura expuesta en un ambiente incierto. De las experiencias presentadas, se concluye que las instalaciones educativas y de salud en muchas ocasiones representan complejos de edificios construidos en diferentes épocas y sobre los cuáles eventualmente se realizan modificaciones arquitectónicas o estructurales para adecuar sus espacios de acuerdo a los servicios que ofrecen. De esta manera, la seguridad de estas instalaciones está asociada tanto a un marco temporal como a un contexto socioeconómico. A pesar de los esfuerzos en la modelación de las amenazas, en el conocimiento de las condiciones de vulnerabilidad y en la progresiva intervención en la infraestructura, aún persisten pérdidas considerables en estas instalaciones. A este respecto, White et al. (2001) presentan 4 posibles explicaciones para la situación en la cual se pierde más, al tiempo que más se conoce. Entre las alternativas se apuntan: 1) que el conocimiento aún continúa siendo insuficiente; 2) el conocimiento esté disponible pero no sea usado efectivamente; 3) el conocimiento sea usado efectivamente pero toma bastante tiempo para ver sus efectos; y por último, 4) el conocimiento es usado efectivamente pero es sobrepasado por los incrementos de la vulnerabilidad, de la población, así como por la falta de bienestar y de riqueza. Estas cuatro hipótesis pueden aplicarse al caso de las pérdidas por terremotos en edificios esenciales y sobre éstas deben plantearse alternativas que permitan administrar apropiadamente su seguridad.



## **3 Evaluación de la seguridad y del riesgo sísmico de los edificios y sistemas esenciales**

### **3.1 Introducción**

Después del terremoto de Long Beach en 1933, en el cual la mayoría de las escuelas resultaron seriamente afectadas, el estado de California promulgó una legislación para evitar efectos similares o peores en futuros terremotos. Por otro lado, el terremoto de San Fernando en 1971, el cual afectó la mayoría de los centros de salud de la región, implicó la definición de otros niveles de comportamiento para asegurar la operación de los hospitales después de un evento sísmico considerable. En 1960, con la introducción progresiva de centrales de energía nuclear, la Comisión Reguladora de energía nuclear de Estados Unidos formuló también nuevos objetivos de comportamiento. De esta manera, la reacción ante los daños observados/estimados ha hecho que evolucionen y se amplíen los objetivos en el diseño de la infraestructura (Hadjian 2002).

Dados los diferentes requisitos en el diseño (como preservar la vida o mantener el funcionamiento de las instalaciones) los edificios han sido clasificados según su importancia en los códigos de construcción sismoresistente, con el fin de establecer la cantidad de seguridad que se desea proveerles, así como las orientaciones para la reducción de su vulnerabilidad.

En esta clasificación, se han incluido la categoría “edificios esenciales”, los cuáles son caracterizados por su valor económico, por la importancia de sus servicios en los momentos de emergencia, por su potencial para generar nuevas crisis derivadas de su falla, así como por los efectos sociales asociados a su pérdida. Estas características no son sencillas de evaluar ni tampoco son medibles en las mismas unidades (por ejemplo en términos económicos), razón por la cual las soluciones prácticas suelen estar basadas en la definición de categorías de importancia.

Con el fin de establecer un marco metodológico para la toma de decisiones frente al riesgo sísmico vinculado a los edificios y sistemas esenciales, en este Capítulo se realiza una revisión de los métodos de evaluación del comportamiento y riesgo sísmico de edificios, adoptando un análisis de seguridad y planteando un análisis de costos en el cual se identifiquen los valores por los cuales se consideran esenciales. De esta manera es posible mantener un balance entre el concepto de edificios y sistemas esenciales y las herramientas de cálculo disponibles para el análisis de su seguridad.

### **3.2 Requisitos de seguridad en el diseño basado en comportamiento y en los códigos de construcción sismoresistentes**

#### *3.2.1 Diseño basado en comportamiento*

El diseño basado en comportamiento (Performance-Based Design, PBD) es una filosofía en la cual los criterios de diseño se expresan en términos de un cierto nivel de comportamiento esperado para un determinado nivel de amenaza o peligrosidad (Ghobarah 2001). Los niveles de comportamiento están definidos por límites en los esfuerzos, desplazamientos, u otro parámetro de respuesta de la estructura.

El comité VISION 2000 (SEAOC 1995) definió el marco metodológico para el diseño de las estructuras de acuerdo a un conjunto de niveles de comportamiento. En la Tabla 3-1 se presentan los niveles de comportamiento establecidos, así como el estado de daño y los requisitos de deriva asociados.

**Tabla 3-1 Descripción de los niveles de comportamiento**

Nivel de comportamiento	Grado o nivel de daño	Descripción	Estado de daño	Máxima deriva de piso permisible $\delta$ (%)
Totalmente operacional	Nulo	Servicio continuo. Sin daño estructural y sin daño no estructural	Sin daño	$\delta < 0.2\%$
Operacional	Leve	La estructura se puede ocupar de forma segura. La mayoría de las funciones y operaciones se pueden retomar inmediatamente. Las operaciones esenciales se encuentran protegidas y las no esenciales pueden interrumpirse. Se deben reparar servicios no esenciales.	Reparable	$\delta < 0.5\%$
Seguridad de la vida	Moderado	La estructura es estable y la seguridad de la vida está protegida. El edificio puede ser evacuado ante un futuro evento sísmico. La reparación de los daños es posible pero económicamente no es práctica.	No compensa reparar	$\delta < 1.5\%$
Prevención de colapso	Severo	No hay colapso estructural. Pueden caer elementos no estructurales.	No reparable	$\delta < 2.5\%$

Fuente SEAO (1995)

En cuanto al nivel de peligrosidad, ésta se define a partir de la vida útil del proyecto y de la probabilidad de excedencia de los parámetros de movimiento de suelo en dicho periodo, tal como se presenta en la Tabla 3-2.

**Tabla 3-2 Periodos de retorno para los diferentes niveles de amenaza**

Clasificación del evento	Periodo de retorno años	Probabilidad de excedencia
Frecuente	43	50% en 30 años
Ocasional	72	50% en 50 años
Raro	475	10% en 50 años
Muy raro	970	10% en 100 años

Fuente:SEAO(1995)

De esta manera, el nivel de diseño se define al relacionar los niveles de amenaza con los diferentes niveles de comportamiento esperado. En este sentido, el comité VISION 2000 (SEAO 1995) propone las relaciones entre el nivel de comportamiento, el tipo de instalación y el nivel de amenaza, siguiendo las clasificaciones presentadas en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3 Niveles de comportamiento y amenaza según tipo de instalación**

Clasificación del evento	Totalmente operacional	Operacional	Seguridad de la vida	Prevención de colapso	
Frecuente	Instalaciones básicas				Instalaciones básicas Instalaciones esenciales Instalaciones críticas
Ocasional	Instalaciones esenciales				
Raro	Instalaciones críticas	Instalaciones básicas			
Muy raro		Instalaciones esenciales	Instalaciones básicas	Instalaciones críticas	

Fuente SEAO (1995)

Así, para edificios esenciales, se espera que el edificio se mantenga plenamente operacional en el caso que ocurra un sismo raro (de periodo de retorno de 475 años) y solo en el caso del sismo muy raro (de periodo de retorno de 970 años) se permite un nivel de daño que en ningún caso ponga en peligro la vida de sus ocupantes.

En forma similar, los documentos FEMA 273 (1997) y FEMA 356 (2000) presentan un conjunto de objetivos para la rehabilitación sísmica de edificios, considerando diferentes niveles de comportamiento para elementos estructurales (Tabla 3-4) y no estructurales (Tabla 3-5). El comportamiento de estos elementos (y en general del edificio) pueden describirse en términos de la seguridad de los ocupantes, los costos de la pérdida, el tiempo de restauración, la viabilidad económica de la reparación de los daños, así

como los potenciales impactos económicos, arquitectónicos o históricos en la comunidad. Estas características están directamente relacionadas a la extensión de los daños que pueden presentarse en los edificios (FEMA 356 2000).

**Tabla 3–4 Niveles de comportamiento estructural**

Nivel	Descripción
S1	<i>Ocupación inmediata:</i> corresponde a daños estructurales limitados. No se esperan degradaciones de la resistencia ni de la rigidez de la estructura. El riesgo de que los ocupantes sean afectados como resultado del daño estructural es muy bajo. Algunas reparaciones menores deben realizarse, las cuales no son requeridas para ocupar la instalación.
S2	<i>Control de daños:</i> daños entre el estado de ocupación inmediata y de seguridad de la vida. Este nivel es deseable para minimizar el tiempo de reparación así como la interrupción del funcionamiento. Este nivel de comportamiento es una alternativa para proteger equipos y contenidos valiosos, o para preservar elementos históricos importantes, cuando el costo de diseñar para la ocupación inmediata es excesivo.
S3	<i>Seguridad de la vida:</i> corresponde a daños significativos en la estructura, no obstante, todavía se presenta un margen de seguridad respecto al colapso estructural. Algunos elementos estructurales pueden verse severamente afectados, pero esto no conduce a grandes escombros dentro o afuera del edificio. Pueden ocurrir heridos durante el terremoto, sin embargo, el riesgo de afectación a la vida de los ocupantes se espera que sea bajo. Es posible reparar la estructura, sin embargo, por condiciones económicas, puede considerarse poco viable. A pesar de que la estructura afectada no presenta un riesgo de colapso inminente, es prudente realizar reparaciones estructurales o instalar elementos de arriostamiento temporales antes de volver a ocupar el edificio.
S4	<i>Seguridad limitada:</i> corresponde a los daños esperados entre la seguridad de la vida y la prevención de colapso.
S5	<i>Prevención de colapso:</i> corresponde a daños cercanos al colapso parcial o total del edificio luego de un evento sísmico. El daño esperado en la estructura es sustancial, incluyendo una significativa degradación de la resistencia y de la rigidez del sistema resistente a cargas laterales; se esperan grandes deformaciones laterales permanentes y degradación en la capacidad de soporte de cargas verticales. La estructura aún posee capacidad para resistir cargas verticales. El riesgo de que los ocupantes resulten heridos es significativo debido a la caída de escombros. La estructura no es reparable técnicamente y no es segura para volver a ser ocupada; una réplica o un evento posterior puede inducir su colapso.
S6	<i>No considerado:</i> corresponde a un reforzamiento que no está enfocado en el comportamiento estructural del edificio. Algunos dueños pueden desear incluir aspectos relacionados con la vulnerabilidad no estructural en el proyecto de reforzamiento, los cuales pueden ser atractivos ya que permiten una reducción de pérdidas de estos elementos a un bajo costo.

Fuente FEMA 356 (200)

**Tabla 3–5 Nivel de comportamiento no estructural**

Nivel	Descripción
N-A	<i>Operacional:</i> la mayoría de los sistemas no estructurales empleados para el uso normal del edificio (incluyendo la iluminación, calefacción, ventiladores, aire acondicionado, los sistemas de cómputo, entre otros) son funcionales.
N-B	<i>Ocupación inmediata:</i> se esperan daños en los elementos no estructurales, sin embargo, éstos no afectan el acceso a los edificios ni la seguridad de sistemas como ascensores, escaleras, componentes mecánicos y/o eléctricos, así como los sistemas empleados para la respuesta a emergencias (salidas de emergencia, sistemas de alarma contra incendio, etc). Suponiendo que el edificio es estructuralmente seguro, los ocupantes deberían permanecer en el edificio. El riesgo de afectación de sus ocupantes por daños no estructurales es muy bajo.
N-C	<i>Seguridad de la vida:</i> corresponde a daños y pérdidas significativas de los elementos no estructurales, no obstante, la amenaza a la vida de los ocupantes es muy baja. No se esperan bloqueos excesivos en las rutas de salida; sin embargo, pueden presentarse escombros ligeros en el edificio. Los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado pueden resultar afectados y, como consecuencia, se esperan pérdidas en la funcionalidad de la instalación. La restauración de los componentes no estructurales puede conllevar a un esfuerzo significativo.
N-D	<i>Amenaza reducida:</i> corresponde a daños extensivos en los elementos no estructurales. No obstante, se previene la caída o fallo de elementos grandes o pesados que pueden afectar la seguridad de los ocupantes.
N-E	<i>No considerado:</i> No corresponde a un nivel de comportamiento de los componentes no estructurales.

Fuente FEMA 356 (200)

Como resultado, el nivel de comportamiento esperado en el edificio se obtiene de la combinación de los niveles de comportamiento de los elementos estructurales y no estructurales (ver Tabla 3–6). En la Tabla 3–7 se presenta una descripción de los niveles de comportamiento *Operacional* (1-A), *Ocupación inmediata* (1-B), *Seguridad de la vida* (3-C) y *Prevención de colapso* (5-E).

**Tabla 3–6 Niveles de comportamiento para la rehabilitación sísmica de edificios**

Seguridad		Niveles de comportamiento de elementos estructurales					No considerado (S-6)
		Ocupación inmediata (S-1)	Control de daños (S-2)	Seguridad de la vida (S-3)	Seguridad limitada (S-4)	Prevención de colapso (S-5)	
Niveles de comportamiento de elementos no estructurales	Operacional (N-A)	<i>Operacional</i> 1-A	2-A	No recomendado	No recomendado	No recomendado	No recomendado
	Ocupación inmediata (N-B)	<i>Ocupación inmediata</i> 1-B	2-B	3-B	No recomendado	No recomendado	No recomendado
	Seguridad de la vida (N-C)	1-C	2-C	<i>Seguridad de la vida</i> 3-C	4-C	5-C	6-C
	Amenaza reducida (N-D)	No recomendado	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
	No considerado (N-E)	No recomendado	No recomendado	No recomendado	4-E	<i>Prevención de colapso</i> 5-E	Sin rehabilitación

Fuente FEMA 356(2000)

**Tabla 3–7 Control de daño y niveles de comportamiento de los edificios**

Descripción del daño	Nivel de comportamiento del edificio			
	Operacional (1-A)	Ocupación inmediata (1-B)	Seguridad de la vida (3-C)	Prevención de colapso (5-E)
<b>Daño total</b>	Muy leve	Leve	Moderado	Severo
<b>Comportamiento del edificio en general</b>	No hay deriva permanente. La estructura mantiene su resistencia y rigidez inicial. Fisuras menores en fachadas, particiones, falsos techos así como en elementos estructurales. Todos los sistemas que son importantes para la operación normal se encuentran en funcionamiento.	No hay deriva permanente. La estructura mantiene su resistencia y rigidez inicial. Fisuras menores en fachadas, particiones, falsos techos así como en elementos estructurales. Los elevadores pueden reactivarse. Los equipos de protección contra el fuego están en operación.	Degradación de la resistencia y rigidez inicial del edificio. La estructura es resistente a cargas gravitatorias. No hay fallas fuera del plano en muros o parapetos. Deriva permanente en algunos casos. La reparación del daño de las particiones puede no ser posible por su valor económico.	Poca resistencia y rigidez residual, no obstante, los pilares y muros de carga funcionan. Grandes deformaciones permanentes. Pueden resultar bloqueadas algunas salidas de emergencia. Muros de relleno y parapetos no anclados fallan o tienen daños. El edificio está cercano al colapso.
<b>Comportamiento de los componentes no estructurales</b>	El daño esperado es despreciable. Las instalaciones de energía, entre otras, están disponibles, posiblemente se usen fuentes alternas.	El equipo y los contenidos están generalmente seguros, sin embargo, pueden no operar debido a fallas mecánicas o por la falta de otros servicios.	La amenaza por caída de elementos es mitigable pero muchos elementos arquitectónicos, mecánicos y eléctricos están dañados.	Daño extensivo

Fuente: FEMA 356 (2000)

En la Tabla 3–8 se presenta la relación entre los niveles de comportamiento y los niveles de amenaza. En esta Tabla, cada celda, identificada con una letra, corresponde a un objetivo de seguridad para el reforzamiento de los edificios, tal como se presenta en la Tabla 3–9. En la Tabla 3–10 se presenta una descripción de dichos niveles de seguridad para el reforzamiento (básico, incrementado y limitado (reducido y/o parcial). Se resalta que los niveles de amenaza (los periodos de retorno) propuestos en los documentos FEMA 273 (1997) y FEMA 356(2000) son mayores que los establecidos en SEAOC (1995).



**Tabla 3–8 Relación entre los niveles de comportamiento del edificio y los niveles de amenaza**

Periodo de retorno	Probabilidad de excedencia	Niveles de comportamiento			
		Operacional (1-A)	Ocupación inmediata (1-B)	Seguridad de la vida (3-C)	Prevención de colapso (5-E)
43	50% en 50 años	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
275	20% en 50 años	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
475	10% en 50 años	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
2475	2% en 50 años	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>o</i>	<i>p</i>

Fuente: FEMA 356 (2000)

**Tabla 3–9 Objetivos de seguridad para el reforzamiento de edificios**

Objetivos de seguridad para el reforzamiento	Niveles de comportamiento
Objetivo de seguridad básico	Cumple con los niveles <i>k</i> y <i>p</i> ; corresponde a los niveles de comportamiento 3-C y 5-E
Objetivo de reforzamiento incrementado	- Cumple con los niveles <i>k</i> y <i>p</i> y adicionalmente con cualquiera de los siguientes: <i>a</i> , <i>e</i> , <i>i</i> , <i>b</i> , <i>f</i> , <i>j</i> o <i>n</i> . Cumple sólo con el nivel <i>n</i> ; cumple sólo con el nivel <i>o</i>
Objetivo de reforzamiento limitado	- Cumple solo con el nivel <i>p</i> o sólo con el nivel <i>k</i> - Cumple con los niveles <i>c, d, g, h, l</i> - Corresponde a niveles de comportamiento 4-C, 4-D, 4-E, 5-C, 5-D, 5-E, 6-D o 6-E

**Tabla 3–10 Objetivos de seguridad para el reforzamiento de los edificios**

Objetivo de seguridad	Descripción
<i>Objetivo de Seguridad básico</i>	Este objetivo de reforzamiento está orientado a cumplir los niveles de seguridad de la vida (3-C) para eventos de periodo de retorno de 475 años, así como de prevención del colapso para eventos de periodo de retorno de 2475 años. Para los edificios en los cuales se requiera este nivel de seguridad se esperan daños menores para terremotos de relativa y/o moderada frecuencia, pero daños significativos y potenciales pérdidas económicas para eventos severos y poco frecuentes.
<i>Objetivo de reforzamiento incrementado</i>	Este objetivo de reforzamiento está orientado a cumplir niveles de seguridad mayores que los requeridos para el objetivo de seguridad básica. De esta manera, se consideran niveles de comportamiento más estrictos para los mismos niveles de amenaza propuestos para la seguridad básica. En forma análoga, en este objetivo de seguridad se consideran mayores niveles de amenaza para los niveles de comportamiento requeridos para el objetivo de seguridad básica.
<i>Objetivo de reforzamiento limitado: (reducido)</i>	Este objetivo de reforzamiento corresponde a una intervención completa de la estructura y de los sistemas no estructurales, no obstante, contempla un nivel de amenaza menor que el considerado para el objetivo de seguridad básica. Así, el objetivo limitado corresponde a niveles de comportamiento de seguridad de la vida para eventos de periodo de retorno menor a 475 años. A su vez, este objetivo corresponde a niveles de comportamiento de prevención de colapso para eventos de periodo de retorno menor a 2475 años.
Objetivo de reforzamiento limitado: (parcial)	Este objetivo de reforzamiento corresponde a la intervención en la cual no se realice una intervención completa del edificio. No se realiza una intervención a todo el sistema resistente a cargas laterales.

Fuente: FEMA 356 (2000)

Respecto a los objetivos de reforzamiento (diseño), se resalta que no todas las combinaciones entre el comportamiento del edificio, para un determinado nivel de amenaza, pueden considerarse razonables o costo-efectivas. En este sentido, en esta propuesta se encuentra mayor flexibilidad para la definición de los objetivos de seguridad en las obras de reforzamiento (FEMA 356 2000). De esta manera, el nivel de seguridad seleccionado para el reforzamiento de las instalaciones estará determinado por el costo del proyecto, así como por los beneficios esperados por obtener una mejora en la seguridad, dada la reducción en los daños y en la interrupción de los servicios por posibles eventos.

### 3.2.2 Requisitos de seguridad en códigos de construcción sismoresistente

En el Eurocódigo 8 EC8 (EN-2004), la acción sísmica de diseño esta definida en términos de una probabilidad de excedencia del 10% en un tiempo de exposición (vida útil del proyecto) de 50 años, o en un periodo de retorno (475 años). A su vez, la acción sísmica se modifica a través de un factor de importancia  $\gamma_I$  que depende del tipo de edificio. Se consideran cuatro clases de importancia, dependiendo de las consecuencias de su colapso en la vida humana, por su importancia para la salud pública y protección civil en los periodos de recuperación y reconstrucción post evento, así como en las consecuencias sociales y económicas de su colapso (ver Tabla 3–11).

Esta clasificación de los edificios se realiza para diferenciar la confiabilidad en el diseño de los edificios, asignando a cada categoría un factor de incremento de las acciones sísmicas. En otras palabras, para los niveles de seguridad especificados en cada norma sismoresistente, los edificios de mayor importancia serán diseñados para tener menos daños esperados. Dichas categorías, así como los respectivos factores de importancia, establecen una conexión entre las consecuencias asociadas a la falla estructural del edificio y su seguridad frente al peligro sísmico.

En forma similar al EC 8, las provisiones recomendadas para la regulación sísmica de nuevos edificios y otras estructuras (BSSC 2001), los edificios se clasifican en los siguientes grupos de usos:

- Grupo III Aquellos que tienen instalaciones esenciales que son requeridas para la recuperación post terremoto y aquellas que contienen sustancias peligrosas
- Grupo II Estructuras que representan una amenaza pública considerable debido a su ocupación, la densidad de su ocupación o su uso.
- Grupo I Las que no se consideren en grupos I o II

Esta clasificación ha sido también adoptada en códigos de construcción sismoresistente en países de América Latina (por ejemplo la NSR-10, en Colombia, la norma AGIES NR-1:2000, en Guatemala, la norma Covenin 1756-1, 2001 en Venezuela). En cada norma se establecen categorías de acuerdo a la densidad de ocupación, el uso de la instalación, los valores de sus contenidos, así como la posibilidad de generar otros eventos catastróficos asociados a su falla.

Un resumen de las categorías de edificios y de los correspondientes factores de importancia, considerados en los códigos sismoresistentes mencionados, se presenta en la Tabla 3–11 y en la Tabla 3–12 respectivamente. En la Tabla 3–13 se presenta un listado de los edificios y su clasificación de acuerdo a los códigos revisados. En el caso de los esenciales, se observa que en general existe consenso en considerar los hospitales y centros de emergencia como edificios esenciales, siendo el criterio para su clasificación su importancia para la respuesta al evento y su uso post desastre. No obstante, algunas normas de construcción también incluyen otros costos (sociales, económicos, culturales) para determinar qué edificios requieren mayores niveles de protección ante la amenaza sísmica.

Respecto a la seguridad sísmica y la clasificación de edificios según su importancia, en el EC8 (EN 2004), se señala que tanto la incertidumbre de los eventos sísmicos, como las limitaciones en los recursos para invertir en la seguridad de los edificios, hacen que sea poco o nada factible construir edificios cuyo riesgo sísmico sea nulo y por lo tanto, sea necesario definir niveles de seguridad medibles en términos probabilistas. De esta manera, el nivel de seguridad que puede garantizarse para un edificio, según su importancia, es un tema de optimización de recursos y depende del contexto socioeconómico. En otras palabras, la cantidad de seguridad que se asigna a cada categoría de edificio depende de la amenaza, del valor de las pérdidas esperadas y de la aversión al riesgo.

**Tabla 3–11 Categorías de edificios, atendiendo a su importancia, en normas sismoresistentes seleccionadas**

EC 8	FEMA 273 (1997) BSSC (2001)	NSR 10	Covenin 1756-1 (2001)	AGIES NR-1:2000 (2002)	NCSE-02
I Edificios de menor importancia para la seguridad pública	I	I Ocupación normal	C	Obras utilitarias	De importancia normal Aquellas cuya destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio para la colectividad, o producir importantes pérdidas económicas, sin que en ningún caso se trate de un servicio imprescindible ni pueda dar lugar a efectos catastróficos
II Edificios ordinarios que no pertenecen a las otras categorías	II Edificios con un importante número de ocupantes	II Estructuras de ocupación especial (densidad de ocupación)	B2 Edificios de uso público o privado de baja ocupación	Obras ordinarias	
III Edificios cuyo colapso pueda tener consecuencias importantes	II Edificios con un importante número de ocupantes	III De atención a la comunidad Este grupo comprende aquellas edificaciones, y sus accesos, que son indispensables después de un temblor para atender la emergencia y preservar la salud y la seguridad de las personas, exceptuando las incluidas en el grupo IV.	B1 Edificios de uso público o privado, densamente ocupadas	Importantes: Son aquellas que albergan o pueden afectar a gran número de personas, aquellas dónde los ocupantes estén restringidos a desplazarse, aquellas dónde se prestan servicios importantes (pero no esenciales después de un desastre) a gran número de personas o entidades, obras que albergan valores culturales reconocidos o equipo de alto costo	De importancia moderada Aquellas con probabilidad despreciable de que su destrucción por el terremoto pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio primario, o producir daños económicos significativos a terceros
IV Edificios cuya integridad durante terremotos es de vital importancia para la protección civil	III Edificios que tienen instalaciones esenciales que son requeridas para la recuperación post terremoto y aquellas que contienen sustancias peligrosas	IV Indispensables: Son aquellas edificaciones de atención a la comunidad que deben funcionar durante y después de un sismo, y cuya operación no puede ser trasladada rápidamente a un lugar alterno	A Edificios que albergan instalaciones esenciales de funcionamiento vital en condiciones de emergencia o cuya falla pueda dar lugar a cuantiosas pérdidas humanas o económicas	Esenciales: Son aquellas que deben permanecer operantes durante y después de un desastre o evento adverso.	De importancia especial: aquellos cuya destrucción por el terremoto puedan interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos

**Tabla 3–12 Factores de importancia según grupos de edificios en normas sismoresistentes seleccionadas**

EC8		BSSC (2001)		NSR 10		Covenin 1756-1 (2001)		NCSE-02	
I	0.8	I	1	I	1	C	--	Normal	1
II	1	II	1.25	II	1.1	B2	1		
III	1.2			III	1.25	B1	1.15	Moderada	1
IV	1.4	III	1.5	IV	1.5	A	1.3	Especial	1.3

**Tabla 3–13 Listado de edificios y su clasificación según categorías de importancia en normas de construcción sismoresistente seleccionadas**

Edificio	NCSE 02 (2002)	FEMA 273 (1997)	NSR 10 (2010)	Covenin 1756-1 (2001)	AGIES NR-1:2000 (2002)
Hospitales, centros o instalaciones sanitarias de cierta importancia	Importancia especial	III	IV	A	Esenciales
Edificios e instalaciones básicas de comunicaciones, radio, televisión, centrales telefónicas y telegráficas	Importancia especial	III	IV	A	Esenciales
Edificios para centros de organización y coordinación de funciones para casos de desastre	Importancia especial		III		
Edificios para personal y equipos de ayuda, como cuarteles de bomberos, policía, fuerzas armadas y parques de maquinaria y de ambulancias	Importancia especial	III	III	A	Esenciales
Las construcciones para instalaciones básicas de las poblaciones como depósitos de agua, gas, combustibles, estaciones de bombeo, redes de distribución, centrales eléctricas y centros de transformación	Importancia especial		IV	A	Esenciales
Las estructuras pertenecientes a vías de comunicación	Importancia especial		IV		Esenciales
Edificios e instalaciones vitales de los medios de transporte en las estaciones de ferrocarril, aeropuertos y puertos	Importancia especial	III	IV	A	
Estructuras que contengan sustancias peligrosas	Importancia especial	III	IV	A	Importantes
Centrales nucleares o térmicas, grandes presas y aquellas presas que, por su posible falla o funcionamiento incorrecto, representen un riesgo público	Importancia especial			A	
Monumentos históricos o artísticos, o bien de interés cultural o similar	Importancia especial			A	Importantes
Centros educativos		II	III	A	Importantes
Edificios gubernamentales			II	A	Importantes
Edificios de concentración masiva de ocupantes	Importancia especial	II	II	B1-B2 *	Importantes

El Eurocodigo 8 señala aproximaciones para determinar los valores de los factores de importancia  $\gamma_I$  considerando dos casos: (i) variaciones de los periodos de exposición de los edificios o bien, (ii) variaciones de las probabilidades de excedencia de la acción sísmica. Para el primer caso, si se establece una cierta probabilidad  $P_L$  (por ejemplo el 10%) de exceder un valor de la acción sísmica en un periodo de referencia  $T_{LR}$ , el factor de importancia  $\gamma_I$  por el cual debe amplificarse la acción sísmica para alcanzar la misma probabilidad de excedencia (el 10%) en un periodo de exposición  $T_L$  se puede estimar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\gamma_I = \left( \frac{T_{LR}}{T_L} \right)^{\frac{1}{k}} \quad [3-1]$$

En donde  $k$  es un factor que depende de la sismicidad de la zona y suele considerarse igual a 3. Por ejemplo, si se supone un periodo de referencia  $T_{LR}$  igual a 50 años y un periodo de exposición también de 50 años, el factor de importancia es igual a 1: no es necesario amplificar la acción sísmica para obtener la misma probabilidad de excedencia en el mismo periodo de exposición ( $T_L=T_{LR}$ ). No obstante, si se supone que el edificio va a estar expuesto 100 años ( $T_L= 100$ ) entonces el factor por el cual debe amplificarse la acción sísmica es cercano a 1.2. En la Figura 3-1 (a) se presentan diferentes valores del factor de importancia  $\gamma_I$ , así como los valores asignados a cada uno de los grupos de importancia en el EC8, considerando diferentes valores para la razón entre  $T_L$  y  $T_{LR}$ .

En el segundo caso, si se establece una cierta probabilidad de referencia  $P_{LR}$  (por ejemplo el 10%), de exceder la acción sísmica en un periodo de exposición  $T_L$  (por ejemplo 50 años), el factor de importancia  $\gamma_I$  por el cual debe multiplicarse la acción sísmica para que corresponda a una probabilidad de excedencia  $P_L$  en los mismos  $T_L$  años, se puede estimar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\gamma_I = \left( \frac{P_L}{P_{LR}} \right)^{\frac{1}{k}} \quad [3-2]$$

Por ejemplo, si se supone una probabilidad de referencia  $P_{LR}$  del 10% y un periodo de exposición  $T_L$  de 50 años, no hace falta amplificar la acción sísmica para encontrar la misma probabilidad de excedencia ( $P_L=10\%$ ) en los mismos  $T_L$  años. No obstante, si la probabilidad de excedencia  $P_L$  se reduce al 5% (los eventos son menos frecuentes), el factor de importancia por el cual debe ampliarse la acción sísmica es cercano a 1.2. En la Figura 3-1 (b) se presentan diferentes valores para el factor de importancia  $\gamma_I$ , así como los valores asignados a cada uno de los grupos de importancia en el EC8, considerando diferentes valores para la razón entre  $P_L$  y  $P_{LR}$ .

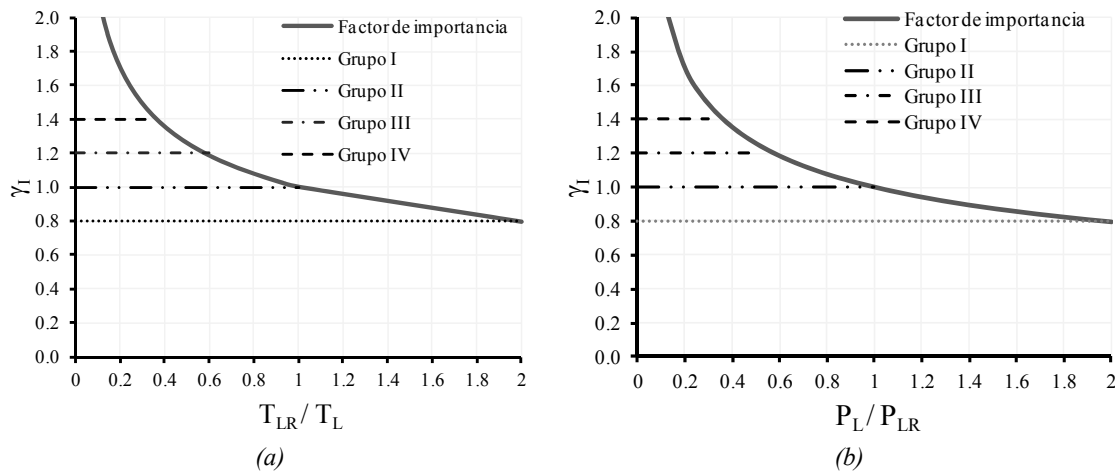


Figura 3-1 Factores de importancia según cambios en: (a) el periodo de exposición (b), la probabilidad de excedencia

Para el análisis de seguridad de los edificios, además de definir los niveles de comportamiento y de amenaza, es necesario emplear metodologías claras para evaluar la respuesta de los edificios y que permitan repetir los cálculos del diseño para fines de regulación y comparación de resultados. En este sentido, en el documento FEMA 273 (FEMA 1997), se presentan los métodos para el análisis y diseño de edificios ante varios niveles de comportamiento, considerando desde análisis estáticos lineales hasta análisis inelásticos con series temporales del movimiento. Asimismo, este documento define los niveles de comportamiento para elementos y sistemas no estructurales y propone los límites de deriva para varios sistemas estructurales, considerando diferentes niveles de comportamiento.

Siguiendo la filosofía del diseño basado en comportamiento es posible optimizar las estructuras. Un ejemplo de este procedimiento es presentado por Ganzerli et al. (2000). El diseño óptimo se formula en términos de los costos de los materiales de la estructura y está restringido por umbrales pre-definidos para las rotaciones plásticas de los extremos de los elementos (pilares y vigas). El objetivo es minimizar el costo de la estructura, el cual es considerado proporcional a los volúmenes del hormigón y del acero de refuerzo. Las variables de diseño son las áreas de las secciones de los elementos, así como el área del refuerzo de acero. En este análisis, la demanda sísmica se establece para uno de los niveles de amenaza presentados en la Tabla 3–6, para los cuales se conoce el espectro de respuesta elástica según la ubicación del edificio y considerando el tipo de suelo. Por último, se verifica que la respuesta de la estructura cumpla con los requisitos de rotaciones, derivas y desplazamientos definidos en el FEMA 273 (1997).

### **3.3 Comentarios al diseño basado en comportamiento**

La idea del diseño de una estructura basado en un nivel de comportamiento (Performance-Based Design) no es nueva (Ghobarah 2001). Siempre han existido diseños gobernados por algún objetivo de comportamiento. Lo novedoso de esta metodología es el diseño para más de un nivel de amenaza, para las cuales se establecen diferentes objetivos de comportamiento (Hadjian 2002). Sobre esta filosofía de diseño, se presentan a continuación comentarios respecto a sus ventajas respecto a los procedimientos de evaluación, así como sus limitaciones por la definición de los parámetros estructurales, la selección de niveles de amenaza según el tipo de instalaciones y la confiabilidad del análisis.

#### *3.3.1 Procedimientos de evaluación*

Cada edificio tiene un conjunto específico de características según el sitio en el que se encuentra, su tipología, los objetivos de comportamiento deseados, la tolerancia sobre el riesgo y las limitaciones presupuestarias. Por esto resulta poco práctico e ineficiente establecer un nivel de seguridad uniforme para todos los edificios. De esta manera, es útil la categorización de los edificios de acuerdo a diferentes niveles de comportamiento (Augusti y Ciampoli 2008).

Bajo estas consideraciones y para que el diseño sea lo más objetivo posible, resulta esencial que el diseño se realice de acuerdo a un procedimiento estándar. Para esto, los requerimientos de comportamiento deben estar formulados en términos de estados límites o umbrales basados en parámetros técnicos bien definidos y que sean medibles usando metodologías estandarizadas (Augusti y Ciampoli 2008).

Al respecto, los métodos presentados en el documento FEMA 273 (1997) permiten evaluar y verificar el comportamiento de las estructuras según los requisitos establecidos. Adicionalmente, estos métodos han permitido que los más recientes enfoques de diseño se dirijan a minimizar las probabilidades de pérdida calculadas durante la vida útil, o a maximizar la utilidad que presta la instalación.

#### *3.3.2 Limitaciones en la descripción de parámetros estructurales y del daño*

El diseño basado en desplazamiento y el diseño basado en comportamiento han sido usados indiferentemente. Esto es debido a la idea de relacionar los objetivos de comportamiento con el nivel de

daño de las estructuras, y éste a su vez con el desplazamiento o la deriva. Sin embargo, esto es una sobresimplificación del problema, ya que el daño está influenciado por otros parámetros como la acumulación de daño en la estructura, los modos de fallo, el número de ciclos y la duración del evento, entre otros factores (Ghobarah 2001).

Así, entre las limitaciones del diseño basado en comportamiento, se señala que un solo parámetro de diseño, como el desplazamiento o la deriva puede no controlar adecuadamente los objetivos de comportamiento para todas las tipologías y sistemas estructurales y no estructurales. Por ejemplo, los criterios basados en fuerza o esfuerzo son más apropiados para estructuras de periodos cortos que los criterios basados en desplazamientos (Krawinkler 1996).

Además de las limitaciones en la definición de los parámetros de respuesta adecuados, Ellingwood (2001 b) señala las dificultades para definir los estados límites para los requisitos de comportamiento ante los diferentes niveles de amenaza, por ejemplo, seguridad de la vida bajo un terremoto con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. Para este caso, es necesario considerar los índices de daño disponibles en la literatura de ingeniería sísmica y comparar sus resultados con los niveles de daño expresados en términos no cuantitativos como “daño menor” o “daño severo”. A su vez, los parámetros de descripción del comportamiento del edificio (deriva o desplazamiento) deben ser catalogados según los requisitos de comportamiento, tal como se presenta en la Tabla 3-1.

Entre las principales limitaciones del diseño basado en comportamiento, respecto a la descripción de los parámetros estructurales y del comportamiento del edificio se señalan: (i) la demanda es obtenida por métodos simplificados; cuando se usan métodos dinámicos o no lineales, hacen falta correlaciones entre las demandas calculadas y el comportamiento de los elementos. (ii) Las relaciones entre los parámetros de respuesta estructural y el comportamiento de los componentes se basan en ensayos de laboratorio, en relaciones derivadas de modelos analíticos, o supuestas con base al juicio de expertos; hacen falta enfoques basados en datos estadísticos. (iii) Por último, la evaluación del comportamiento del sistema estructural depende del comportamiento de los componentes; usualmente el comportamiento del sistema estructural se asume igual al peor comportamiento calculado para cualquier componente en el edificio. Al respecto, son necesarios controles de verificación tanto a nivel de elemento como del sistema estructural para verificar si la estructura cumple con el nivel de comportamiento deseado (Augusti & Ciampoli 2008, citando a Hamburger 2003).

### *3.3.3 Categorías de edificios, selección de niveles de amenaza y aversión al riesgo*

De acuerdo con Saleh (2006), en el diseño de sistemas complejos, en particular aquellos en los cuáles el acceso es limitado para su mantenimiento (como satélites espaciales, o sistemas submarinos), se requieren altos niveles de confiabilidad, llevando a los diseñadores hacia diseños redundantes y costosos. Este aumento en la confiabilidad se justifica a partir de la aversión al riesgo<sup>13</sup> en la gestión de sistemas e infraestructuras cuyo valor de reposición es elevado. En forma análoga, para los edificios y sistemas esenciales se desean mayores niveles de seguridad debido a las grandes consecuencias y a los altos costos que se derivan de su deterioro o pérdida.

---

<sup>13</sup> La aversión al riesgo representa la disposición de un individuo respecto los posibles resultados de una decisión bajo incertidumbre. Un individuo es neutral al riesgo si es indiferente entre un retorno seguro (cierto) y un retorno incierto con el mismo valor esperado. Un individuo es afín al riesgo si prefiere un retorno incierto ante un retorno seguro con el mismo valor esperado. Por último, un individuo es averso al riesgo si prefiere un retorno seguro ante un retorno incierto con el mismo valor esperado.

Por ejemplo, suponga el caso de una persona que puede escoger entre dos loterías: una lotería en la cual puede tener una ganancia cierta (segura) de 10 unidades, o una lotería incierta en la cual puede ganar 1000 unidades con una probabilidad del 1%, o no ganar nada con probabilidad del 99%. A pesar de que las dos loterías tienen el mismo valor esperado (10 unidades), el individuo averso al riesgo escogerá la lotería segura, el individuo afín al riesgo escogerá la lotería incierta. Un individuo neutral al riesgo será indiferente a cualquiera de las dos opciones.

Zeckhauser y Keeler (1970) presentan un tipo de aversión al riesgo relacionado con el valor de las pérdidas. Así, los individuos aversos a riesgos, ante eventos con pérdidas/beneficios inciertas, pagarán mayores porcentajes sobre la prima de seguros actuarialmente justa<sup>14</sup>, a medida que las pérdidas esperadas sean mayores. Este es el caso de la gestión de la seguridad y riesgo sísmico de los edificios esenciales; a medida que las pérdidas aumentan, dado el valor que representan estos edificios, la sociedad y los individuos estarán dispuestos a pagar mayores valores en el diseño o en medidas de reforzamiento para evitar las pérdidas potenciales.

Si bien se reconoce que los costos de los daños por eventos sísmicos en los edificios y sistemas esenciales son elevados, cuantificarlos y hacerlos comparables es una labor compleja, ya que implica estimar las pérdidas económicas, los daños ocasionados a los ocupantes (heridos, personas fallecidas) así como las pérdidas que se derivan por la interrupción de su servicio o la degradación de su infraestructura. De esta manera, clasificar los edificios según su importancia es una alternativa para establecer los niveles de seguridad en forma simplificada.

Al respecto, Safina (2003) define los edificios esenciales como aquellos que “albergan instalaciones y/o dependencias cuyo funcionamiento en condiciones de emergencia debidas a una crisis sísmica, es crítica y vital para afrontar las consecuencias inherentes del desastre natural. Aquellas que son necesarias para atender la emergencia y preservar la salud, seguridad y atención de la población después de un sismo”. Asimismo, este autor añade que la clasificación de una instalación como edificio esencial depende de su rol en la atención de una emergencia sísmica. Por lo tanto, se recalca que la clasificación propuesta en los códigos sismoresistentes no debe ser interpretada como una única alternativa, sino que puede presentar variaciones dependiendo de los planes de emergencia existentes.

De esta manera, la clasificación de los edificios según su importancia, así como la seguridad sísmica que se desea garantizar a cada tipo de instalación depende del contexto en el cual se tomen estas decisiones. Una de las limitaciones en la clasificación de los edificios consiste en la comparación de la vida humana y de las pérdidas económicas con otros valores de índole cultural, social y ambiental (entre otros) y establecer prioridades frente a la seguridad sísmica. Esto lleva, por ejemplo, a formular preguntas como: ¿son más importantes los bienes culturales, el patrimonio histórico y artístico que los centros educativos, o viceversa? Esta pregunta sólo puede solucionarse a través de la discusión y consenso entre los gestores de los servicios y los tomadores de decisiones respecto al riesgo sísmico de tales instalaciones.

Safina (2003) señala que la variabilidad del factor de importancia asignado a edificios de uso residencial, educacional y hospitalario en los códigos sismoresistentes pone de manifiesto la falta de consenso por parte de la comunidad internacional en el tratamiento de los edificios esenciales y de especial importancia. No obstante, el Eurocódigo 8 advierte que no hace falta tal consenso, ya que la definición de la seguridad de cada una de las categorías de edificios puede depender del contexto nacional.

La discusión de esta clasificación es válida, ya que es la que orienta la cantidad de protección que se desea otorgar a una instalación. Safina (2003) cuestiona si a la definición de clases y factores de importancia es apropiada para dotar de la seguridad requerida a los edificios esenciales, o si se deben recurrir a otros criterios. Esta puesta en cuestión es un punto de partida para explorar otras alternativas para la evaluación de la seguridad de edificios esenciales, como el diseño basado en confiabilidad y riesgo.

De forma análoga a los factores de importancia, en la literatura de gestión de riesgos (Hadjian 2002, citando al NRC-ACRS 1980) la aversión al riesgo asociado a eventos de grandes consecuencias pero poco frecuentes, se representa como un Costo Social Equivalente (CSE), definido en la siguiente expresión:

$$CSE = \lambda\beta^\alpha \quad [3-3]$$

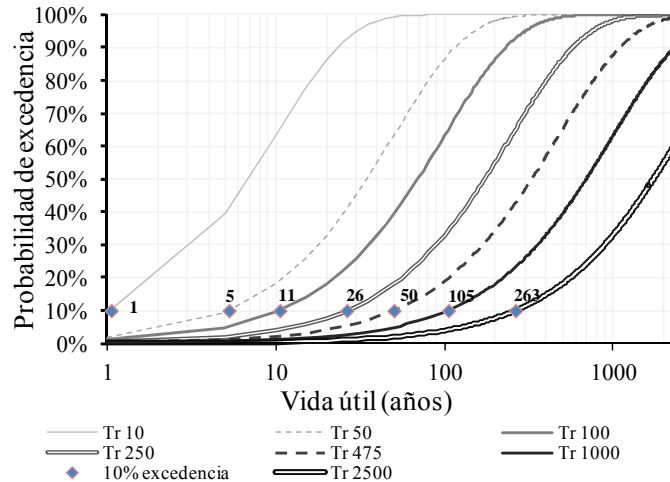
---

<sup>14</sup> Un seguro es actuarialmente justo si su precio por unidad (la prima de riesgo que paga el individuo) es igual a la pérdida esperada por unidad de activo.



En donde  $\lambda$  representa la frecuencia de los sucesos y  $\beta$  los valores de las pérdidas. Por otro lado, el factor  $\alpha$  refleja el grado de aversión al riesgo: a mayor aversión, mayores valores de  $\alpha$  y así mayores valores del costo social equivalente.

En cuanto al uso de los factores de importancia para amplificar los espectros de diseño presentados en los códigos sismoresistentes, Grasses (1991) señala que para obtener la misma confiabilidad de un mismo edificio en diferentes zonas sísmicas, los factores de importancia deben variar en cada zona. Como alternativa, se propone que los movimientos del suelo para el diseño se seleccionen a partir de la probabilidad de excedencia y la vida útil de los edificios, estableciendo así los valores de riesgo aceptable. De esta manera se dejarían de emplear los factores de importancia. En la Figura 3-2 se presenta un ejemplo de la relación entre la vida útil, la probabilidad de excedencia y el periodo de retorno, suponiendo que la ocurrencia de los eventos sigue un modelo de Poisson.



**Figura 3-2 Probabilidad de excedencia, vida útil del proyecto y periodo de retorno para la selección del nivel de amenaza**

Las ventajas de escoger estos parámetros del diseño son las siguientes: (i) respecto a la vida útil, este parámetro relaciona el diseño y los requisitos de seguridad con las políticas y recursos disponibles para la inversión en la renovación de la infraestructura. (ii) Respecto a la probabilidad de excedencia, éste parámetro define el grado de aversión al riesgo sobre el edificio y representa el nivel de peligrosidad al cual se desea garantizar la seguridad de la infraestructura. De esta manera, la protección de los edificios tiene en cuenta no sólo su importancia sino el nivel de peligrosidad de la zona donde se halla el edificio. No obstante, hace falta introducir en este enfoque estimaciones del daño probable y de las pérdidas esperados en la infraestructura, dada la ocurrencia de eventos de determinada probabilidad de excedencia durante su vida útil.

Frente a este enfoque pueden presentarse problemas de comunicación que hacen que los individuos interpreten los desastres asociados a un periodo de retorno, como ciclos definidos, de tal manera que consideran casi imposible tener un desastre de determinada frecuencia en el siguiente año, o en dos años, o en general, relativamente cerca en el futuro. El concepto de periodo de retorno parece implicar la noción de periodicidad, así que las personas actúan como si creyeran que la probabilidad de tener un desastre del tipo examinado crece mientras el tiempo de espera se aproxima al periodo de retorno (Cardona 2005).

Para decidir cuánta seguridad se debe garantizar en un edificio ante el peligro sísmico, se puede plantear el siguiente ejemplo simplificado. Sea  $E$  el edificio,  $C(E)$  su costo,  $\gamma$  una variable que representa la seguridad sísmica del edificio y  $C(\gamma)$  los costos de adquirir dicha seguridad. Ante la ocurrencia de un evento sísmico de determinada intensidad, los posibles resultados son: (i) una pérdida  $L$  en el edificio cuyo costo es  $C(L)$ , con probabilidad de ocurrir  $p$ ; o bien (ii) sin pérdida en el edificio, con probabilidad de ocurrir  $(1-p)$  dado que se realiza una obra de reforzamiento. Bajo esta situación, cuál sería el costo de

la intervención/reforzamiento para tener un nivel de seguridad  $\gamma$  que el individuo desearía pagar para evitar la pérdida  $L$ ?

El valor esperado de los costos totales  $E[CT]$  se presenta en la siguiente expresión:

$$E[CT] = C(E) + pC(L) + (1-p)C(\gamma) \quad [3-4]$$

Si se supone una función de costos de las pérdidas  $g(\gamma)$  que relaciona, para un nivel de seguridad  $\gamma$  un costo de pérdida  $L_i$ , de tal forma que ante mayores niveles de seguridad, menos pérdidas esperadas ( $dg/d\gamma < 0$ , es decir una función decreciente), entonces, reemplazando  $g(\gamma)$  por  $C(L)$  en la ecuación [3-4] se obtiene:

$$E[CT] = C(E) + p.g(\gamma) + (1-p)C(\gamma) \quad [3-5]$$

Así, al minimizar los costos totales esperados con respecto a  $\gamma$  en la Ecuación [3-5] se encuentra que el valor óptimo de seguridad debe satisfacer la siguiente expresión:

$$C'(\gamma^*) = \frac{-p}{(1-p)} g'(\gamma^*) \quad [3-6]$$

De la Ecuación [3-6] se encuentra que  $C'(\gamma^*)$ , la tasa entre el costo de la seguridad y la seguridad óptima  $\gamma^*$ , debe ser igual a  $g'(\gamma^*)$ , la tasa entre el costo de la pérdida esperada y la seguridad óptima, afectada por la relación entre las probabilidades de pérdida  $p/(1-p)$ .

Este enfoque de optimización es similar a un análisis beneficio-costos o un análisis de costos durante la vida útil del proyecto, en el cual se asignan valores (monetarios generalmente) a una lista de costos y beneficios y se resumen la bondad de las alternativas estimando el valor presente neto (Aven y Kritensen 2005). De esta manera, la decisión sobre la seguridad no depende de la clase de edificio (esencial, de importancia especial, de importancia normal), sino de la cuantificación de los beneficios y costos asociados a la seguridad de los edificios y sistemas esenciales.

De acuerdo con Sexsmith (1999), idealmente, se debería balancear la seguridad dado un estado límite, según los costos para alcanzarla y sujeto a algunas restricciones generales sobre la confiabilidad del sistema. De esta manera, la confiabilidad también es sensible al balance entre seguridad y el costo de adquirirla. En este sentido, el análisis probabilista de la seguridad debería servir para diferenciar la confiabilidad y así evaluar de manera óptima la seguridad de un edificio, así como entre diferentes tipos de edificios.

De esta manera, la selección de un nivel de seguridad, basado en los niveles de comportamiento esperados del edificio, ante diferentes niveles de amenaza, debe estar a su vez relacionada con los costos que implican la elección y diseño de un determinado sistema resistente, de tal manera que sea posible evaluar cuáles son los beneficios y costos de alcanzar dicho nivel de seguridad.

### 3.3.4 ¿Cuáles son los beneficios de la seguridad?

El diseño de los edificios debe garantizar la seguridad de los ocupantes y minimizar las posibilidades de interrupción de servicios, así como de las pérdidas económicas. De esta manera, la seguridad de los edificios se puede considerar como un valor agregado a la infraestructura (Ellingwood 2001a).

En la valoración de los edificios y sistemas esenciales, no son directamente observables los beneficios asociados a su seguridad ante eventos potencialmente dañinos. Este puede considerarse como el valor añadido de la seguridad, el cual es discutido por May (2007). En este sentido, los beneficios de otorgar seguridad a los edificios y sistemas esenciales, además de cuantificarse respecto a las pérdidas directas e

indirectas, deben extenderse a las funciones que desempeñan en la comunidad para atender sus necesidades, lo cual lleva a establecer niveles de referencia y de calidad respecto a la oferta de sus servicios.

May (2007) señala que el logro del movimiento de los edificios verdes (*Green Buildings*<sup>15</sup>) es una respuesta a lo que se percibe como una necesidad social para la salud, como la eficiencia en el uso de la energía y en los costos de su operación. La seguridad sísmica aún no ha alcanzado un estatus similar que genere una preocupación común. Esto puede asociarse a que los beneficios sociales, no están bien articulados o reconocidos en las filosofías de diseño, como el diseño basado en comportamiento

De acuerdo con Holmes (2009), muchos programas de mitigación del riesgo sísmico, razonablemente satisfactorios, no han identificado otra expectativa de comportamiento más que la reducción del riesgo. Al respecto, se debe mecanizar a través de grupos técnicos la reducción del riesgo minimizando los costos de la pérdida directa y de la interrupción de servicios, ya que estos objetivos son considerados por los tomadores de decisiones para determinar una aceptabilidad política.

El enfoque tradicional y técnico de la seguridad en el análisis estructural debe ampliarse dando cabida a un enfoque sistémico que abarque un análisis económico, así como el contexto social y ambiental (Elms 2004). Chandler (2001) presenta una revisión multidisciplinar sobre el diseño basado en comportamiento. Este autor señala los nodos de conexión entre diferentes áreas que contribuyen al diseño basado en comportamiento, desde la ingeniería sísmológica y geología para la modelación de la actividad sísmica y de la peligrosidad, la dinámica de suelos para identificar los espectros de respuesta del suelo, hasta la dinámica estructural y la mecánica de materiales, para la definición de la respuesta de los edificios ante la demanda sísmica. Es necesario que el aporte de estas disciplinas, se conecte con las variables de decisión (pérdida económica, pérdida de funcionalidad, entre otras) relacionadas con el daño, o nivel de comportamiento de la estructura, para que el diseño basado en comportamiento permita mostrar los beneficios de mejorar la seguridad de las instalaciones y comunicar con mayor claridad sus resultados.

### 3.3.5 Confiabilidad del análisis

En el *Performance-Based Design*, el problema que se quiere resolver es verificar que no se exceda un nivel de comportamiento, durante la vida útil de la estructura, dada la probabilidad de ocurrencia de un evento de un determinado periodo de retorno. Este ejercicio representa un problema de confiabilidad en el que deben considerarse tanto las incertidumbres en la respuesta estructural, como en el movimiento sísmico.

Ghobarah (2001) señala que la confiabilidad del diseño basado en comportamiento es desconocida. Respecto a la confiabilidad del diseño, surgen preguntas respecto al nivel de amenaza que debe especificarse para diferentes niveles de comportamiento y con qué nivel de fiabilidad debería resistir el edificio cuando ocurre dicho nivel de amenaza. En este sentido, hace falta establecer referencias que permitan decidir si la probabilidad estimada de alcanzar un determinado nivel de comportamiento, cuando un edificio se somete a un cierto nivel de amenaza, es aceptable o no (Ellingwood 2001 b). Por ejemplo, una probabilidad de 0.017 de alcanzar un daño severo, cuando el edificio es sometido a un terremoto de 500 años de periodo de retorno es aceptable? En ausencia de estas referencias, es difícil ver como el diseño basado en comportamiento puede alcanzar todo su potencial sin una consideración explícita de los niveles de riesgo asociados al cumplimiento de los diferentes objetivos de comportamiento, para las diferentes categorías de edificios (Ellingwood 2001a).

---

<sup>15</sup> De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency-EPA), la construcción sostenible (Green Building) es la práctica para la creación de estructuras usando procesos que son responsables con el medio ambiente y eficientes en cuanto al uso de recursos a lo largo de su vida útil. Esta práctica incluye desde el diseño, la construcción, operación, mantenimiento, renovación y demolición. Esta práctica expande y complementa el diseño clásico de los edificios enfocado a la economía, utilidad, durabilidad y confort. Un edificio ecológico también se conoce como un edificio sostenible o de alto rendimiento. Para más detalles consultar: <http://www.epa.gov/greenbuilding/pubs/about.htm> [última consulta 29/12/2011]

En términos de confiabilidad, el diseño debe considerar, para cada estado límite, todas las posibles intensidades del movimiento sísmico en el sitio de interés. A pesar de que para el diseño sea de interés un cierto nivel de amenaza, como se considera en el diseño basado en comportamiento, debe notarse que diseñar con referencia a un solo parámetro en términos de excedencia de probabilidades no es suficiente, ya que cualquier estructura esta potencialmente expuesta durante su vida útil a todos los eventos posibles según la sismicidad de la zona en la que se encuentra construido (Hadjian 2002).

### 3.4 Evaluación de la confiabilidad y del riesgo de edificios

De acuerdo con Ellingwood (2001 b), el análisis del riesgo sísmico de edificios requiere los siguientes pasos: (i) la identificación de la amenaza sísmica, descrita por las probabilidades anuales de específicos niveles de movimiento del suelo  $a$ ,  $P[A=a]$ ; (ii) el análisis de la respuesta estructural del sistema y de sus componentes; y (iii) el cálculo de las probabilidades de alcanzar los diferentes estados límite (de daño)  $P(LS_i)$ , tal como se presenta en la siguiente expresión:

$$P(LS_i) = \sum_a P(LS_i | A = a)P(A = a) \quad [3-7]$$

En donde  $LS_i$  corresponde a un estado límite del comportamiento de la estructura;  $a$  corresponde al parámetro que representa el movimiento del suelo y  $A$  corresponde a un valor específico del movimiento del suelo. En esta expresión  $P(LS_i|A=a)$  representa la fragilidad de una estructura (Ellingwood 2001b).

En general, la fragilidad  $F_R(a)$  se define como la probabilidad de alcanzar un estado límite  $LS_i$ , condicionada a un valor particular de la demanda (aleatoria)  $a$ . Usualmente, la fragilidad de un elemento o de un sistema se modela a través de una función de distribución acumulativa de probabilidad lognormal, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_R(a) = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{a}{m_R} \right)}{\beta_R} \right] \quad [3-8]$$

En donde  $\Phi$  corresponde a la función de distribución acumulativa normal estándar,  $m_R$  al umbral del estado límite para el que la probabilidad de excedencia vale 0.5 (el valor medio) y  $\beta_R$  al logaritmo de la dispersión, la cual describe la variabilidad inherente de la respuesta del sistema cuando se somete a una demanda  $a$ . Un análisis de fragilidad puede usarse para identificar los márgenes de seguridad frente a eventos específicos para el diseño, evaluación y procedimientos de regulación. Un análisis de fragilidad es menos complejo, menos costoso y envuelve menos disciplinas que un estudio completo de riesgo, siendo sus resultados más fáciles de explicar a tomadores de decisiones no especializados o a autoridades reguladoras (Ellingwood 2001 b).

La estimación de la probabilidad de que un edificio expuesto al peligro sísmico alcance un estado límite  $LS_i$  (o una evaluación de la confiabilidad del sistema analizado) se puede realizar mediante la convolución de la fragilidad  $F_R(a)$  con el diferencial de la curva de peligrosidad sísmica  $\frac{dG_A}{da}$ . Al reemplazar la probabilidad condicional  $P(LS_i|A=a)$  por  $F_R(a)$  en la ecuación [3-7], se obtiene:

$$P(LS) = \int_0^{\infty} F_R(a) \frac{dG_A}{da} da \quad [3-9]$$

En donde  $F_R(a)$  es la fragilidad del edificio;  $G_A(a)$  representa la probabilidad de que un cierto valor del parámetro del movimiento del suelo  $a$ , sea excedido. A través de esta Ecuación [3-9] es posible identificar el rango de aceleraciones ( $a_{min}$ ,  $a_{max}$ ) para el cual un determinado porcentaje (por ejemplo, el 95%) de las probabilidades de alcanzar un determinado estado límite  $P(LS_i)$ , se encuentran definidas por aceleraciones en dicho rango. En otras palabras, la mayoría de las probabilidades del estado límite, calculadas a través de la ecuación [3-9], se derivan de terremotos que dan lugar a aceleraciones de dicho rango. En este sentido, puede decirse que dichos terremotos son los “contribuyentes dominantes” al riesgo sísmico. En Cornell (1994) se ha sugerido que dichas aceleraciones corresponden entre 1 a 2 veces las del terremoto de periodo de retorno de 475 años, el cuál ha sido tomado como base para el diseño sismoresistente (Ellingwood 2001 b).

Los actuales procedimientos de diseño consideran una probabilidad de excedencia del evento durante un periodo de vida útil para definir así el nivel de amenaza. No obstante, no se estima la probabilidad asociada al cumplimiento de los objetivos de comportamiento y por lo tanto no se conoce la confiabilidad del diseño. De esta manera, es conveniente dirigir el proceso de evaluación de la seguridad de los edificios, requiriendo, en parte, que los edificios no sufran “daños severos” con un intervalo de confianza (por ejemplo del 90%) dado que la estructura se somete a un evento con periodo de recurrencia de 500 años (Ellingwood 2001 b).

Al respecto, Ellingwood y Kinali (2009) desarrollan curvas de fragilidad y de amenaza con parámetros aleatorios y usando familias de distribuciones para considerar la incertidumbre epistémica en la estimación de las probabilidades de alcanzar los estados límites de una estructura, de acuerdo con la Ecuación [3-8]. De esta manera, el análisis que incluye incertidumbres aleatorias responde la pregunta: ¿Cuál es la probabilidad del estado de daño? mientras que al propagar la incertidumbre epistémica en forma separada se puede responder a otra pregunta: ¿Qué tan confiable es la probabilidad de daño estimada?

### 3.4.1 Variables para la toma de decisiones

Las estimaciones de riesgo presentadas en el apartado anterior hacen referencia al daño físico de los edificios. Adicionalmente, es necesario establecer métricas que sean útiles para la toma de decisiones respecto a otras variables como la protección de heridos, pérdidas económicas o la producción de servicios. En este sentido, investigadores del Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) han sugerido un marco conceptual en el cual se considera la incertidumbre en el análisis de las estructuras, y se definen variables de decisión para la gestión del riesgo (Cornell y Krawinkler 2000; Porter 2003). Los componentes de este marco conceptual son: el análisis de amenaza, la respuesta estructural y su vulnerabilidad, así como el análisis de pérdidas (Augusti y Ciampoli 2008).

En cuanto a la amenaza, la medida de intensidad ( $IM$ ) captura las características del movimiento del suelo que afectan la respuesta de los elementos estructurales y no estructurales. Puede ser un parámetro del movimiento o un espectro de respuesta. La peligrosidad sísmica en el sitio de análisis  $\lambda(IM)$ , puede estar definida como la tasa media anual de excedencia del parámetro de intensidad seleccionado  $IM$  (Augusti y Ciampoli 2008).

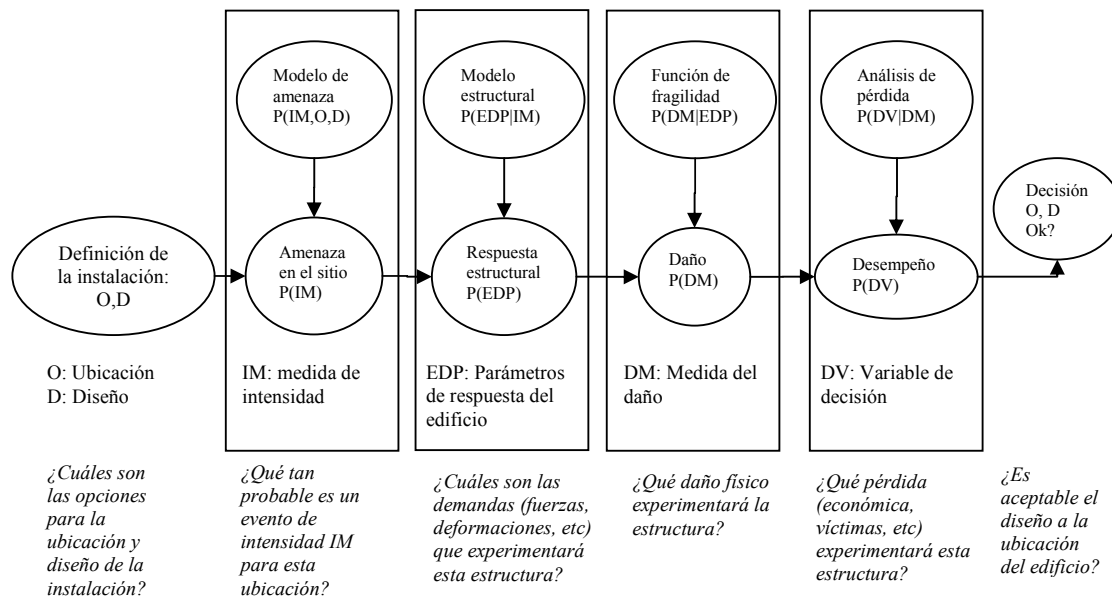
En cuanto a la capacidad y vulnerabilidad de los edificios, la respuesta sísmica de los elementos estructurales y no estructurales se describe a través de parámetros de demanda ( $EDP$ ). A partir de estos parámetros se definen las medidas del daño ( $DM$ ). Éstos son indicadores que describen las condiciones de los elementos estructurales y no estructurales en términos de los requisitos de funcionalidad, ocupación disponible, seguridad de la vida y reparaciones necesarias (Augusti y Ciampoli 2008).

Por último, la variable de decisión ( $DV$ ) traduce el daño estimado en cantidades útiles para la toma de decisiones asociadas a las pérdidas potenciales. Una  $DV$  puede definirse en términos de las pérdidas económicas directas, el tiempo de restauración, heridos, entre otras variables, y puede identificarse con un estado límite de la estructura (Augusti y Ciampoli 2008). El marco conceptual del diseño basado en ingeniería sísmica se expresa en la siguiente ecuación:

$$p[DV | O, D] = \iiint p[DV | DM] p[DM | EDP] p[EDP | IM | O, D] dIM dEDP dDM \quad [3-10]$$

En donde  $O$  corresponde a la ubicación del edificio,  $D$  representa el nivel de diseño del edificio,  $IM$  es el parámetro empleado para evaluar la intensidad del movimiento del suelo,  $EDP$  corresponde a los parámetros para evaluar la respuesta de los elementos estructurales y no estructurales,  $DM$  representa el parámetro empleado para medir el daño del edificio y  $DV$  a al parámetro empleado para traducir el daño en cantidades útiles para la toma de decisiones (Lee y Mosalam 2006).

Las ventajas de este enfoque se derivan de la posibilidad de desagregar la estimación de riesgos en diferentes componentes, observar la contribución de cada disciplina y combinar los resultados de las investigaciones individuales al presentar un esquema más amplio de aplicación con un formato consistente. Por otro lado, presenta las incertidumbres inherentes en todas las fases del problema (Augusti y Ciampoli 2008). En la Figura 3-3 se presenta un esquema de este enfoque.



**Figura 3-3 Esquema del enfoque del PEER para diseño basado en la ingeniería sísmica**

*Adaptado de Lee y Mosalam (2006)*

### 3.5 Comentarios a la evaluación de la confiabilidad y del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales y a la comunicación de sus resultados

La evaluación probabilista del riesgo se desarrolló en el análisis de secuencias de eventos en reactores nucleares. En dicho ámbito, se renunció a la idea de interpretar los resultados como probabilidades razonablemente precisas de los diferentes tipos de accidentes, siendo los cálculos empleados como datos preliminares para comparar diferentes secuencias de eventos e identificar elementos críticos (Rasmussen 1975). Contrario al enfoque de la industria nuclear, en la ingeniería estructural, el análisis probabilista se emplea para el diseño de elementos y sistemas estructurales. Así, el mayor problema de la evaluación probabilista es que exige mucho sobre los resultados, sin saber si éstos son lo suficientemente precisos como para ser usados en análisis económicos y de optimización (Doorn 2010). En esta sección se presentan las limitaciones de este enfoque, de tal manera que los resultados de los análisis de riesgo sean entendidos por los tomadores de decisiones, y para ello, que sean comunicados en forma apropiada por los analistas de riesgos.

### 3.5.1 Alcance del enfoque probabilista en la evaluación de riesgos

A diferencia del diseño de productos producidos en masa, en el cual las demandas y capacidades son relativamente predecibles, la tecnología es fácilmente controlable, existen datos para la realización de pruebas sobre los componentes y de modelos analíticos, así como es posible realizar procedimientos de prueba y error, el diseño de edificios es un ejercicio singular que supone incertidumbres en la capacidad y demanda, en el cual escasean los datos que repitan el comportamiento de las estructuras en las mismas condiciones y sobre el cual las consecuencias de falla son considerables (Ellingwood 2001a).

El uso de conceptos probabilistas en el diseño y evaluación de edificios se fundamenta en el reconocimiento de que tanto las cargas como la resistencia de los elementos son inciertas por naturaleza (Ellingwood 2001 b). El marco conceptual y las herramientas matemáticas del análisis probabilista de la seguridad permiten que los resultados sean revisados, reproducidos y comparados, a partir de una misma información. De tal manera que las evaluaciones son más objetivas, dando menor lugar a juicios de experto (Sexsmith 1999).

No obstante, el análisis probabilista de la seguridad, (así como el análisis de confiabilidad), no es práctico para un análisis realista de una estructura ya que no se conoce con certeza la distribución de probabilidad de las acciones, ni de la resistencia. De esta manera, las estimaciones de riesgo obtenidas no dejan de ser subjetivas, ya que resultan de un modelo (Ellingwood 2001 a). Por otro lado, estos tipos de análisis suponen la posibilidad de modelar tanto la demanda como la acción mediante un solo parámetro. Esto es particularmente de interés ante amenazas como la sísmica, en donde el espectro de aceleraciones, la aceleración pico y la duración, por ejemplo, son variables separadas que pueden interactuar de diferentes maneras (Elms 2004).

Aún cuando sea posible conocer las distribuciones de probabilidad en el análisis de confiabilidad y se disponga de métodos computacionales para calcularla, existe todavía una dificultad en la selección de una probabilidad de falla aceptable que permita acotar los resultados obtenidos de las Ecuaciones [3-7] y [3-9] (Ellingwood 2001 a).

Así, la confiabilidad (evaluada) de una estructura sólo puede compararse con la evaluación de confiabilidad de una alternativa, de tal forma que se llegue a un orden o ranking de preferencias (Elms 2004, Doorn 2010). Como resultado de la falta de confianza en las estimaciones de valores esperados de pérdida, los análisis de beneficio-costos se observan también débilmente aplicables (Sarewitz 2003).

Otra limitación del enfoque probabilista está asociada a la sobre-especificación de modelos y a la poca información relevante para justificarlos. A pesar de que el enfoque probabilista es valorado como una mejor opción para el diseño y evaluación, al considerar los parámetros de demanda y capacidad como variables aleatorias, dada la incertidumbre en sus valores, intentar describir completamente el comportamiento de un sistema puede no ser la mejor alternativa para representarlo, dependiendo del alcance y de los propósitos del análisis (Doorn 2010).

Otro interrogante sobre el análisis probabilista se refiere a ¿cómo diseñar una estructura que resista también las demandas que son desconocidas e inesperadas? El diseño para demandas no conocidas representa añadir resiliencia a la estructura (Elms 2004). Al respecto, los diseños basados en factores de seguridad son una mejor alternativa (Doorn 2010).

Dadas las limitaciones del análisis probabilista, en mayor medida, asociadas al grado de confianza de los resultados obtenidos, este enfoque no puede considerarse como la respuesta final para las decisiones sobre la seguridad, ya que, de momento, parece no poder dar una medida objetiva de la probabilidad de falla o de los valores de pérdida; asimismo, sus resultados no corresponden a frecuencias de falla en el mundo real (Doorn 2010). No obstante, estos métodos permiten establecer relaciones comparativas para la elección de alternativas de mayor seguridad. Así, reconocer las limitaciones permite que la toma de decisiones sobre cuánta protección otorgar a los edificios sea más transparente. Para esto, es necesario también que la comunicación de las evaluaciones de riesgo transmitan estos mensajes a los tomadores de decisiones.

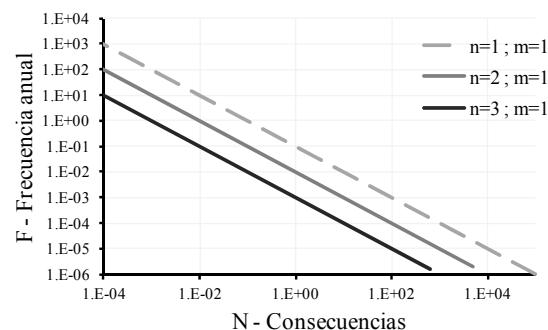
### 3.5.2 Valores de riesgo aceptable

El nivel de seguridad que se exige para un edificio representa una decisión respecto la pregunta, “¿Cuánta seguridad es suficiente?” (Ellingwood 2001 a). Así, una estructura se considera segura cuando el riesgo de falla esta debajo de un umbral o límite, el cuál es definido como un estándar en un determinado contexto (Elms 2004).

Sobre la definición de un valor de seguridad, o de riesgo aceptable, se hace necesariamente referencia al costo de dicha seguridad. De ser posible una definición de niveles óptimos de seguridad, estos estarán dados bajo la condición de que el costo de una unidad de seguridad (vidas salvadas, valor de los edificios y contenidos, valor de la producción) sea menor que el costo del bien asegurado, tal como se presentó en el apartado 3.3.3. Así, desde el punto de vista social, una actividad, o un riesgo, es aceptado considerando el intercambio entre pérdidas potenciales y beneficios (un análisis de beneficio-costos) para el total de la población (Vrijling et al. 1998). Esta decisión hace referencia a un contexto, ya que, tanto la aceptación de riesgos, como los estándares de seguridad, pueden variar con el tiempo (OI 1995).

Un nivel de riesgo es inaceptable cuando las partes involucradas en el riesgo desconocen el valor de pérdidas potenciales o carecen de información para tomar una decisión racional y/o no hay recursos suficientes para controlarlos (Breyer 1993). En teoría, la medida cuantitativa del comportamiento aceptable se expresa fundamentalmente en un nivel de confiabilidad o de riesgo aceptable, expresado en probabilidades o costos (Ellingwood 2001a). Al respecto, Vrouwenvelder et al. (2001) presentan un criterio económico para la definición del riesgo aceptable basado en la estimación de los costos totales del proyecto, el cual abarca los costos iniciales de construcción, más el valor presente de las pérdidas potenciales durante toda su vida útil.

Los umbrales para el riesgo aceptable tienden a ser altos para riesgos que son considerados a largo plazo, es decir, debidos a fenómenos con largos periodos de recurrencia o, de forma equivalente, con bajas probabilidades de ocurrencia. Así, cuando la amenaza es desconocida, o cuando genera grandes consecuencias, los agentes (individuos, gobiernos, empresas) muestran aversión al riesgo. Una alternativa para representar la aversión al riesgo y definir valores de riesgo socialmente aceptable se presenta en las curvas denominadas Frecuencia-Consecuencias (F-N) (Figura 3-4), que pueden ser de la forma  $FN^m < 10^n$ , en donde  $F$  es la frecuencia de ocurrencia del fenómeno o de las pérdidas,  $N$  corresponde al valor de las pérdidas (por ejemplo, el número de vidas en peligro) y  $m$  y  $n$  son constantes empleadas para reflejar el grado de aversión al riesgo, de tal forma que a mayores valores de  $n$ , mayor aversión (Ellingwood 2001 a, Vrouwenvelder et al. 2001).



**Figura 3-4 Ejemplo de curvas de frecuencia-consecuencia (curvas F-N)**

En las curvas F-N se establecen los niveles en los cuales los valores de pérdida y su frecuencia se consideran tolerables o aceptables. Entre los límites de aceptables e inaceptables, se define una zona en la cual las intervenciones deben realizarse con el fin de que el riesgo disminuya hasta valores tan bajos como sea razonable (*As Low as Reasonably Possible-ALARP*). Vrijling et al. (1998) presentan un conjunto de reglas para definir los niveles de riesgo aceptable, aplicados en diferentes ejemplos sobre varios tipos de infraestructura, modelando el riesgo individual, social, nacional y local, a través de curvas de frecuencia-consecuencias (curvas F-N).



Entre las dificultades para utilizar este tipo de herramientas para la gestión de la seguridad se encuentran la estimación de los efectos directos e indirectos como consecuencia del fallo de las estructuras. Por otro lado, las estimaciones de riesgo, al corresponder a evaluaciones subjetivas, no pueden ser comparables con los valores observados en desastres (Ellingwood 2001 b) y por lo tanto no pueden ser empleados como estándares o referencias de seguridad.

En el ámbito político, de alguna manera se puede considerar que el término de riesgo aceptable implica una elección inaceptable o políticamente inasumible. Pocos políticos están dispuestos a afirmar que cualquier lesión o muerte en un evento o catástrofe son aceptables. Cuando los políticos son forzados a hablar de riesgos, tienden a girar sobre un insostenible estándar de riesgo cero. Más aún, algunos no se sienten cómodos con las estimaciones basadas en resultados inciertos, llevando a preguntarse: ¿Por qué hablar sobre este problema, si no hay certeza de que ocurra? ¿Por qué confundir a la población con declaraciones probabilistas? (May 2007).

Así, en la definición de los niveles de seguridad y del riesgo aceptable, ocurre que cuando las probabilidades son muy pequeñas y las consecuencias muy grandes, la decisión óptima no es del todo sensible al valor de las probabilidades. De esta manera, debe examinarse el grado en el cual la información subjetiva y los modelos adoptados afectan las decisiones (Sexsmith 1999). Este problema puede promover la aplicación del principio de precaución. No obstante, dicho principio no es operacional, ya que hace públicamente plausible una discusión indefinida respecto a la decisión sobre la realización o no de medidas de reducción de riesgos (Starr 2003).

Así, un análisis comparativo de beneficio-costos puede ser una alternativa para tomar una decisión racional. Ya que estos análisis tienen incertidumbres debido al conocimiento limitado, su aplicación debe considerarse como una herramienta de juicio para la toma de decisiones (Star 2003). A su vez, la aceptación del riesgo no puede basarse únicamente en evaluaciones de valores esperados o límites superiores de pérdidas. Se requiere un panorama más comprensivo sobre el riesgo (Aven y Kristensen, 2005).

### 3.5.3 Significado y comunicación de las estimaciones de riesgo

En los análisis de riesgos, como el formulado en la ecuación [3-9] y en la ecuación [3-10] se hace necesario interpretar y defender las probabilidades anuales de alcanzar los estados límites (o cualquier variable de decisión), cuyos órdenes son de  $10^{-3}$  o menores (Ellingwood 2001b), siendo un estándar la probabilidad anual de muerte cuyos valores de referencia son del orden de  $10^{-4}$  (Elms 2004). Estos umbrales de probabilidad son difíciles de comprender tanto para los tomadores de decisiones, como para los analistas.

Cuando estas cifras se comparan con las probabilidades de fallo observadas, pueden encontrarse diferentes órdenes de magnitud, lo cual muestra, o bien la imposibilidad de comparar los datos con los resultados de los modelos, o bien los efectos que trae la incertidumbre epistémica y ontológica en la gestión de la seguridad de las estructuras (Elms 2004).

A este respecto, se señala que la evaluación de la confiabilidad (*notional reliability*) hace referencia a una noción de la confiabilidad, a un juicio, más no a un hecho (Aven y Kristensen, 2005), de tal forma que no puede ser comparable con las estadísticas de fallos, estadísticas de muerte u otras bases de datos similares, y por lo tanto, no deben interpretarse como una medida objetiva de la frecuencia relativa de fallo (Ellingwood 2001a).

En determinados casos, cuando existe poca información fiable, presentar y comunicar las estimaciones de riesgo es difícil, y frecuentemente esta comunicación se centra en los valores obtenidos, ignorando en cierto grado la incertidumbre. Intentar describir también la incertidumbre es una tarea difícil, pudiendo llegar en algunos casos a estimaciones de pérdidas probables en unos rangos muy amplios, de tal manera que el mensaje puede ser incluso distorsionado por una incertidumbre excesiva (Aven y Kristensen 2005).

De esta manera, en la práctica de la ingeniería estructural, los especialistas adoptan una interpretación bayesiana de las probabilidades de falla, en la cual, las probabilidades son consideradas como la mejor expresión posible del grado de conocimiento en la ocurrencia de cierto evento y no como predictores no sesgados de las frecuencias de ocurrencia que pueden ser observadas en la práctica (Doorn 2010 citando a JCSS 2001 y a Ditlevsen & Madsen 2007).

De acuerdo con lo anterior, las estimaciones de riesgo invariablemente se basan en modelos, más que en datos experimentales, dada la complejidad de los sistemas estructurales. En estas circunstancias, la credibilidad de la plataforma computacional y de las bases de datos de soporte se convierte en un asunto crítico. Mientras que la mejor manera de validar un modelo es a través de comparaciones entre tasas de falla calculadas y observadas, estas comparaciones sólo pueden realizarse para modelos simplificados y casos específicos (Ellingwood 2001 b).

En ausencia de dichas comparaciones, el análisis de riesgo debe ser transparente en el sentido que los modelos computacionales (simulaciones) y las bases de datos estén bien documentadas, sean explicables y comprensibles por personas no especializadas y estén sujetas a la verificación por parte de revisores externos. Si las estimaciones cuantitativas de riesgo (expresadas en términos de tasas anuales de excedencia o probabilidades de exceder un estado límite), van a ser usadas como base para políticas públicas o de seguridad, los riesgos calculados deben ser el resultado de un proceso comunicable y comprensible que facilite al público y a los profesionales la toma de decisiones. (Ellingwood 2001 a).

Entonces, ¿Qué significan los juicios de experto y las evaluaciones? Es necesario que los resultados de las estimaciones de riesgo y el mensaje sobre el análisis de las consecuencias se comprendan en un contexto, interpretando los resultados a la luz del marco de valores y de las metas políticas (Aven y Kristensen 2005). En cuanto al proceso evaluación-gestión del riesgo, se recalca que la evaluación de riesgos es un procedimiento técnico con fundamentos científicos. La gestión del riesgo no necesariamente es una actividad científica. Lo realmente importante es que la evaluación de riesgos, combinada con otra información social, económica, política y tecnológica, intenta encontrar medidas para la reducción de pérdidas potenciales (Doorn 2010).

### **3.6 Marco conceptual para la evaluación de la seguridad y riesgo de los edificios y sistemas esenciales**

La gestión de la seguridad sísmica de edificios y sistemas ha sido un proceso de reacción frente a los desastres ocurridos, orientado especialmente por los efectos negativos en infraestructura cuyo valor y potencial para generar eventos desastrosos han sido considerables. Así, tomadores de decisiones y comités de expertos han definido valores de riesgo aceptable y objetivos de comportamiento para regular la seguridad de la infraestructura según las consecuencias esperadas de su pérdida.

Así, un análisis de seguridad está asociado a un umbral definido, descrito por el nivel de comportamiento y el nivel de amenaza, de acuerdo a la filosofía del diseño basado en comportamiento y en los requerimientos de los códigos de construcción sismoresistente. En contraste, las consecuencias del fallo de la estructura ante eventos sísmicos (pérdidas económicas, reducción de servicios, o cualquier otra variable de decisión) pueden ser modeladas a través de un enfoque de beneficio-costos considerando todos los eventos que pueden generar daños (Elms 2004).

De esta manera, en este trabajo de análisis y gestión del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales, la evaluación de su seguridad estará relacionada tanto con los requisitos de los códigos sismoresistentes como con el valor de la instalación y los costos de sus pérdidas potenciales. Para este fin, en el Capítulo 4, se presenta una descripción más detallada de los métodos para evaluar el comportamiento de los edificios ante escenarios sísmicos de determinado periodo de retorno, con el fin de estimar el daño esperado y así evaluar su seguridad considerando los requisitos de comportamiento sugeridos por el comité VISION 2000 (SEAOC 1995). En los capítulos 5, 6 y 7 se presentan aplicaciones de esta metodología a edificios de importancia especial, así como a centros educativos y centros de salud en Cataluña, respectivamente.

Para el caso de evaluación de riesgos, los criterios que definen el valor (y su clasificación como esenciales) se presentan a continuación. Estos criterios representan diferentes tipos de valores que pueden no ser medibles en las mismas unidades, pero cuyo dimensionado puede contribuir a definir cuáles son los valores de riesgo aceptable a través de un análisis de beneficio-costos:

- (i) *La Producción de servicios de atención a la comunidad* implica la necesidad de su reposición en caso de pérdida; esta condición hace referencia a su rol en la sociedad. Son edificios y/o sistemas que producen servicios necesarios para el funcionamiento de las comunidades en situaciones de normalidad; su función no es exclusiva para situaciones de emergencia. Por lo tanto, en las fases de recuperación post desastre, estos edificios y/o sistemas deben rehabilitarse para garantizar un normal funcionamiento en las comunidades.
- (ii) *Potencial de crisis*: Este criterio hace referencia a los efectos negativos que tiene la pérdida de su funcionamiento durante eventos desastrosos. En este sentido, su fallo puede agravar las condiciones de una emergencia, dada la reducción de un servicio necesario para la atención de eventos desastrosos. Por otro lado, pueden desencadenar otros eventos peligrosos u ocasionar otras pérdidas debido a su fallo.
- (iii) *El valor y posibilidad de su recuperación*: en general, un edificio o un sistema se considera esencial si su costo de reposición es elevado o si es de difícil recuperación/reconstrucción. Esta valoración puede incluir dimensiones económicas, sociales, culturales y ambientales, entre otras. Los edificios y sistemas esenciales representan una infraestructura que ha sido construida de acuerdo a los recursos disponibles y a las necesidades de las comunidades. Asimismo, la reposición de los servicios y de la infraestructura implica la asignación de recursos técnicos y económicos. En caso de no existir fondos (de emergencia, de reconstrucción o instrumentos financieros para la gestión de las pérdidas) que puedan destinarse a la reconstrucción de daños por desastres, dichos recursos deben obtenerse de la redistribución o reasignación de presupuestos de inversión previamente acordados para otros fines, y por lo tanto, el proceso de reconstrucción representa el costo de oportunidad de los objetivos originales de tales inversiones<sup>16</sup> (Keipi 2006).

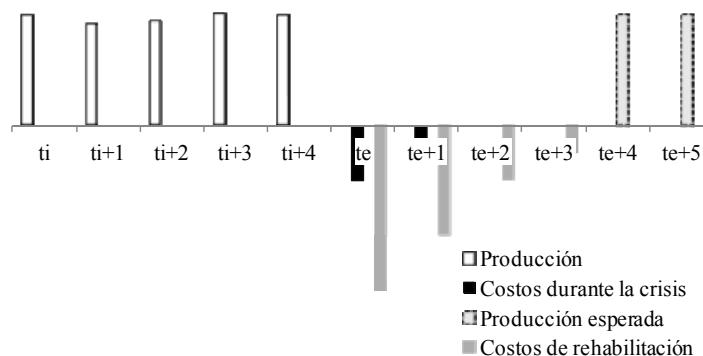
De esta manera, la definición de esencial está asociada a un valor de riesgo aceptable y éste, a la disponibilidad de recursos y a la capacidad de la comunidad para reparar/reconstruir la infraestructura afectada. Estas condiciones son las que, en cada contexto, definen las prioridades respecto a la seguridad de los edificios.

Ya que la definición de esencial está asociada a las pérdidas (efectos) esperados por eventos desastrosos, es necesario evaluar todos los costos que puedan ser cuantificables, considerando los costos de reparación, los costos de su pérdida de funcionamiento durante emergencias, así como la pérdida de servicios en etapas post-desastre. A partir de estos valores, y empleando un análisis de beneficio-costos, es posible identificar el nivel de seguridad que desea alcanzarse para los edificios y sistemas esenciales.

Como ejemplo, en la Figura 3-5 se presenta un esquema de los costos de la pérdida de un edificio que produce servicios. El edificio a partir del periodo  $t_i$  produce una determinada cantidad de servicios. En el periodo  $t_e$  ocurre un evento desastroso en el cual sufre daños. A partir de este periodo y en adelante, se presentan costos de reparación y dejan de recibirse los beneficios de la producción esperada hasta que el edificio no sea reestablecido. Adicionalmente, se presentan costos entre los periodos  $t_e$  y  $t_e+1$ , debido al daño de la instalación durante la crisis, sea por la generación de nuevos desastres, o por la pérdida de servicios indispensables durante la emergencia.

---

<sup>16</sup> Costo de Oportunidad: Coste de oportunidad: en economía, el costo de oportunidad o coste alternativo designa el coste de la inversión de los recursos disponibles, en una oportunidad económica, a costa de la mejor inversión alternativa disponible, o también el valor de la mejor opción no realizada. El término fue acuñado por Friedrich von Wieser en su «Theorie der gesellschaftlichen Wirtschaft» (Teoría de la Economía Social -1914-). Se refiere a aquello de lo que un agente se priva o renuncia cuando hace una elección o toma de una decisión. [http://es.wikipedia.org/wiki/Coste\\_de\\_oportunidad](http://es.wikipedia.org/wiki/Coste_de_oportunidad) (Último acceso: 22/10/2012)



**Figura 3-5 Esquema de los costos asociados a las pérdidas por desastre**

La discriminación y cuantificación de los costos de la pérdida, los cuales pueden ser considerados como diferentes variables de decisión, permiten identificar las alternativas para la reducción de riesgos y de mejoramiento de la respuesta de los sistemas. La reducción de la vulnerabilidad puede realizarse a través de medidas que no necesariamente están vinculadas con el reforzamiento estructural de los edificios, sino con la reducción de la vulnerabilidad no estructural, o con el aumento de la organización y logística para la respuesta a emergencias, entre otras.

Este esquema para valorar los costos asociados a las pérdidas por desastre representa el marco conceptual de esta tesis para el desarrollo de estimaciones del riesgo sísmico y de análisis de beneficio-costo en edificios y sistemas esenciales. En el Capítulo 8 se presentan más detalles de los procedimientos empleados para la estimación de riesgos y de relaciones de beneficio-costo siguiendo un enfoque probabilista, similar al desarrollado por el PEER. Un ejemplo de la aplicación de esta metodología se presenta en el Capítulo 9, respecto a la evaluación de los beneficios y costos de la reducción del riesgo sísmico de centros educativos en países de Latinoamérica. En cuanto a la estimación de los costos asociados al fallo de los edificios esenciales, en el Capítulo 10 se presentan y aplican metodologías para evaluar los impactos de la interrupción de los servicios esenciales durante la atención de la emergencia, así como en situaciones post-desastre.

### 3.7 Resumen y discusión

En este Capítulo se presenta el marco conceptual para la evaluación de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Se presentan los criterios propuestos en los códigos de diseño sismoresistente, así como en el diseño basado en comportamiento, para la definición de la seguridad de los edificios. Al respecto, se resaltan las ventajas que tiene el análisis de seguridad de las instalaciones dado que se cuenta con procedimientos y criterios estándar para la evaluación del comportamiento de las estructuras. No obstante, estos enfoques tienen limitaciones en cuanto al desconocimiento de la confiabilidad del análisis, a la subjetividad de la definición de los requisitos de seguridad de la infraestructura empleando una clasificación de edificios según categorías de uso, así como a la falta de comunicación de los beneficios que se obtienen al exigir mayores niveles de seguridad.

Como complemento al análisis de seguridad, se presentan fundamentos metodológicos para el análisis de confiabilidad y estimación del riesgo sísmico de edificios. A este respecto, se comenta su alcance y limitaciones debidas, entre otros aspectos, a la falta de precisión en los datos disponibles para el análisis. La incertidumbre en las estimaciones de riesgo hace que los resultados sean válidos en el contexto del modelo empleado y que, por lo tanto, no puedan compararse con tasas de fallas observadas. Así, la utilidad de la evaluación de riesgos se encuentra en la posibilidad de realizar comparaciones respecto a las pérdidas estimadas (en el modelo) entre diferentes alternativas estructurales de las instalaciones analizadas.

Ya que las estimaciones cuantitativas de riesgo (expresados en términos de tasas anuales de excedencia o probabilidades de exceder un estado límite), son usadas como base para políticas públicas o de seguridad, los riesgos calculados deben ser el resultado de un proceso comunicable y comprensible que facilite al público y a los profesionales la toma de decisiones. Por lo tanto, deben identificarse variables de decisión apropiadas, que representen adecuadamente los valores de los edificios y los beneficios de su seguridad.

Bajo estas consideraciones, se ha presentado un marco conceptual para la evaluación de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales, en el cual, la relación entre su importancia y la seguridad sísmica que requieren, se expresa a través de la evaluación de valores de riesgo aceptable. En la definición del riesgo aceptable intervienen diversas variables de decisión relacionadas principalmente con: i) la necesidad de su reposición (la producción de servicios indispensables); ii) la posibilidad de su recuperación (los costos de la pérdida y la capacidad de la comunidad para reponerlo) y iii) los efectos de su pérdida en situaciones de emergencia.



## 4 Metodología para la evaluación de la seguridad sísmica

### 4.1 Introducción

El análisis de seguridad sísmica de los edificios hace referencia a la evaluación de un objetivo de comportamiento específico, o de un determinado estado límite o de daño, dada la ocurrencia de un evento sísmico de cierto periodo de retorno, o de forma equivalente, de cierta probabilidad anual de excedencia.

En el Plan Especial de emergencias SÍSMICAS en CATaluña (SISMICAT) se realizó una evaluación de la seguridad sísmica de algunos edificios esenciales. En dicho estudio se consideró como medida del terremoto la Intensidad Macrosísmica. En cuanto a la vulnerabilidad de los edificios, éstos se clasificaron en clases de vulnerabilidad. Para cada clase de vulnerabilidad se estimó una matriz de probabilidad de daño que relaciona, para cada intensidad macrosísmica, la probabilidad de alcanzar cada estado de daño. Así, los escenarios de daño se realizaron para un periodo de retorno de 500 años; para dicho escenario se identificaron las intensidades macrosísmicas esperadas a nivel municipal. Las intensidades fueron obtenidas incluyendo efectos de sitio, según la clasificación de suelos en el territorio catalán (Goula et al. 1998).

Paralelamente, a finales de los años 90 y a comienzos de los años 2000, se promovió el análisis de la seguridad de edificios siguiendo la filosofía de diseño basado en comportamiento. En este contexto se desarrollaron los proyectos HAZUS 99 (FEMA 1999), HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003) y RISK-UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003), cuyas metodologías incluyen, por un lado, la evaluación de la fragilidad de los edificios a partir de sus espectros de capacidad, y por el otro, la evaluación de demanda sísmica a partir de los espectros elásticos de respuesta. Su aplicación ha sido considerada para la evaluación de edificios esenciales en Irizarry (2004) y en Lantada (2007).

En este sentido, para actualizar el Plan SISMICAT, se propone adoptar las metodologías basadas en espectros de capacidad tal como han sido propuestas en el proyecto RISK UE para evaluar la seguridad de un conjunto de edificios y sistemas esenciales de Cataluña. Más concretamente, se analizan centros educativos, instalaciones de salud, entre otros edificios de importancia especial. Los márgenes de seguridad de estos edificios se calculan adoptando la metodología simplificada de espectros de capacidad, la cual se resume en los siguientes pasos:

#### *Estimación de la acción sísmica*

- i) Cálculo de espectros de probabilidad uniforme para los periodos de retorno de interés
- ii) Adaptación de los espectros de probabilidad uniforme a las formas espectrales sugeridas en códigos sismoresistentes
- iii) Caracterización de suelos a partir de un mapa geomecánico

#### *Evaluación del comportamiento de los edificios*

- iv) Inspección visual y clasificación de los edificios analizados en tipologías estructurales cuyos espectros de capacidad son conocidos.
- v) Evaluación del comportamiento del edificio siguiendo el método simplificado de espectros de capacidad y estimación del daño empleando curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño.

Evaluación de la seguridad: estimación de daños y de consecuencias esperadas

- vi) Evaluación de la seguridad del edificio mediante la comparación del daño evaluado con estándares y objetivos de comportamiento
- vii) Estimación y evaluación de las pérdidas potenciales empleando funciones de pérdida

En la Figura 4-1 se presenta un diagrama de esta metodología.

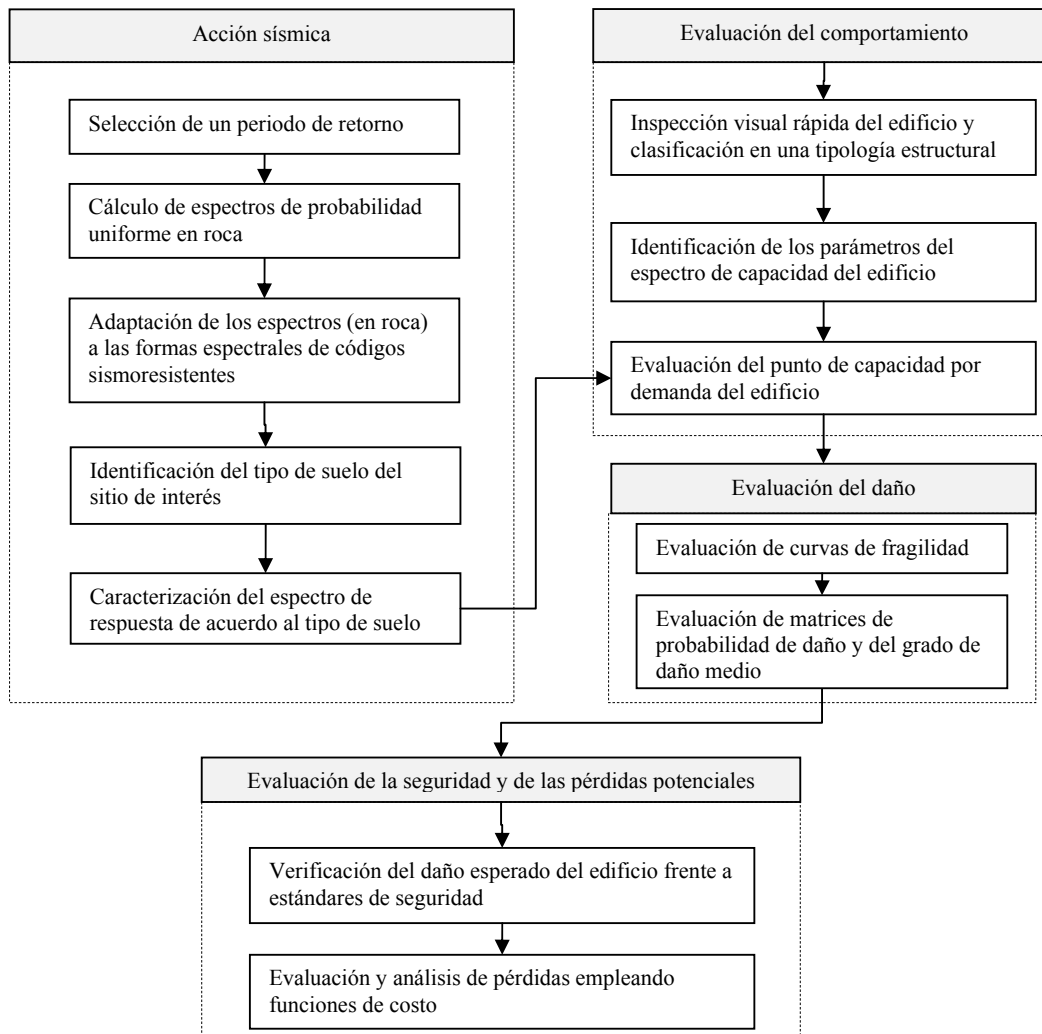


Figura 4-1 Diagrama de la metodología para la evaluación de la seguridad sísmica de edificios

A continuación se presentan detalles de la metodología en cuanto a la evaluación de la demanda sísmica, de la vulnerabilidad de los edificios, así como del daño y consecuencias esperadas. Finalmente, se presentan ejemplos de la aplicación de esta metodología para evaluar la seguridad y pérdidas esperadas en hospitales y centros educativos.

#### 4.2 Evaluación de la acción sísmica

La definición de los espectros de demanda se basa en:

- i) El cálculo de espectros de probabilidad uniforme en roca (Secanell 2008, GEOTER 2008) y su adaptación a las formas espectrales propuestas en el Eurocódigo 8 -EC 8- (EN-1998-1 2004) y en la



Norma de Construcción Sismoresistente Española NCSE-02 (2002), considerando los periodos de retorno y los niveles de seguridad sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995).

- ii) La adaptación de los espectros EC 8 Tipo II para tipos de suelo A, B, B', C, D y E basados en el desarrollo del mapa de mesozonación sísmica de Cataluña. Este mapa usa una clasificación de tipos de suelo en superficie análoga a la establecida en el código EC 8. Además, considera una estimación aproximada de espesores y contrastes con los materiales subyacentes (IGC 2011).

#### 4.2.1 Cálculo de espectros de probabilidad uniforme: análisis probabilista de la peligrosidad sísmica

En este apartado se presentan aspectos generales sobre la evaluación probabilista de la peligrosidad sísmica (PSHA) en términos espectrales. Este análisis comprende: i) la definición de los datos sísmicos; ii) la definición de modelos sismotectónicos; iii) la aplicación de un modelo de ocurrencia de terremotos; iv) la aplicación de modelos de atenuación del movimiento sísmico y v) el cálculo de la peligrosidad sísmica probabilista. Una descripción detallada de este procedimiento usando técnicas de Montecarlo y de árbol lógico, así como su aplicación en el territorio catalán, se encuentra en GEOTER (2008).

##### *Datos sísmicos*

En este estudio se ha usado el catálogo sísmico desarrollado en Secanell et al. (2008). Es un catálogo unificado a partir de los datos existentes en cuatro catálogos macrosísmicos y en cinco catálogos instrumentales. Por un lado, se obtuvo un catálogo macrosísmico uniendo los catálogos Servei Geològic de Catalunya-SGC (Susagna y Goula 1999), Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2003), SISFRANCE (BRGM et al. 2004) y el compendio de 140 terremotos históricos de Levret et al. (1996).

Por otro lado, se obtuvo un catálogo instrumental a partir de los catálogos del Servei Geològic de Catalunya (SGC 2003), Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2003), Laboratoire de Détection Géophysique-LDG, Bureau Central Sismologique Français-BCSF y Observatoire Midi Pyrénées-OMP (Souriau y Pauchet, 1998). Finalmente, el catálogo unificado se obtuvo integrando ambos catálogos, macrosísmico e instrumental. La magnitud homogénea adoptada corresponde a la magnitud local,  $M_L$ . Por último, sobre este catálogo se realizó un proceso de limpiado de réplicas y precursores usando el software GEOREPLIQUES, desarrollado por GEOTER. Así mismo, se realizó un estudio de los periodos de completitud mediante la metodología de Stepp (1972) y mediante el software GEOSIS (Martin et al. 2002 b).

##### *Modelos sismotectónicos*

En este análisis se consideró un modelo basado en zonas sísmicas (y en la ausencia de zonas, un modelo de "smoothing"). Dos zonaciones sismotectónicas han sido consideradas para tener en cuenta las incertidumbres existentes relativas a la zonación sísmica. La primera corresponde a una síntesis de los trabajos de Fleta et al. (1996), Secanell et al. (1999), Secanell et al. (2004), para el noreste de España y sureste de Francia; Autran et al. (1998), Dominique et al. (1998), en el marco del grupo de trabajo de peligrosidad sísmica de la AFPS (Association Française du génie Parasismique) así como Martin et al. (2002 a), en el marco de la revisión de la zonación sísmica de Francia.

La segunda zonación utilizada corresponde a la realizada por el Bureau de Recherches Geologiques et Minières (BRGM) para el diseño sísmico de ciertas instalaciones especiales en Francia. (Blès et al. 1998). Esta zonación ha sido ampliada hacia el sur para cubrir toda la región de estudio. Finalmente, se destaca que el modelo de suavizado (Woo 1996) representa un modelo alternativo al modelo clásico de zonación ya que, de hecho, representa la ausencia total de zonación sismotectónica.

##### *Modelo de ocurrencia de terremotos*

Para el estudio se adoptó un modelo doblemente truncado de Gutenberg-Richter. Este modelo supone una ocurrencia espacial de terremotos según una distribución de Poisson y una distribución de las magnitudes

siguiendo una distribución doblemente truncada. En Secanell et al. (2008) y en GEOTER (2008) se encuentran los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$  del modelo.

#### *Modelos de atenuación del movimiento sísmico*

En este proyecto se utilizaron las siguientes leyes de atenuación: una ley de atenuación regional desarrollada a partir de datos locales (Tapia 2006) para 6 periodos espectrales, la relación de Ambraseys (1995) para el PGA y la relación de Ambraseys et al. (1996) para valores de periodos espectrales diferentes al PGA.

#### *Cálculo de la peligrosidad sísmica*

Para la evaluación de la peligrosidad se han utilizado dos modelos conceptuales diferentes: zonificado (Cornell, 1968, McGuire, 1976) y no zonificado (Woo, 1996). Para el modelo zonificado se utilizó el software CRISIS99 (Ordaz et al. 1999) que permite el cálculo de espectros de respuesta uniforme y de curvas de peligrosidad sísmica. Para representar la dispersión de resultados se ha introducido una metodología de propagación de las incertidumbres utilizando árboles lógicos y procesos de Montecarlo a través del software GEOSIS (Martin et al. 2002 b).

Para el modelo no zonificado se utilizó el software desarrollado por Woo (1996). Se ha de señalar que el proceso de cálculo de las tasas de ocurrencia de terremotos de los dos modelos no es el mismo. El método de árbol lógico y de Montecarlo se ha utilizado también en el caso no zonificado.

La propagación de las incertidumbres epistémica y aleatoria se realizó mediante la combinación del método del árbol lógico donde cada rama principal representa un modelo alternativo del análisis probabilista de peligrosidad sísmica (PSHA) y la técnica de Montecarlo que permite la generación aleatoria de diversos parámetros de entrada del análisis.

Para el tratamiento de la incertidumbre epistémica, el árbol lógico cuenta con dos ramas principales correspondientes al modelo conceptual (modelo basado en zonación sismotectónica o modelo no zonificado). Para los modelos zonificados se consideran los dos tipos de zonaciones sismotectónicas. Para cada tipo de zonación, se utilizan las tres relaciones de atenuación mencionadas. En cuanto al modelo no zonificado, se utilizan sólo los dos modelos de atenuación de Ambraseys.

Para propagar la incertidumbre de carácter aleatorio, asociada a los parámetros del modelo de ocurrencia de terremotos, se ha utilizado la técnica de Montecarlo para generar los parámetros de la distribución de Gutenberg-Richter siguiendo una distribución gaussiana. Para generar las profundidades y magnitudes máximas se ha empleado una distribución uniforme. De esta manera, cada modelo generado se considera una rama secundaria del árbol lógico y representa un modelo probable.

#### *Mapas probabilistas de peligrosidad sísmica*

Para cada rama secundaria y para cada punto de la malla del análisis se obtiene la tasa de excedencia de un cierto nivel de aceleración. Esta tasa de excedencia da la aceleración asociada a un cierto periodo de retorno, que es el resultado final buscado. Al repetir este procedimiento en todos los puntos de la malla, y una vez definidos los pesos estadísticos de cada rama principal del árbol lógico, se obtienen las distribuciones de aceleración para cada punto de la malla. Los resultados finales se presentan en términos de los valores de aceleración mediana y percentiles 15% y 85%. Los cálculos se han realizado para tres periodos de retorno, 475, 975 y 1975 años, y para diez periodos estructurales 0.0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5 y 2 segundos. La Figura 4-2 muestra los mapas de aceleración (PGA) mediana correspondientes a un periodo de retorno de 475 años. Todos los cálculos se han realizado suponiendo un tipo de terreno equivalente a roca firme.

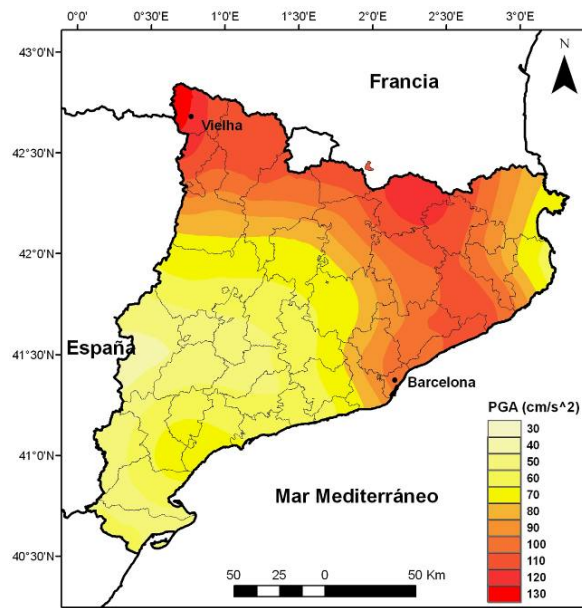


Figura 4-2 PGA (Tr 475 años, valores medios)

#### 4.2.2 Adaptación de los espectros probabilistas a espectros normativos

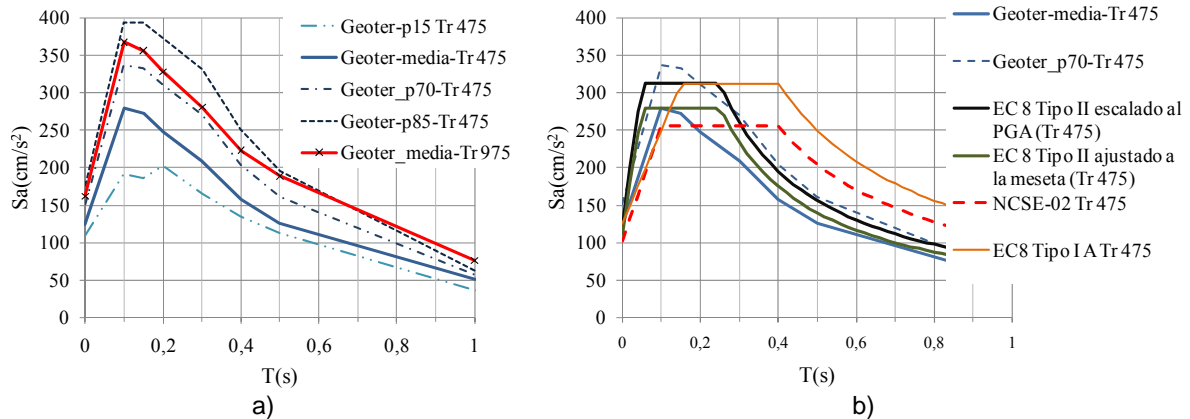
A través del análisis probabilista de la peligrosidad sísmica es posible obtener espectros de amenaza uniforme en un determinado sitio de interés. Dichos espectros corresponden a valores en roca firme, por lo tanto, para conocer las acciones sísmicas en la superficie, hace falta introducir los efectos del tipo de suelo. Para este fin, se propone adaptar los espectros obtenidos en el estudio de amenaza a los formatos propuestos en códigos sismoresistentes. De esta manera, para la estimación de la demanda sísmica en la superficie, se utilizarían los espectros correspondientes para cada tipo de suelo.

Así, primero se comparan los espectros probabilistas obtenidos en el PSHA con los espectros de respuesta elástica propuestos en la NCSE-02 (2002) y los Tipos I y II del EC 8 (EN-1998-1 2004). En el caso específico de Barcelona, se hace una comparación con los obtenidos por Irizarry (2004) en la zonación sísmica realizada para esta ciudad. El objetivo de este análisis es identificar una alternativa para normalizar los espectros obtenidos en el PSHA y representar razonablemente la demanda sísmica para los periodos de retorno considerados en los códigos sismoresistentes. A su vez, esta comparación permite revisar si los espectros normativos son o no más conservativos frente a los valores medios obtenidos en el PSHA. Esta simplificación de la demanda sísmica será útil para la realización de análisis regionales de la seguridad de un conjunto de edificios esenciales, como hospitales y centros educativos de Cataluña.

Para la comparación de los espectros se han considerado dos alternativas. En la primera se realizan ajustes a espectros del EC 8 (Tipo II) para que la meseta de aceleración constante sea igual al valor máximo de los espectros obtenidos en el PSHA. La segunda consiste en normalizar los espectros del EC 8 Tipo II según el PGA del estudio. Para evaluar la similitud entre los espectros se ha estimado el Error Absoluto Medio (MAE).

En la Figura 4-3 y en la Figura 4-4 se presentan los espectros normativos ajustados a la meseta de aceleración constante, los espectros normativos escalados al PGA del análisis, así como los percentiles 15, 50, 70 y 85 (p15, media, p70 y p85) obtenidos por GEOTER (2008) para lugares cercanos a los municipios de Vielha (capital de la comarca de Val d'Aran) y Barcelona, para un periodo de retorno de 475 años. En estas Figuras se observa que los espectros Tipo II del EC-8 se aproximan más a los obtenidos en el PSHA, siendo consistentes con su uso para zonas de sismicidad moderada. De esta manera, éstos se consideran más representativos para la modelización de la demanda sísmica, a diferencia de los propuestos por la NCSE-02

y los Tipo I del EC-8, los cuales representan valores más altos de aceleración espectral para los periodos más largos (ver Figura 4-3 b)

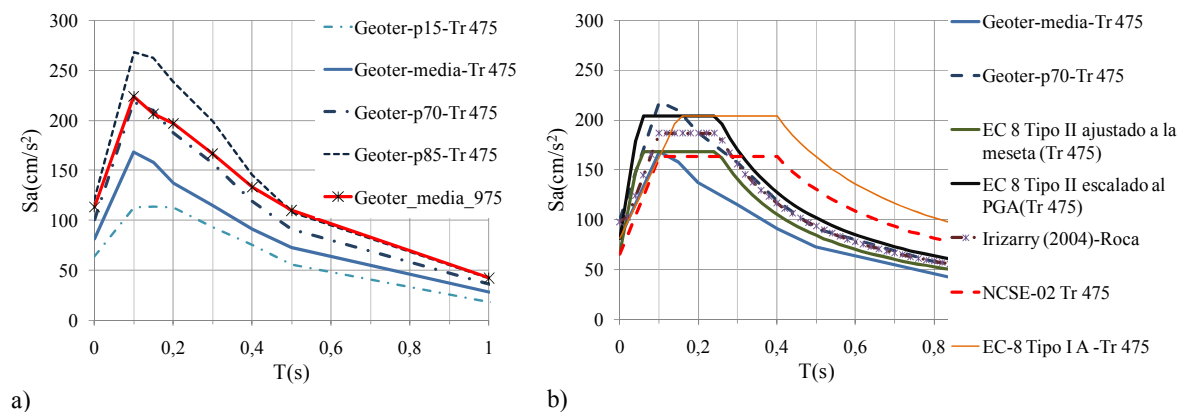


**Figura 4-3 Espectros de respuesta elástica en roca para Vielha. a) Espectro medio (Geoter) para Tr 475 y distintos percentiles. Espectro medio (Geoter) para Tr 975. b) Espectro medio (Geoter) para Tr475 y percentil 70 y espectros normativos con distintos escalados.**

En el caso de Barcelona, se observa que el espectro propuesto por Irizarry (2004) se ajusta más a los resultados del estudio comparándolo con los espectros Tipo I del EC 8 y de la NCSE-02 escalados al PGA. Los valores estimados por Irizarry son ligeramente mayores al valor medio obtenido en el PSHA (Ver Tabla 4-1). La diferencia es más significativa en la meseta de aceleración constante.

**Tabla 4-1 PGA (cm/s<sup>2</sup>) estimado en Barcelona y Vielha**

Casos	PSHA (Tr 475 años)				NCSE-02 (Tr 500 años)	Irizarry (2004) - Probabilista (Tr 475 años)
	p15	P50 (media)	p70	p85		
Barcelona	63.49	81.53	100.78	119.7	39.02	98.1
Vielha	109.7	125	151.28	177.1	39.02	---

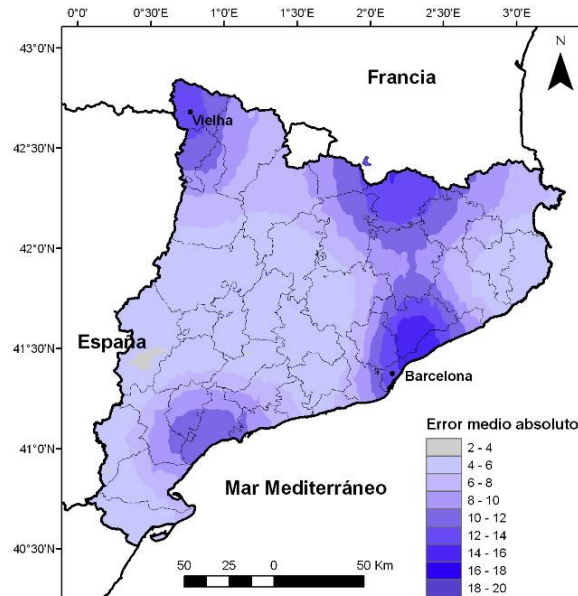


**Figura 4-4 Espectros de respuesta elástica en roca para Barcelona. a) Espectro medio (GEOTER) para Tr 475 y distintos percentiles. Espectro medio (GEOTER) para Tr 975. b) Espectro medio (GEOTER) para Tr475 y percentil 70 y espectros normativos con distintos escalados**

Se debe resaltar que en estos ejemplos, los espectros de la NCSE-02 no se han escalado respecto a la aceleración básica sugerida en la norma (0.04g) ya que éste valor es inferior a los valores medios obtenidos en el PSHA (Ver Tabla 4-1). Si se escalaran, los espectros resultarían comparables, o incluso inferiores, a los correspondientes al percentil 15 obtenido en el estudio. Nuevamente, se señala que el

objetivo de este análisis es identificar un tipo de espectros que represente adecuadamente los obtenidos en el PSHA.

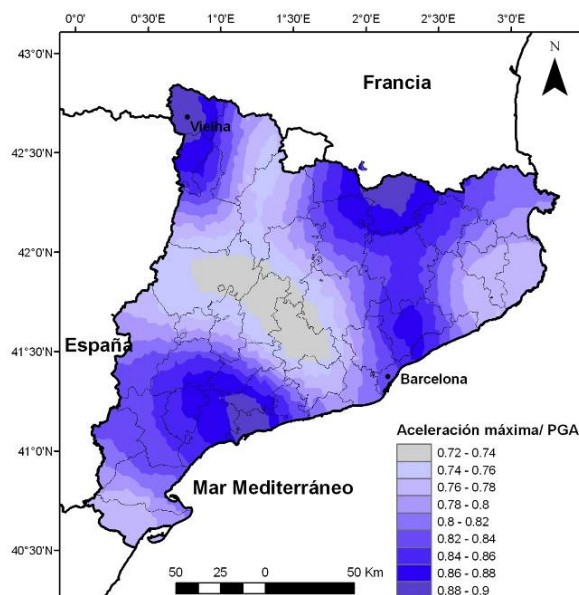
Estos ejemplos ilustran las alternativas de comparación entre los espectros en sitios de moderada y baja peligrosidad. Para valorar estas alternativas, hace falta realizar una comparación en todos los puntos del estudio. En este sentido, la Figura 4-5 presenta el MAE calculado en la comparación entre los valores medios de los espectros obtenidos por GEOTER (2008) para escenarios de periodo de retorno de 475, con las formas espectrales del EC8 Tipo II, ajustadas a la meseta de aceleración constante. Los valores del MAE muestran que, en cada periodo estructural de los espectros, las diferencias pueden ser en promedio entre 2 y 20  $\text{cm/s}^2$  según su localización. En la Figura 4-2 se presenta el PGA medio estimado para un periodo de retorno de 475 años. En estas Figuras se observa que, en las zonas de menor PGA, los espectros normativos son más similares a los obtenidos en el PSHA.



**Figura 4-5 Error medio absoluto. Comparación con espectros EC 8 Tipo II escalados al PGA y ajustados en la meseta de aceleración constante (Tr 475 años, valores medios)**

En este ajuste de las formas espectrales del EC 8, es de interés revisar la razón entre la meseta de aceleración constante y el PGA y su correspondencia con el valor 2.5 propuesto en los espectros del EC 8. En la Figura 4-6 se presenta dicha razón normalizada por 2.5. Al respecto, se señala que los espectros del EC8 Tipo II, escalados por el PGA correspondiente al escenario de periodo de retorno de 475 años, son mayores que los valores medios estimados en el PSHA. Estas observaciones también son válidas cuando se consideran los espectros de escenarios de periodo de retorno de 975 años. Así, el ajuste de las formas espectrales a la meseta de aceleración constante es una alternativa para reducir estos espectros por los factores presentados en la Figura 4-6. De esta manera, los espectros reducidos son comparables a los obtenidos en el PSHA. Adicionalmente, se observa que cuanto menor sea este factor, los espectros se ajustan mejor (el MAE es menor) a los obtenidos en el PSHA (ver Figura 4-5).

En esta alternativa de ajuste, el PGA estimado en el PSHA se reduce en todos los casos por el factor presentado en la Figura 4-6, el cual varía entre 0.7 y 0.9 en la zona de análisis. Para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales, este tipo de espectros pueden ser útiles para representar la demanda sísmica correspondiente a los valores medios de eventos de periodo de retorno de 475 años. Se señala que para estos eventos, se requiere que estas instalaciones presenten daños leves y permanezcan operacionales, de acuerdo a las consideraciones del Comité VISION 2000 (SEAOC 1995). Así, estos escenarios son de interés para los encargados de la protección civil (así como de los sectores de educación y salud) para evaluar el comportamiento de estas instalaciones.



**Figura 4-6 Razón entre la aceleración máxima y el PGA, normalizada al valor 2.5 (Tr 475 años, valores medios)**

La otra alternativa de ajuste tiene como objetivo conservar el valor del PGA obtenido en el PSHA. En la Figura 4-3 y en la Figura 4-4 se observa que los espectros Tipo II del EC-8, escalados al PGA del estudio, se acercan a percentiles superiores al 50% para un periodo de retorno de 475 años. Ya que se conocen los valores medios y las desviaciones estándar para cada uno de los puntos de los espectros, se calcularon los percentiles 60, 65, 70, 75 y 80 suponiendo una distribución normal. Así, se identificó que los espectros escalados del EC 8 Tipo II se asemejan a aquellos estimados para un percentil 70 (los valores del MAE oscilan entre 3.6 y 18  $\text{cm/s}^2$ ). Así, para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales, el uso de estos espectros implica un mayor nivel de seguridad, lo cual corresponde a la filosofía de diseño y comportamiento deseado de estos edificios.

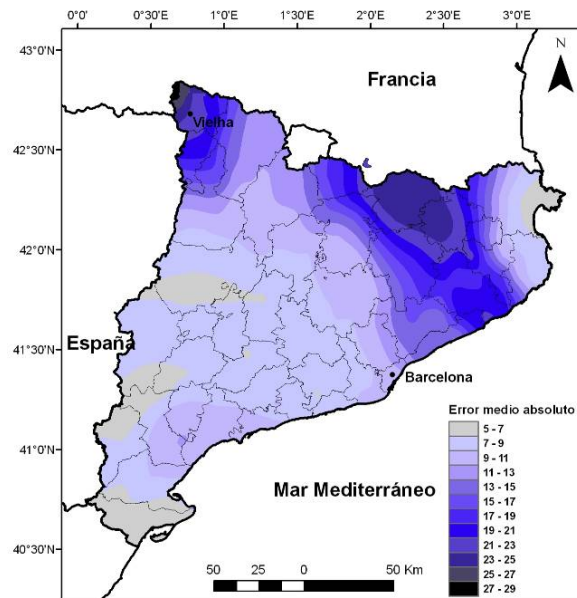
Para tener una idea de cuál sería la seguridad asociada al uso de estos espectros, se compararon las formas espectrales del EC8, normalizadas por el PGA correspondiente para escenarios de periodo de retorno de 475 años, con los valores medios estimados para un periodo de retorno de 975 años. Para su evaluación se calculó el MAE para todos los puntos considerados en el estudio (Ver Figura 4-7). Estos valores muestran que, en cada periodo de los espectros, las diferencias pueden ser en promedio entre 5 y 29  $\text{cm/s}^2$  según su localización, de tal forma que en las zonas de mayor PGA se encuentran mayores valores del MAE.

Aunque en algunos puntos las diferencias son apreciables, se observa que las formas espectrales del EC 8 tipo II, escalados al PGA correspondiente a eventos de periodo de retorno de 475 años, son comparables a los obtenidos en el PSHA para un periodo de retorno de 975 años. Éste ejercicio debe entenderse como una alternativa para simplificar la demanda sísmica obtenida en un análisis probabilista de la peligrosidad, utilizando las formas espectrales propuestas en los códigos de construcción sismoresistente. A su vez, permite identificar cuáles son los niveles de seguridad (expresados en periodos de retorno) que corresponden a percentiles mayores al 50%.

Esta simplificación es equivalente a reducir los espectros del EC 8 por la razón entre el PGA estimado para escenarios de periodo de retorno de 975 y 475 años. En la Figura 4-8 se presentan estos valores para Cataluña. Se observa que los valores del PGA para escenarios de periodo de retorno de 975 años son entre 1.21 y 1.45 veces más grandes que los PGA's estimados para periodos de retorno de 475 años. En forma análoga, los valores del PGA para escenarios de periodo de retorno de 475 años pueden ser del orden de 0.7 y 0.83 veces el PGA estimado para escenarios de periodo de retorno de 975 años. Vale la pena resaltar que éstos últimos valores son semejantes a los factores de ajuste a la meseta de aceleración constante presentados en la Figura 4-6. De esta manera, dadas estas coincidencias, utilizar un PGA menor (en este



caso el PGA de 475 años) para evaluar la acción sísmica correspondiente a un periodo de retorno de 975 años, resulta semejante a ajustar las formas del EC 8 a la meseta de aceleración constante.



**Figura 4-7 Error medio absoluto. Comparación entre espectros del EC 8 Tipo II y los espectros del PSHA para periodos de retorno de 975 años (valores medios)**

En la Tabla 2 se presenta un resumen del MAE calculado en diferentes casos en los que se comparan los espectros del EC 8 tipo II con los obtenidos en el PSHA para diferentes periodos de retorno y percentiles. Estos valores se calcularon en todos los puntos de la zona de estudio:

- Caso 1: comparación entre los espectros del EC8 tipo II, ajustados a la meseta de aceleración constante, con los obtenidos en el PSHA para un periodo de retorno de 475 años (valores medios).
- Caso 2: comparación entre los espectros del EC8 tipo II, escalados al PGA del estudio, con los obtenidos en el PSHA para un periodo de retorno de 475 años (valores medios).
- Caso 3: comparación entre los espectros del EC 8 tipo II, escalados al PGA del estudio y los espectros correspondientes al percentil 70, para un periodo de retorno de 475 años.
- Caso 4: comparación entre los espectros correspondientes al percentil 70, para un periodo de retorno de 475 años y los espectros correspondientes al valor medio para un periodo de retorno de 975 años.
- Caso 5: comparación entre los espectros del EC8, escalados al PGA del estudio (Tr 475 años) con los espectros del PSHA correspondientes a los valores medios para un periodo de retorno de 975 años.

**Tabla 4-2 Valores del error absoluto medio (MAE) en  $\text{cm/s}^2$**

Datos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Mínimo	2,87	7,45	3,61	3,14	5,29
Máximo	19,09	38,51	18,70	29,43	29,18
Promedio	7,50	23,09	8,98	12,94	11,53
Desviación estándar	3,34	7,02	2,54	5,86	5,16

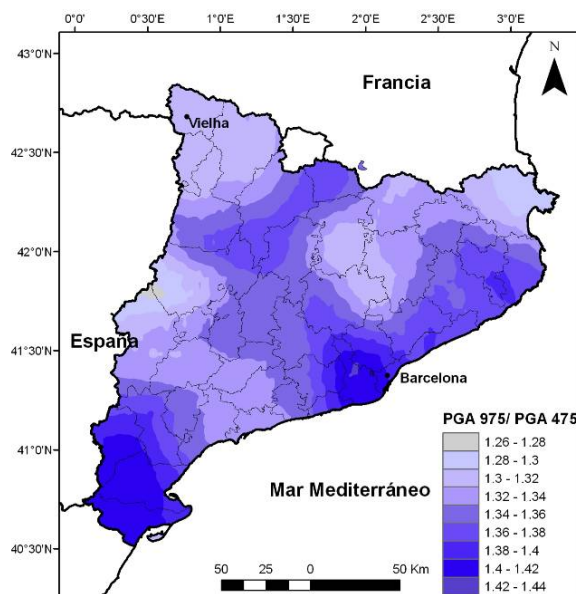
En la Tabla 4-2 se observa que los espectros del EC 8 Tipo II, escalados al PGA del estudio, para eventos de periodo de retorno de 475 años, son más cercanos (menor MAE) al percentil 70 (caso 3) que al percentil 50 (caso 2). Los valores de los casos 4 y 5 reflejan las similitudes entre los espectros correspondientes al percentil 70 para escenarios de periodo de retorno de 475 años, los espectros

correspondientes al percentil 50 para periodos de retorno de 975 años y los espectros del EC8 Tipo II escalados al PGA estimado para escenarios de periodo de retorno de 475 años.

Para eventos de periodo de retorno de 975 años, (poco probables), el comportamiento deseado de los edificios esenciales debe ser tal que, aunque se presenten daños moderados en la estructura, se garantice la seguridad de los ocupantes (SEAOC 1995). Para aumentar la confiabilidad de estos edificios, las normas de diseño sísmoresistente usan coeficientes de importancia que incrementan los espectros normativos. Como alternativa para revisar los valores de estos coeficientes, en la Figura 4-8 se presenta la razón entre el valor medio del PGA estimado para periodos de retorno de 975 y 475 años. Se observa que ésta razón varía entre 1.21 y 1.45 en el área del análisis, encontrándose los valores más altos en los lugares en los cuales se espera menor PGA.

En el caso de la NCSE-02, el coeficiente adimensional de riesgo,  $\rho$  (el cual es función de la probabilidad aceptable de que se exceda la aceleración de diseño en el período de vida de la construcción), tiene un valor de 1.3 para edificios de importancia especial. Así, éste coeficiente implica el análisis del comportamiento de los edificios esenciales para periodos de retorno del orden de 975 años.

En el EC 8, el factor de importancia  $\gamma_I$ , por el cual debe amplificarse la acción sísmica para alcanzar la misma probabilidad de excedencia en un periodo de exposición  $T_L$  respecto a un periodo de exposición de referencia  $T_{LR}$ , se calcula como  $\gamma_I \approx (T_{LR}/T_L)^{-1/k}$ . En esta relación, el parámetro  $k$  depende de la sismicidad de la zona y generalmente toma un valor de 3. Siguiendo estas recomendaciones, para una probabilidad de excedencia del 10%, considerando  $T_L$  igual a 100 años (Tr 975 años) y  $T_{LR}$  50 años (Tr 475 años), el factor de importancia toma un valor de 1.26, el cuál es comparable al sugerido en la NCSE-02.



**Figura 4-8 Razón entre el PGA obtenido para periodos de retorno de 975 y 475 años (valores medios)**

Se observa que los coeficientes de importancia de los edificios esenciales son cercanos a los valores presentados en la Figura 4-8. Al ser una simplificación para aumentar la confiabilidad de estas instalaciones suponiendo una mayor demanda sísmica, contribuyen a realizar el análisis del comportamiento de estas instalaciones cuando no se cuenta con información para diferentes periodos de retorno.

Referente a los espectros normalizados, Chandler et al. (2001) señalan que la sensibilidad del PGA limita su uso en zonas de baja o moderada sismicidad. Así, estos espectros son válidos en los lugares en los cuáles se han recolectado los datos experimentales. Así mismo, estos autores señalan que los espectros normalizados no toman en cuenta la variación del espectro de respuesta ante cambios en la magnitud y la



distancia. Así, se reconoce que adoptar un formato para los espectros es simplificar la información obtenida en el PSHA. No obstante, resulta útil para una estimación aproximada de los daños esperados en un conjunto de edificios esenciales ante diferentes escenarios.

#### 4.2.3 Identificación de suelos y caracterización de los espectros de respuesta

La estimación de la acción sísmica en la superficie, a escala regional, implica definir los tipos de suelo que se van a considerar, las metodologías para identificar los tipos de suelo y finalmente, cuáles son los factores de amplificación que deben asignarse a cada tipo de suelo. Al respecto, la velocidad de las ondas de corte  $V_{s30}$ , es un criterio empleado para clasificar los suelos y así determinar los efectos de sitio. No obstante, en Castellaro et al. (2008) se presentan algunas limitaciones de esta aproximación.

En el programa europeo Interreg IVA 2007-2013 Francia-España-Andorra SISPy<sup>17</sup> se ha propuesto la clasificación de los suelos en 6 clases (Tabla 4-3), basadas en las categorías del EC8 e incorporando nuevas clases para considerar efectos de la geología profunda. Para cada tipo de suelo, la definición de los espectros de respuesta se ha realizado combinando los resultados de medidas en campo con los parámetros de las formas espectrales de los códigos de construcción sismoresistente español, francés y del EC 8 para los espectros tipo II. De esta manera, los espectros resultantes pueden ser observados como una adaptación de los espectros del EC 8 para las condiciones de la región del Pirineo. Los parámetros de los espectros se resumen en la Tabla 4-4.

**Tabla 4-3 Descripción de los tipos de suelo considerados en el proyecto SISPy**

Tipo de suelo	Descripción	$V_{s30}$ (m/s)	Espesor (m)
Tipo A	Roca, o formación geológica similar, incluyendo como máximo 5 metros de materiales más débiles en la superficie.	>800	<5
Tipo B	Depósitos de arena muy densa, grava o arcilla muy rígida. Espesor de bajo a medio. Este suelo se caracteriza por un incremento gradual de las propiedades mecánicas con la profundidad.	360-800	5-100
Tipo B'	Similar al suelo B, con un espesor muy grande. Esta clase presenta menos amplificación a periodos menores y más amplificación en periodos medios. De estudios previos, $\Delta I$ se estimó alrededor de 0.5	360-800	>100
Tipo C	Depósitos de arena medianamente densa, grava, o arcillas rígidas de espesor medio o bajo. El valor de $T_c$ se fija alrededor de 0.3 s para representar amplificaciones en periodos medianos	180-360	20-100
Tipo D	Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo, con o sin algunas capas de débil cohesión, o de suelo de ligera a gran cohesión predominantemente, con espesor medio o bajo. Se esperan menores amplificaciones que en el tipo E para periodos bajos.	<180	20-100
Tipo E	Un perfil de suelo compuesto por una capa aluvial superficial, con valores de $V_s$ de suelo tipo C o D y espesores que varían entre 5 y 20 m, soportados por materiales más rígidos con $V_s > 800$ m/s		5-20
Tipo F	Esta nueva categoría tiene en cuenta suelos tipo C y D con espesores mayores que 100 m. Para esta razón, los valores de $T_c$ se definen mayores que los demás (para amplificar los periodos más largos)	<360	>100

<sup>17</sup> Para mayor información consultar: <http://www.sispyr.eu/?lang=es> [Última consulta 07/01/2012]

**Tabla 4-4 Parámetros de los espectros de respuesta propuestos en el proyecto SISpyr**

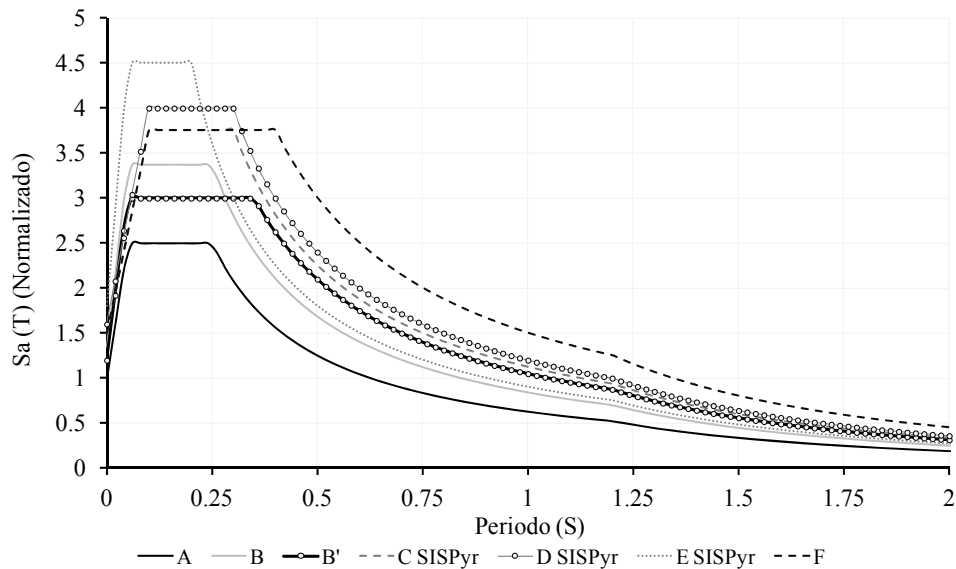
Tipo de suelo	Tipo de espectro	Parámetros				
		$S_{TS}$	$T_b(s)$	$T_c(s)$	$T_d(s)$	$\Delta I$
A	A-EC8 tipo II	1.00	0.05	0.25	1.20	0
B	B-EC8 tipo II	1.35	0.05	0.25	1.20	0.5
B'	Nuevo	1.20	0.05	0.35	1.20	0.5
C	C-EC8 tipo II	1.50	0.10	0.3	1.20	1
D	D EC8 tipo II con S del tipo E	1.60	0.10	0.30	1.20	1
E	E EC8 tipo II con S del tipo D	1.80	0.05	0.20	1.20	1.5
F	Nuevo	1.50	0.10	0.40	1.20	1

Nota: Para la definición de los espectros ver la ecuación 4.1

Los espectros de respuesta correspondientes a cada tipo de suelo se definen siguiendo las formas espectrales del EC 8 Tipo II y considerando los parámetros presentados en la Tabla 4-4, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Sa(T) = \begin{cases} a_g S_{TS} \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (2.5\eta - 1) \right] & \text{si } 0 \leq T \leq T_B \\ 2.5 a_g S_{TS} \eta & \text{si } T_B \leq T \leq T_C \\ 2.5 a_g S_{TS} \eta \left( \frac{T_C}{T} \right) & \text{si } T_C \leq T \leq T_D \\ 2.5 a_g S_{TS} \eta \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right) & \text{Si } T_D \leq T \leq 4s \end{cases} \quad [4.1]$$

En donde  $a_g$  corresponde a la aceleración pico en roca para el periodo de retorno considerado (475 o 975 años)  $S_{TS}$  corresponde al factor de amplificación correspondiente a cada tipo de suelo y  $\eta$  corresponde al factor de corrección por amortiguamiento. Se considera igual a la unidad ya que se considera un amortiguamiento del 5%. En la Figura 4-9 se presentan los espectros de respuesta elástica correspondientes para cada tipo de suelo y normalizados ( $a_g=1$ )



**Figura 4-9 Espectros de respuesta (normalizados) según tipos de suelo**

En cuanto a la identificación del tipo de suelos en el territorio catalán, En la Figura 4-10 se presenta el mapa obtenido del estudio de mesozonación sísmica.

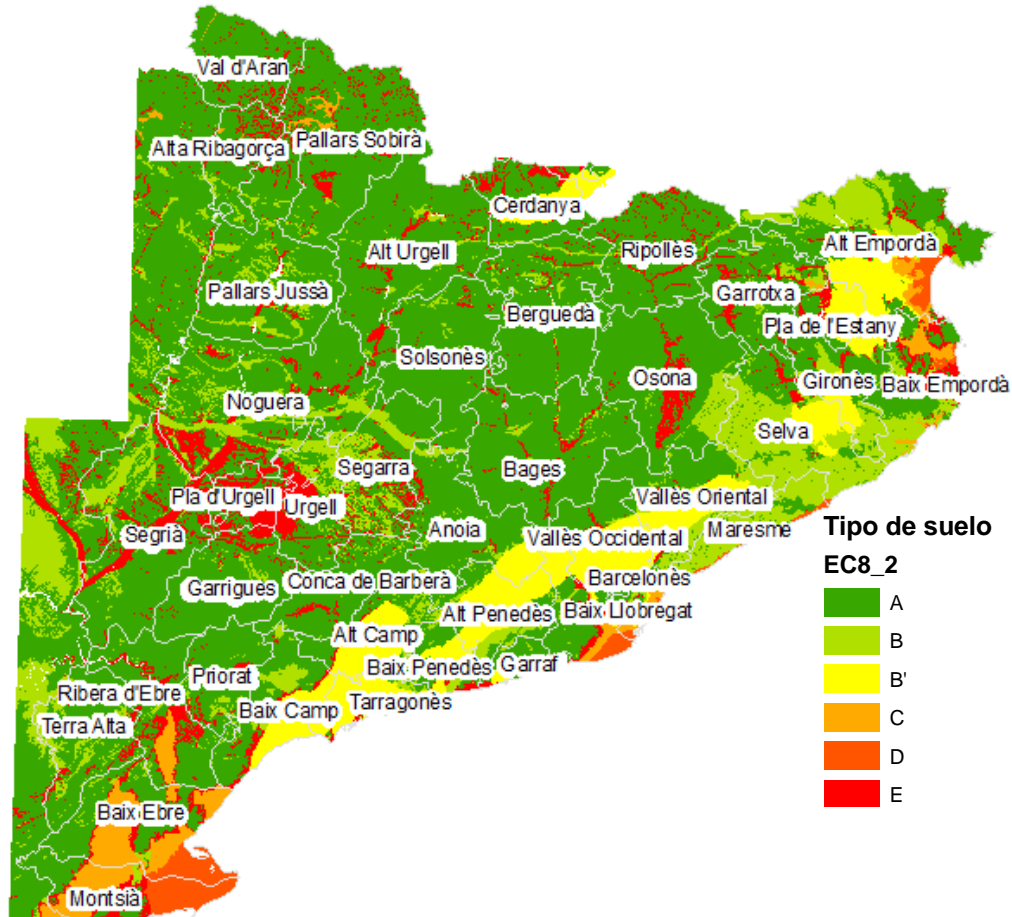


Figura 4-10 Mapa de mesozonación sísmica

Fuente (IGC 2011)

### 4.3 Evaluación de la vulnerabilidad estructural de edificios

#### 4.3.1 Inspección y clasificación de edificios: uso de formularios para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales

El Instituto Geológico de Cataluña, en conjunto con la Universidad Politécnica de Cataluña, elaboró dos formularios para la evaluación de la vulnerabilidad de hospitales y centros educativos, cuyo uso puede extenderse a otros edificios esenciales (IGC 2010). El Formulario 1, abarca datos básicos de las instalaciones, relacionados con su ubicación (calle y número, código postal, municipio) y contacto (teléfonos y persona de enlace). Respecto a la oferta de servicios, en el caso de los hospitales, se solicita información sobre el tipo de hospital (básico, de referencia o de alta tecnología), el número de camas y el porcentaje de ocupación. En el caso de los centros educativos, se solicita información sobre el nivel de enseñanza y el número de estudiantes.

Por otro lado, el Formulario 2 se centra en datos de la estructura de los edificios y así se incluyen datos relacionados con la altura (número de plantas sobre rasante), el año o periodo de construcción y la tipología estructural, siguiendo la matriz tipológica propuesta en el proyecto RISK-UE (ver Tabla 4-5). Para considerar otros detalles estructurales se presentan calificaciones cualitativas para la irregularidad en

planta y en altura, la posibilidad de golpeteo, la existencia de columnas cortas, muros con demasiadas aberturas, daños previos y asentamientos diferenciales.

Estos formularios cuentan con un documento de instrucciones en el cual se describen los datos solicitados y se dan indicaciones para rellenarlos. Así mismo, se dispone de un anexo técnico en el que se presenta con mayor detalle los datos relacionados con la estructura del edificio. En el Anexo A se encuentran los Formularios propuestos, al igual que instrucciones para rellenarlos y el documento técnico de soporte.

**Tabla 4-5 Tipologías estructurales consideradas**

Material de construcción	Sistema estructural	
Mampostería	M1.1	Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada
	M1.2	Muros de carga con mampostería de piedra tallada
	M1.3	Muros de carga de mampostería de sillería
	M2	Muros de adobe
	M3.1	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera
	M3.2	Muros de carga de mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería
	M3.3	Con forjados mixtos de acero y mampostería
	M3.4	Con forjados de losas de hormigón armado
	M4	Muros de carga de mampostería reforzada o confinada
	M5	Edificio de mampostería rehabilitado
Hormigón armado	RC1	Estructuras de hormigón resistentes a momento
	RC2	Muros de cortante de hormigón armado
	RC3.1	Estructuras regulares con tabiquería de mampostería
	RC3.2	Estructuras irregulares con tabiquería de mampostería
	RC4	Sistemas duales con muros y pórticos de hormigón armado
	RC5	Muros de hormigón prefabricado
	RC6	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón
Estructura metálica	S2	Estructuras metálicas arriostradas
	S3	Estructuras metálicas con tabiquería de mampostería no reforzada
	S4	Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados <i>“in situ”</i>
	S5	Sistemas o estructuras mixtas de acero y hormigón armado
Madera	W	Estructuras de madera

Para rellenar estos formularios es aconsejable realizar, en la medida de lo posible, consultas sobre las memorias de cálculo, planos estructurales y/o arquitectónicos, fotos, bases de datos catastrales o cualquier otra información relevante. Asimismo, es recomendable realizar una inspección visual rápida para verificar o identificar las propiedades estructurales de los edificios. Para estas visitas también es conveniente la participación de personal técnico con conocimientos en arquitectura y/o análisis estructural, acompañado de una persona de contacto de la instalación que facilite el acceso al edificio y a la información solicitada. Otros procedimientos y recomendaciones para el desarrollo de inspecciones visuales rápidas se encuentran en FEMA (2002).

A partir de la inspección de los edificios y del análisis de la información recogida en los formularios, debe ser posible clasificar los edificios en tipologías estructurales. Así, cada edificio estará caracterizado por una tipología estructural para la cual se han definido los correspondientes espectros de capacidad y, a partir de estos, las curvas de fragilidad para los estados de daño leve, moderado, extensivo y completo, de conformidad con la metodología de nivel 2 propuesta en el proyecto RISK UE. En el Anexo B se presentan los parámetros de las curvas de capacidad, así como las dispersiones de las curvas de fragilidad para cada estado de daño. De esta manera, los formularios contienen información suficiente para la evaluación de la vulnerabilidad y fragilidad de los edificios siguiendo el método simplificado de espectros de capacidad.

Otros ejemplos de formularios para la evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales se mencionan en Crowley et al. (2008). Estos formularios han sido utilizados en la encuesta realizada por el Ministerio de Educación Italiano para identificar parámetros relacionados con la seguridad de las escuelas frente al riesgo sísmico<sup>18</sup>. El formato de esta encuesta representa un documento complejo en el que se solicita la identificación y ubicación de la escuela, una descripción del uso, del área total y de los edificios, del tipo de estructura, del estado de conservación, del cumplimiento de normas de seguridad, así como una descripción funcional de las áreas de la escuela y datos sobre sus áreas deportivas.

Así mismo, en Ferreira y Proença (2008) y en Freire (2007) se presentan los formatos de las encuestas realizadas para la estrategia de rehabilitación sísmica de escuelas en Bucharest. Estos formularios se organizan en 9 secciones e incluyen, además de los datos generales y estructurales de los edificios, información relacionada con las áreas externas, parkings, áreas deportivas, aulas para laboratorios, número de aulas, salas de reuniones, áreas administrativas, baños, condiciones de ventilación y aire acondicionado, disponibilidad de servicios públicos, de rutas de evacuación y de planes de emergencia; todo esto con el fin de identificar otros aspectos relacionados con la vulnerabilidad no estructural de las escuelas y evaluar la posibilidad de utilizarlas como albergues durante emergencias.

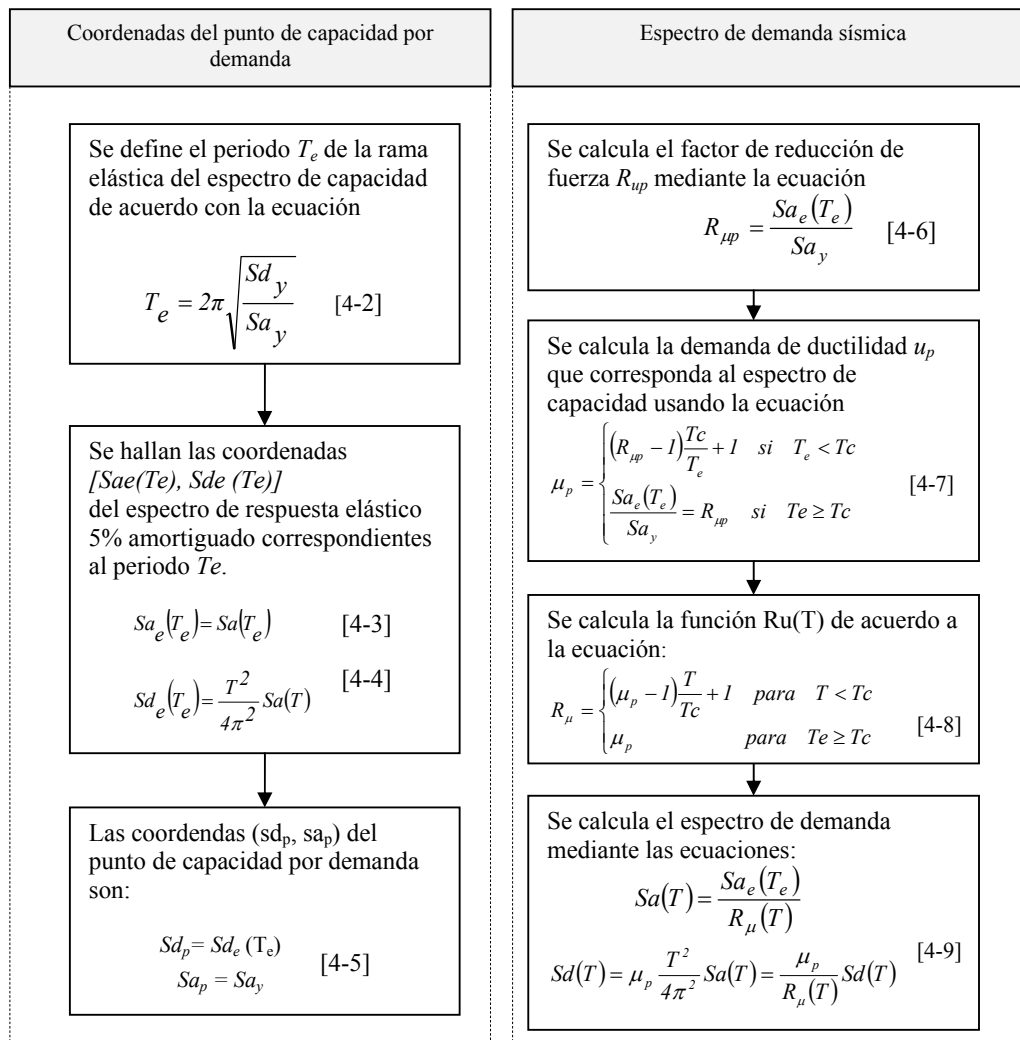
#### 4.3.2 Evaluación del comportamiento sísmico: estimación del punto de capacidad por demanda

De acuerdo con el informe ATC 40 (ATC 1996), el comportamiento sísmico de un edificio es evaluado mediante el cruce entre su espectro de capacidad y el espectro de demanda. A través de un análisis push-over, la curva de capacidad de un edificio puede definirse y representa un diagrama de fuerza-desplazamiento de la estructura. El espectro de capacidad es obtenido convirtiendo cada punto de la curva de capacidad en coordenadas espectrales del primer modo de la estructura. Por otro lado, el espectro de demanda se obtiene de manera simplificada del espectro de respuesta elástica amortiguado al 5% y reducido para tomar en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura.

La intersección entre el espectro de capacidad y el de demanda es conocida como el punto de comportamiento, (“Performance point”) o punto de capacidad por demanda del edificio y representa el desplazamiento espectral máximo ( $sd_p$ ) de la estructura ante la acción sísmica considerada. Esta medida corresponde a la variable de decisión empleada para describir los estados de daño del edificio.

Un procedimiento simplificado, denominado “aproximación de igual desplazamiento” (ATC 40 1996), permite la estimación de las coordenadas del punto de comportamiento. En dicho procedimiento, los edificios se caracterizan por su espectro de capacidad, expresado en forma simplificada, usando una curva bilineal definida por dos puntos característicos: (i) fluencia ( $Sd_y, Sa_y$ ) y resistencia última ( $Sd_u, Sa_u$ ). Por otro lado, la acción sísmica se define a través de los espectros de respuesta elástica propios de la zona de estudio. En la Figura 4-11 se presentan los procedimientos para encontrar las coordenadas del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda sísmica.

<sup>18</sup> Ver Anagrafe Edilizia Scolastica, disponible en: [http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe\\_edilizia\\_scolastica.html](http://www.provincia.cremona.it/primopiano/anagrafe_edilizia_scolastica.html) [Última consulta 21/10/2012]



**Figura 4-11 Procedimiento para el cálculo del punto de capacidad por demanda y del espectro de demanda**

*Adoptado de Milutinovic y Trendafiloski (2003) y de Pujades y Barbat (2007)*

### 4.3.3 Estimación del daño: evaluación de curvas de fragilidad

Para cuantificar los daños esperados en el edificio ante un evento sísmico, las curvas de fragilidad definen la probabilidad de que sea excedido un determinado estado de daño, como función del desplazamiento espectral de la estructura en el punto de capacidad por demanda. Las curvas de fragilidad se definen para los estados de daño 1-leve, 2-moderado, 3-extensivo y 4-completo. Se supone que las curvas de fragilidad están definidas por una función lognormal cumulativa de parámetros  $\mu_i$  y  $\beta_i$ . Para cada estado de daño  $i$ ,  $\mu_i$  define el umbral del estado de daño definido como el desplazamiento espectral para el que la probabilidad de excedencia vale 0.5 y  $\beta_i$  es la desviación típica de la función lognormal. Cada umbral de cada estado de daño,  $\mu_i = Sd_i$ , se puede describir de forma simplificada en términos del desplazamiento espectral de los puntos de fluencia y de capacidad última del espectro de capacidad del edificio, representado en un formato bilineal. El proyecto RISK-UE propone los criterios definidos en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-6 Definición de los umbrales de los diferentes estados de daño de acuerdo a la propuesta Risk-UE**

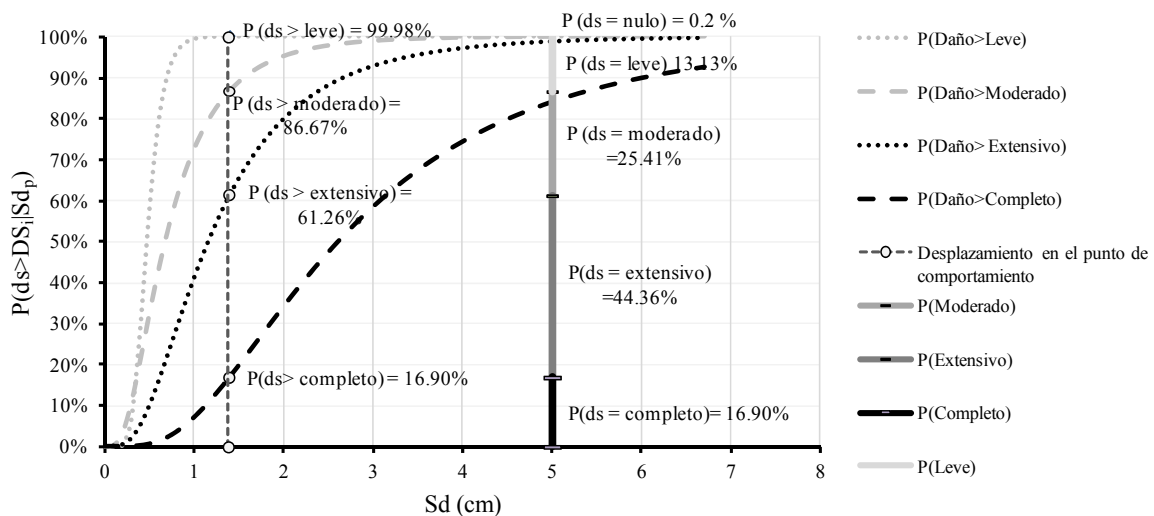
Estado de daño ( $DS$ )	Umbrales $\mu_i = Sd_i$
Leve	$Sd_1 = 0.7.Sd_y$
Moderado	$Sd_2 = Sd_y$
Extensivo	$Sd_3 = Sd_y + \frac{1}{4}(Sd_u - Sd_y)$
Completo	$Sd_4 = Sd_y$

Así, en el proyecto RISK-UE, las curvas de fragilidad siguen una distribución de probabilidad Lognormal y se definen a través del valor medio  $\bar{S}_{d,ds}$ , es decir, el umbral  $\mu_i = Sd_i$  correspondiente a cada estado de daño  $ds$ , según los criterios establecidos en la Tabla 4-6 y su desviación estándar  $\beta_{ds}$ , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P[ds > DS_i | Sd_p] = \Omega \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{Sd}{\bar{S}_{d,DS_i}} \right) \right] \quad [4.10]$$

En donde  $Sd_p$  es el desplazamiento espectral correspondiente al punto de capacidad por demanda.  $\bar{S}_{d,DS_i}$  es el valor medio del desplazamiento en el que el edificio alcanza un umbral del estado de daño  $DS_i$ .  $\beta_{ds}$  es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral del estado de daño  $DS_i$ .  $\Omega$  es la función de distribución acumulativa normal estándar

Así, una curva de fragilidad representa la probabilidad de que un edificio iguale o exceda un estado de daño considerado y está dada por la integral entre 0 y  $Sd$  de la función de densidad de probabilidad. La Figura 4-12 muestra un ejemplo de las curvas de fragilidad de los estados 1-leve, 2-moderado, 3-extensivo y 4-completo para un edificio de muros de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería alto (Tipo M3.3 H). Vale la pena notar que la curva de fragilidad correspondiente al grado de daño nulo es trivialmente la unidad



**Figura 4-12 curvas de fragilidad de la tipología estructural M33 H**

La distribución lognormal es conveniente para modelar la fragilidad y tiene también algunas justificaciones teóricas. Estudios de simulación sobre pórticos de acero y pórticos de hormigón (Dymioties et al. 1999; Hwang et al.1990 y Singhaal et al.1996) muestran que la función de distribución

representa en forma aceptable el daño. En Lantada et al. (2009) puede hallarse los detalles de cómo se determinan las curvas de fragilidad y los parámetros  $\beta_{ds}$ .

#### 4.3.4 Evaluación de matrices de probabilidad y del grado de daño medio

Una vez definidas las curvas de fragilidad y conocido el desplazamiento espectral de la estructura en el punto de capacidad por demanda ( $Sd_p$ ), es posible estimar las probabilidades de excedencia de cada estado de daño  $P[ds > DS_i | Sd_p]$ . Además, para un determinado escenario sísmico, para estimar la matriz de probabilidad de daño, en la cual se presenta la probabilidad de que se de cada uno de los estados de daño  $DS_i$ , se emplea la siguiente expresión:

$$P[ds = DS_i | Sd_p] = P(ds \geq DS_{i+1} | Sd_p) - P(ds > DS_i | Sd_p) \quad i=1..(N-1) \quad [4.11]$$

De forma inversa, una vez conocida la matriz de probabilidad de daño, la probabilidad de que la estructura tenga un estado de daño mayor o igual a un grado de daño dado  $DS_k$ , será igual a la unidad menos la suma de las probabilidades de que se dé cualquier estado de daño inferior, tal como se presenta en la siguiente expresión:

$$P[ds > DS_k | Sd_p] = 1 - \sum_{j=1}^{k-1} P(DS = DS_j | Sd_p) \quad [4.12]$$

Por último, el grado de daño medio puede estimarse como la suma de los estados de daño, ponderados por su correspondiente probabilidad (Barbat et al. 2007). El grado de daño medio puede normalizarse, en forma simplificada en el intervalo (0,1), dividiéndolo por el número total de estados de daño no nulos (4 en este caso). Estos análisis cuantitativos de daño son útiles para evaluar la seguridad de edificios esenciales considerando los requerimientos planteados por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995) para diferentes periodos de retorno y niveles de comportamiento esperado.

En resumen, para propósitos de evaluación de la vulnerabilidad a una escala regional, como el estudio de una red de hospitales, o de un conjunto de centros educativos, se propone clasificar los edificios en tipologías estructurales descritas por la altura (el número de plantas), el nivel de diseño sísmoresistente, los materiales de construcción y el sistema resistente a cargas. Estas tipologías pueden caracterizarse mediante espectros de capacidad bilineales, definidos por los puntos de fluencia y resistencia última (Barbat et al. 2007).

Si bien ha sido aceptado por los ingenieros estructurales adoptar como información mínima para el análisis el tipo de construcción, la edad, la altura, la ocupación, el valor y la ubicación, la clasificación de edificios en tipologías estructurales implica falta de precisión e información parcial sobre las características estructurales, lo cual puede resultar en una estimación imprecisa del daño (Grossi 2005). De esta manera, al comparar el espectro de capacidad de cada tipología con el espectro de demanda correspondiente a la ubicación del edificio, es posible encontrar una estimación aproximada del daño esperado y así obtener una referencia de su nivel de seguridad ante la ocurrencia de eventos sísmicos de determinada intensidad.

## 4.4 Evaluación de la seguridad sísmica de edificios y sistemas esenciales

La evaluación de la seguridad sísmica de los edificios corresponde a la comparación de los daños estimados para un periodo de retorno específico, con estándares de comportamiento pre-establecidos. En el caso de los edificios y sistemas esenciales, además de esta verificación, es de interés estimar las pérdidas directas e indirectas con el fin de valorar si la seguridad exigida es suficiente o no.

### 4.4.1 Verificación de niveles de comportamiento

Para verificar el comportamiento sísmico de los edificios esenciales, en este trabajo se consideran los niveles de comportamiento sugeridos por el comité VISION 2000 (Ver Tabla 3-1; por comodidad del lector se repite en la Tabla 4-7). Así, a partir de las estimaciones de las matrices de probabilidad y del grado de daño medio, es posible revisar si la estructura cumple con dichos requisitos de seguridad.



**Tabla 4–7 Niveles de comportamiento esperado para edificios esenciales**

Nivel de comportamiento	Descripción	Estado de daño	Periodo de retorno (Tr años)
Totalmente operacional	Servicio continuo. <u>Sin daño</u> estructural y no estructural	Sin daño	72
Operacional	<u>Daño leve</u> . La estructura se puede ocupar seguramente. La mayoría de las funciones y operaciones se pueden retomar inmediatamente. Las operaciones esenciales se encuentran protegidas y las no esenciales pueden interrumpirse. Se deben reparar servicios no esenciales.	Reparable	475
Seguridad de la vida	<u>Daño moderado</u> ; la estructura es estable y la seguridad de la vida está protegida. El edificio puede ser evacuado ante un futuro evento sísmico. La reparación de los daños es posible pero económicamente no es práctica.	No reparable	970

*Adaptado de SEAOC(1995)*

Para la descripción del daño a través de índices, Rosseto & Elnashai (2003) derivan curvas de fragilidad empíricas para edificios de hormigón armado a partir del banco de datos de 99 distribuciones de daños observadas en 19 terremotos. Dado que los datos se recolectan de diferentes escalas de daño, Rosseto & Elnashai (2003) proponen una escala homogénea para el índice de daño, considerando edificios de pórticos dúctiles, pórticos no dúctiles, pórticos con muros de relleno y muros de hormigón armado. En la Tabla 4–8 se presentan las interpretaciones de los autores de diferentes escalas de daño.

**Tabla 4–8 Índices de daño en diferentes escalas (estructuras de hormigón armado)**

Escala homogénea del Índice de Daño		HAZUS (1999)	VISION 2000 (SEAOC 1995)	FEMA 273 (1997)	EMS98-MSK	AIJ	ATC-13 (1985)	ATC-21 (1988)				
0	Ninguno	Sin daño										
10	Ligero	Ligero	Completamente operacional	Ocupación inmediata	Grado 1 - D1	Leve	Ligero	Marca verde				
20	Leve				Operacional		Control de daños		Grado 2 - D2	Menor	Leve	
30			Moderado	Seguridad de la vida		Grado 3- D3					Moderado	Moderado
40												Extensivo
50	Moderado	Moderado	Seguridad de la vida	Seguridad limitada	Moderado	Moderado	Marca amarilla					
60								Extensivo	Cerca al colapso	Prevenición de colapso	Mayor	Mayor
70												
80	Extensivo	Cerca al colapso	Prevenición de colapso	Grado 4- D4	Mayor	Mayor	Marca roja					
90								Colapso parcial	Colapso	Colapso	Colapso parcial	Mayor
100	Límite del estado de colapso											

*Fuente: Rosseto & Elnashai (2003)*

*Nota: La escala del índice de daño corresponde a valores homogéneos para edificios de hormigón armado*

Los valores presentados en la Tabla 4–8 son útiles para identificar los rangos del índice de daño correspondientes a los niveles de comportamiento operacional y de seguridad de la vida propuestos en el comité VISION 2000 (SEAOC 1995). En esta Tabla se observa que el índice de daño, para el nivel de comportamiento operacional, varía entre 20 y 50. A su vez, para dicho índice varía entre 50 y 70 para el nivel de comportamiento de seguridad de la vida.

De esta manera, para evaluar la seguridad de los edificios esenciales, se considera que para eventos de periodo de retorno de 475 años, el grado de daño medio no debe ser superior a 2 (daño moderado), el cual corresponde a un valor de 0.5 cuando el grado de daño medio se normaliza por el número de estados de daño (cuatro en este caso). En forma análoga, para eventos de periodo de retorno de 975 años, el grado de daño medio no debe ser superior a 2.8, el cual corresponde a un valor de 0.7 cuando se normaliza por el número de estados de daño.

#### 4.4.2 Estimación y análisis de pérdidas esperadas

Al igual que los estados de daño, las relaciones entre la pérdida y los costos de reposición han sido estimadas a partir de juicios de expertos o del registro de observaciones post evento (Hill y Rossetto 2008 a). Por esta razón, estas relaciones no están exentas de subjetividad y están influenciadas por la definición de las escalas de daño (Safina 2003 citando a Yépez 1996).

Para comparar el alcance de las metodologías de estimación de pérdidas, Hill y Rossetto (2008 a, 2008 b) proponen un sistema de puntajes para valorar la conexión entre el daño esperado y los costos de reparación o reposición. En este análisis, se encuentra que la metodología HAZUS tiene ventajas sobre las escalas basadas en intensidad y sobre la propuesta del proyecto RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003) debido a que en éstas últimas no se cuentan con datos que permitan identificar los costos de la pérdida en el contexto europeo. Así, para los métodos de evaluación de seguridad y riesgo sísmico que consideran diferentes estados de daño, se resalta la importancia que debe darse a la correcta definición de relaciones de costo ya que representan la herramienta de traducción entre la descripción del daño y el valor monetario de las pérdidas, lo cual es de especial interés para edificios y sistemas esenciales.

Por otro lado, Karimi et al. (2007) presentan un marco conceptual para la evaluación del riesgo sísmico combinando herramientas y técnicas de los conjuntos difusos y la teoría de probabilidades motivados por la coexistencia de varios tipos de incertidumbre. En general, consideran que la naturaleza del problema bajo estudio, eventos extremos y de grandes consecuencias, sobre los cuáles no se tienen datos suficientes, hace que los métodos estadísticos no sean suficientes. En particular, para la evaluación de la vulnerabilidad estructural, consideran que cada estado de daño tiene asociado un rango de valores posibles del índice de daño. Dichos rangos están definidos por funciones de pertenencia que relacionan los valores del índice de daño y el grado de pertenencia a cada estado de daño.

En forma similar, Carreño et al. (2005) proponen un sistema experto para la evaluación del daño post evento, el cual ha sido promovido por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica y se ha empleado para preparativos en caso de emergencia en ciudades como Bogotá y Manizales. En dicho sistema se asigna una calificación de acuerdo al daño observado utilizando cinco posibles niveles de daño: ninguno (N), leve (L), moderado (M), fuerte (F) y severo (S). Para determinar un índice de daño asociado a cada nivel de daño, también se proponen variables difusas definidas por funciones de pertenencia (ver Figura 4-13).

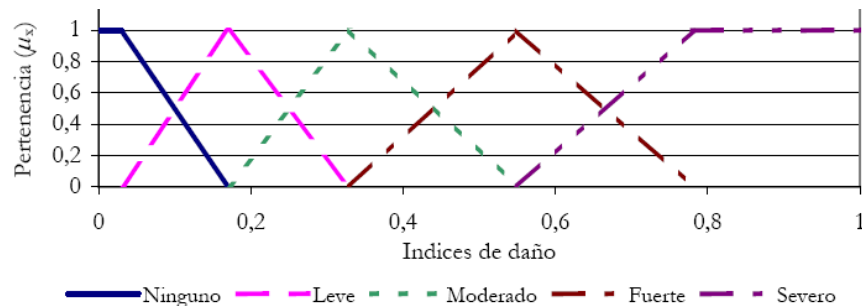


Figura 4-13 Funciones de pertenencia de los índices de daño adoptados

Fuente Carreño et al. (2005)

Respecto a la valoración de las pérdidas directas (estructurales / no estructurales), la metodología propuesta en HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003) sugiere costos de reparación asociados a cada estado de daño y para cada tipo de sistema estructural  $SE$  o de elemento no estructural  $NS$ . De esta manera, las pérdidas  $L_{SE}(I)$  se evalúan como el producto entre el área construida  $A$  del sistema estructural  $SE$ , los costos de reparación por metro cuadrado ( $C_{DSi}$ ), dado un estado de daño  $DS_i$  y la probabilidad de alcanzar cada estado de daño  $P(ds=DS_i)$ , tal como se presenta en la Ecuación [4-13]. Un enfoque similar es presentado por Cimellaro et al. (2006), en el cual los costos son evaluados de acuerdo a la vida útil del proyecto.

$$L_{SE}(I) = A \sum_{j=1}^5 C_{DS_i} P(ds = DS_i) \quad [4-13]$$

En cuanto a los costos asociados a cada estado de daño  $C_{DS_i}$ , éstos deben valorar adecuadamente las alternativas de reparación según el nivel de daño. Así, ante daños leves, las reparaciones son del tipo cosmético y no implican mayores intervenciones sobre el edificio, mientras que daños extensivos implican intervenciones en elementos estructurales o su completa reposición. Al respecto, varios proyectos y autores han propuesto diferentes valores para expresar la pérdida como porcentaje del valor de reposición del edificio, según el estado de daño. En la Tabla 4-9 se presentan algunas de estas propuestas en las que se considera la escala de daño EMS-98 (Grüntal 1998)

**Tabla 4-9 Costos de pérdida como porcentaje del valor de reposición del edificio**

Estado de daño	Blong (2003) Australia	Timchenko (2002) Georgia	Roca et al. (2006)	Di Pascuale et al. (2005) Italia	Mouroux (2004) Risk UE
1 Ligeros	2%	2%	1%	1%	5%
2 Moderados	10%	10%	20%	10%	20%
3 Importantes o graves	40%	30%	40%	35%	50%
4 Graves	75%	80%	80%	75%	100%
5 Destrucción	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente Hill y Roseto 2008

Tomando como referencia las metodologías mencionadas para la estimación de índices de daño y de las pérdidas económicas correspondientes, se propone evaluar un índice de pérdida considerando, para cada estado de daño, un rango de valores posibles del costo de la pérdida, expresado como porcentaje del valor de reposición del edificio. Dichos costos fueron seleccionados a partir de los valores propuestos en la Tabla 4-9. Para simplificar el análisis, se ha considerado que los daños graves y destrucción de la escala EMS-98 corresponden al estado de daño completo propuesto en el proyecto RISK UE.

Para cada estado de daño, los valores posibles del costo de pérdida están definidos por funciones de pertenencia tal como se presenta en la Figura 4-14. En estas funciones las abscisas corresponden a un determinado porcentaje de pérdida respecto al valor de reposición del edificio ( $x$ ) y las ordenadas a la pertenencia  $\chi_{DS}(x)$ , o a la posibilidad de encontrar dicho porcentaje de pérdida en el estado de daño  $DS$ .

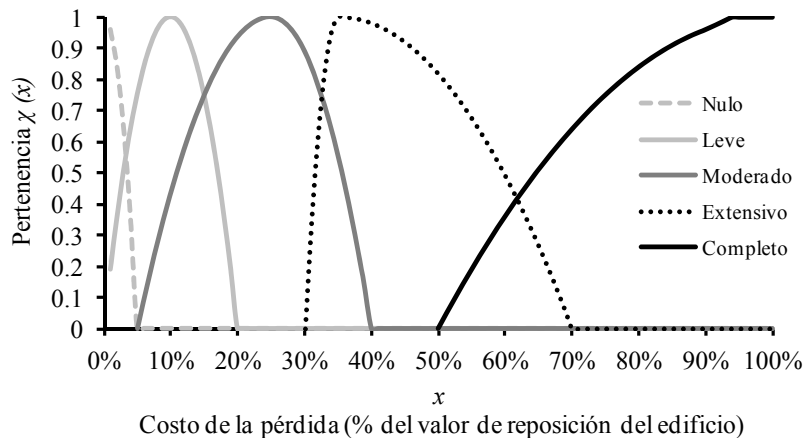
Las ordenadas de las funciones de pertenencia  $\chi_{DS}(x)$  se calcularon como sigue:

$$\chi_{DS}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq \text{linf}_{DS} \\ 1 - \left( \frac{V \text{max}_{DS} - x}{(V \text{max}_{DS} - \text{linf}_{DS})^2} \right) & \text{si } \text{linf}_{DS} < x < V \text{max}_{DS} \\ 1 - \left( \frac{x - V \text{max}_{DS}}{(\text{lsup}_{DS} - V \text{max}_{DS})^2} \right) & \text{si } V \text{max}_{DS} < x < \text{lsup}_{DS} \\ 0 & \text{si } x > \text{lsup}_{DS} \end{cases} \quad [4.14]$$

En donde  $\text{linf}_{DS}$  corresponde al límite inferior de la función de pertenencia del estado de daño  $DS$ .  $V\text{max}_{DS}$  corresponde al valor de máxima pertenencia y  $\text{lsup}_{DS}$  corresponde al límite superior de la función de pertenencia. En la Tabla 4–10 se presentan estos valores para cada uno de los estados de daño.

**Tabla 4–10 Límite inferior, límite superior y valor de máxima pertenencia de los costos de la pérdida (en porcentaje del valor de reposición del edificio), según estado de daño**

Estado de daño ( $DS$ )	Costos de la pérdida (% del valor de reposición del edificio)		
	Límite inferior	Valor de máxima pertenencia	Límite superior
Nulo	0%	2.5%	5%
Leve	0%	10%	20%
Moderado	5%	25%	40%
Extensivo	30%	35%	70%
Completo	50%	90%	100%



**Figura 4-14 Funciones de pertenencia del costo de la pérdida (% del valor de reposición del edificio) para cada estado de daño**

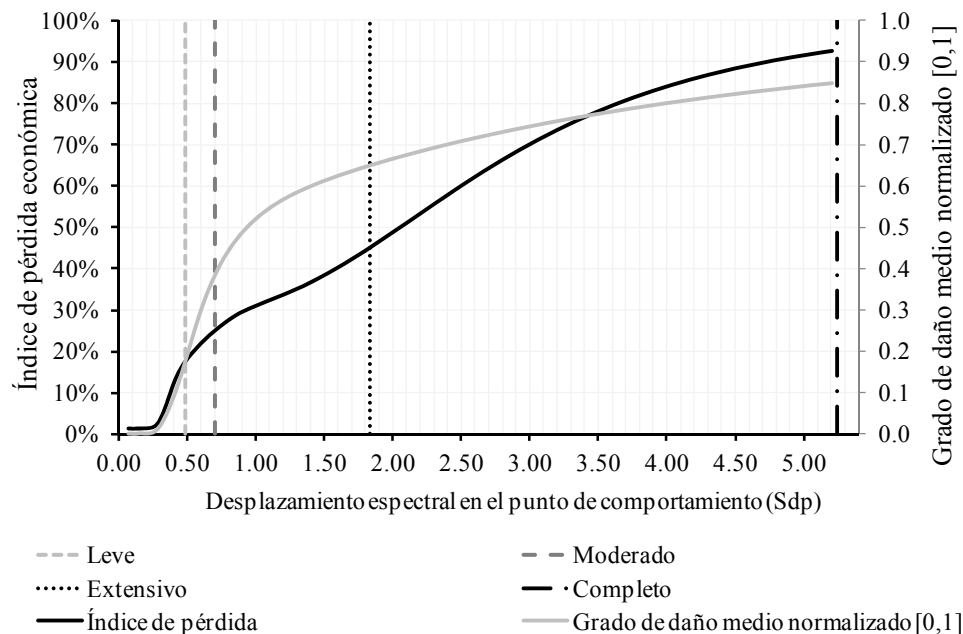
Para estimar el índice de pérdida económica se propone el siguiente procedimiento:

- i) Estimar la matriz de probabilidad de daño del edificio para el escenario considerado.
- ii) Para cada estado de daño, multiplicar (normalizar) las ordenadas de las funciones de pertenencia por la probabilidad de daño correspondiente, de acuerdo a los resultados de la matriz de probabilidad de daño.
- iii) Calcular la envolvente de las funciones de pertenencia normalizadas.
- iv) Calcular el centroide de la envolvente de las funciones de pertenencia normalizadas.
- v) Si en la matriz de probabilidad de daño, la probabilidad del estado de daño completo es menor que 0.1%, entonces el centroide corresponde al índice de pérdida. De lo contrario, si la probabilidad del estado de daño completo es mayor que 0.1% dividir el centroide por 0.7972. Dicho valor corresponde al índice de pérdida.

Se resalta que, el centroide de la envolvente de las funciones de pertenencia tendría un valor máximo cuando la probabilidad del estado de daño completo es igual a 1. En este caso, el centroide tendría un valor cercano a 0.7972. Por tal razón, se decidió ajustar el valor del centroide, dividiéndolo por 0.7972, cuando la probabilidad del estado de daño completo sea mayor que el 0.1%. De esta manera se logra que el valor del índice de pérdida económica sea cercano al 100% del valor de reposición del edificio cuando el desplazamiento espectral de la estructura es cercano al umbral del estado de daño completo.

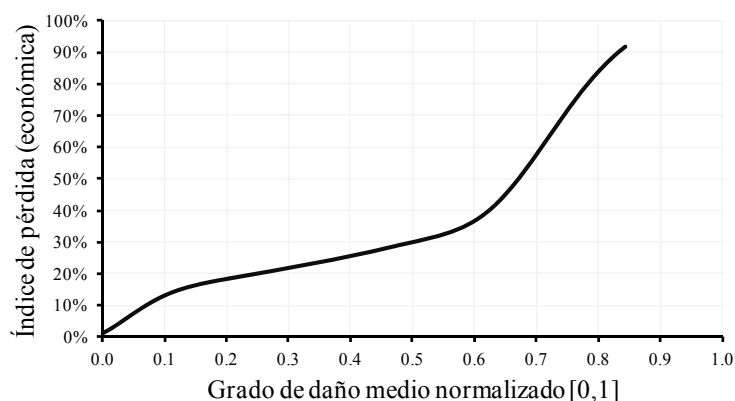
El cálculo del índice de pérdida económica puede repetirse, para un mismo edificio, considerando un conjunto de eventos sísmicos. Para cada evento, y siguiendo el método simplificado basado en espectros de capacidad descrito en el apartado 4.3, es posible estimar el desplazamiento espectral en el punto de capacidad por demanda, evaluar las curvas de fragilidad y obtener la matriz de probabilidad de daño. Así, para cada escenario, es posible estimar el índice de pérdida siguiendo el procedimiento descrito previamente, empleando los resultados de la matriz de probabilidad de daño y los costos de la pérdida como porcentaje del valor de reposición del edificio (ver Figura 4-14). De esta manera, es posible obtener una curva que relaciona el desplazamiento espectral en el punto de comportamiento y el índice de pérdida en el edificio.

Como ejemplo, se presenta el caso de un edificio de pilares y forjados de hormigón armado con muros de relleno de mampostería irregulares, de baja altura (RC3.2L), ubicado en roca firme. Para estimar la acción sísmica se utilizaron los espectros del Eurocódigo 8 Tipo II y se normalizaron por un conjunto arbitrario de valores de PGA's que varía entre 0.01 g y 0.7 g. En la Figura 4-15 se presentan los resultados del índice de pérdida económica y el grado de daño medio estimados tales escenarios.



**Figura 4-15 Índices de pérdida económica y grado de daño medio (normalizado [0,1]) obtenidos para un edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme**

En la Figura 4-15 se observa que el índice de pérdidas representa razonablemente las pérdidas esperadas para el grado de daño esperado en el edificio. Así, para los estados de daño leve y moderado, las pérdidas son respectivamente del orden del 20% y 30% del costo de reposición del edificio. Por otro lado, para desplazamientos espectrales cercanos al umbral del estado de daño completo, el índice de pérdida se aproxima a 100% del costo de reposición del edificio. En la Figura 4-16 se observa la relación entre el grado de daño medio (normalizado) y el índice de pérdida propuesto.



**Figura 4-16 Índice de pérdida y grado de daño medio normalizado [0,1]. Edificio de la tipología RC3.2L. Uso de espectros del EC8 tipo II en roca firme**

A través del índice de pérdida económica y del grado de daño medio es posible expresar los resultados del análisis de vulnerabilidad estructural. Para valorar las pérdidas por daños en elementos no estructurales, es necesario identificar el tipo de elemento, desarrollar o aplicar un modelo del daño esperado ante la demanda sísmica y a su vez relacionar el daño esperado con la pérdida económica. Así, en HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003) se sugieren curvas de fragilidad definidas para componentes no estructurales dependiendo de la tipología del edificio, el tipo de componente y el estado de daño. Siguiendo este enfoque, Paul y Lin (2009) evalúan el daño esperado de un edificio esencial (un hospital) y de los componentes no estructurales usando curvas de fragilidad y extienden el análisis con el fin de estimar la capacidad de la instalación.

Dado que esta metodología está enfocada hacia la evaluación de la seguridad de un conjunto de edificios esenciales a nivel regional, no se ha considerado evaluar la vulnerabilidad no estructural dado la información necesaria para este cálculo. No obstante, para el caso de hospitales, en el Anexo F se plantean índices cualitativos de la vulnerabilidad no estructural basados en las condiciones de anclaje y conexión de los elementos y en sus efectos sobre la funcionalidad e integridad de los ocupantes. Este enfoque también es considerado en Cardona (1999) y resulta útil para ver las alternativas de reducción de la vulnerabilidad de la instalación.

#### 4.4.3 Funcionalidad de los edificios

En cuanto a la evaluación de la funcionalidad de la instalación ante un determinado nivel de daño, se propone un índice de funcionalidad  $L_f(ED)$  a partir de los valores del índice de daño presentados en la Tabla 4–8 para el caso de la metodología de FEMA 273 (1997) y del comité VISION 2000 (SEAOC 1995), así como los niveles de comportamiento propuestos en los documentos FEMA 273 (1997) y FEMA 356 (2000) (ver Tabla 4–11), los cuales son adoptados para los centros educativos y hospitales en los documentos FEMA 395 (2003) y FEMA 396(2003) respectivamente. Así, el índice de funcionalidad se define según intervalos de acuerdo al valor esperado del daño  $ED$ , tal como se presenta en la Ecuación [4.15] y en la Figura 4-17.

**Tabla 4–11 Niveles de comportamiento para hospitales**

Tipo de daño	Prevención de colapso (5-E)	Seguridad de la vida (3-C)	Niveles de comportamiento	
			Ocupación inmediata (1-B)	Operacional (1-A)
Daño general	Severo	Moderado	Leve	Muy leve
No estructural	Daño extensivo	Muchos elementos arquitectónicos, mecánicos y eléctricos están dañados	Los equipos y contenidos están seguros. Pueden existir fallas en líneas vitales y elementos mecánicos	Sin daño. Las líneas vitales se encuentran en funcionamiento o existen sistemas redundantes

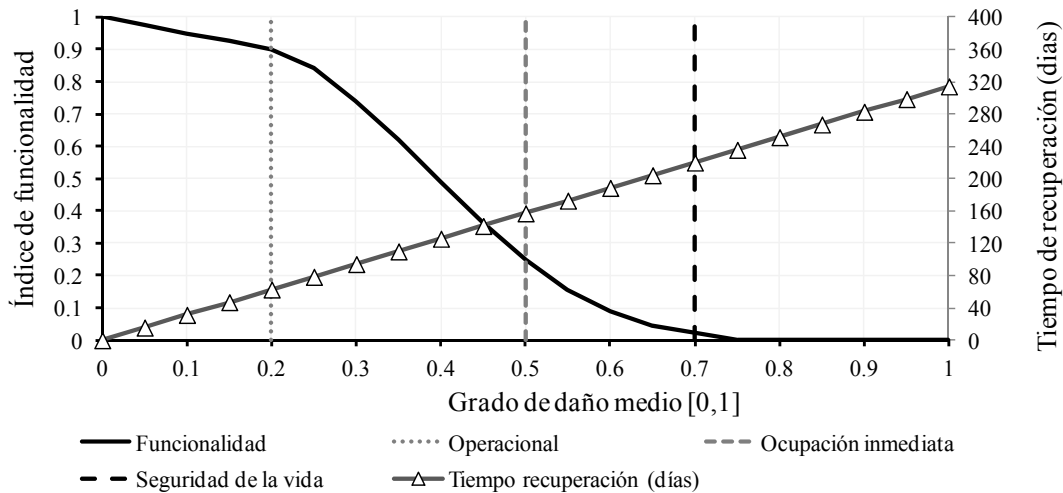
$$L_f(ED) = \begin{cases} 1 - 0.5ED & \text{si } ED \leq 0.2 \\ \exp(\text{LOG}(0.5) \cdot \left(\frac{ED}{CI}\right)^{C2}) & \text{Si } ED \leq 0.7 \\ 0 & \text{si } ED > 0.7 \end{cases} \quad [4.15]$$

Dónde  $L_f(ED)$ , es el índice de funcionalidad,  $ED$  corresponde al valor esperado del daño y  $CI$  y  $C2$  a constantes definidas en 0.3 y 3 respectivamente.

Por otro lado, el tiempo de recuperación asociado al daño esperado en la instalación (ver Tabla 4–12) se adoptó considerando los valores típicos para edificios comerciales, edificios de oficinas y edificios para servicios profesionales, técnicos y de negocios, propuestos en el documento FEMA 227 (FEMA 1992). En la Figura 4-17 se presenta el tiempo de recuperación estimado en términos del grado de daño medio normalizado.

**Tabla 4–12 Tiempo de recuperación**

Estado de daño	Tiempo (días)
Ninguno	0
Ligero	3.4
Leve	12.08
Moderado	44.72
Extensivo	125.66
Colapso parcial	235.76
Colapso	346.93



**Figura 4-17 Índice de funcionalidad y tiempo de recuperación según grado de daño medio**

Goda y Hong (2006) adoptan periodos de recuperación similares para estimar, durante la vida útil de la instalación, los costos asociados a la posible interrupción de los servicios dada la ocurrencia probable de terremotos. Se debe resaltar que los tiempos de recuperación adoptados corresponden a propuestas realizadas por expertos, que pueden estar asociadas a diferentes condiciones socioeconómicas. Por lo tanto, conviene que estos valores sean discutidos en el contexto local, con técnicos de la construcción, así como con responsables de los servicios esenciales, con el fin de identificar el periodo que puede tardar un determinado tipo de instalación en recuperarse después del daño sufrido por un evento sísmico probable.

## 4.5 Ejemplo de aplicación

A continuación se presenta la aplicación del método simplificado de evaluación de la seguridad a un edificio del hospital (Espitau) de Vald'Aran y al CEIP Estudi Alejandro Casona, ubicados en los municipios de Vielha e Mijaran y Les, respectivamente (Comarca de Val d'Aran, España). En estos edificios se realizaron inspecciones visuales orientadas a rellenar los formularios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios esenciales. De esta manera se adquirieron datos básicos de las instalaciones, así como las propiedades estructurales de los edificios que los componen. En la visita también se calificaron la regularidad en planta y en altura, la existencia de daños previos y la posibilidad de golpeteo. Como complemento, se realizaron consultas en planos, memorias de obra, entre otros documentos gráficos que facilitaron su clasificación en tipos constructivos.

El análisis de seguridad se realiza para un escenario de periodo de retorno de 475 años. Dadas las coordenadas de los edificios, se identificaron en el mapa de mesozonación el tipo de suelo correspondiente a cada instalación: suelo tipo A para el hospital, suelo tipo C para el centro educativo ver (Figura 4-18). Por otro lado, el PGA de cada instalación se consideró igual al del punto más cercano de de la malla del estudio de peligrosidad sísmica. Para el hospital, el PGA es de 0.108g. Para el CEIP Estudi Alejandro Casona, el PGA es cercano a 0.117g.

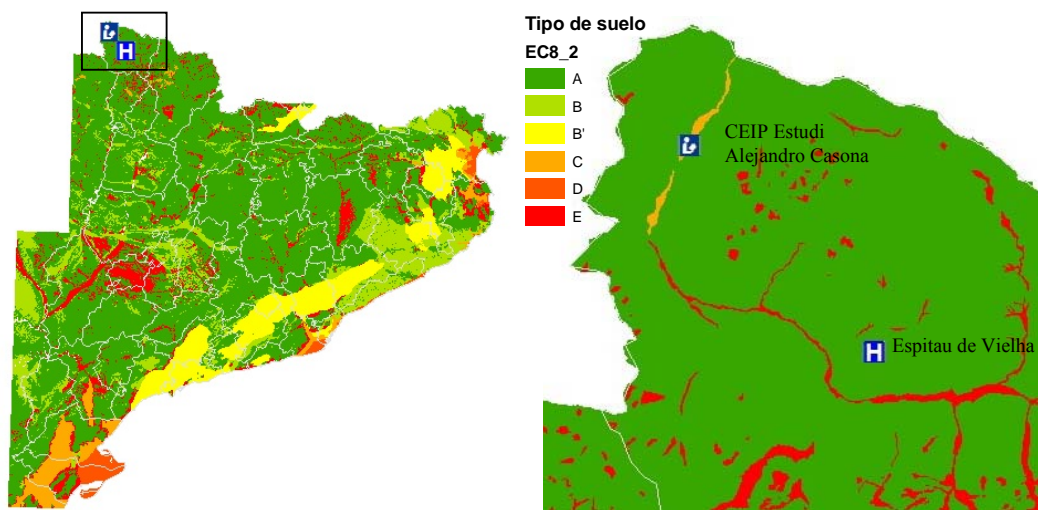


Figura 4-18 Ubicación de los edificios y tipo de suelo

La demanda sísmica se especificó a partir de los espectros de respuesta de amenaza uniforme obtenidos por GEOTER(2008), adaptados a las formas espectrales del EC8 tipo II considerando los tipos de suelo de la mesozonación, tal como se presentó en el numeral 4.2.2 y 4.2.3.

### 4.5.1 Espitau de Val d'Aran

El hospital es una estructura de pilares de hormigón armado con forjados reticulares y muros de relleno de mampostería no reforzada. La planta de este edificio es rectangular, alargada y tiene tres niveles sobre rasante. Existe un espacio abierto entre la planta baja y la primera planta por lo que se considera que existe alta irregularidad en altura. De acuerdo a estos datos, el edificio se clasifica como de tipología RC3.2L. En la Tabla 4-13 y en la Tabla 4-14 se presentan los parámetros del espectro de capacidad y de la curva de fragilidad de la tipología. En la Figura 4-19 se presentan fotos de la fachada, distribución de pilares y forjado del edificio.



**Tabla 4–13 Parámetros del espectro de capacidad de la tipología**

Tipología	Fluencia		Capacidad última	
	$Sd_v$ (cm)	$Sa_v$ (g)	$Sd_u$ (cm)	$Sa_u$ (g)
RC 3.2L	0.7	0.13	5.24	0.14

**Tabla 4–14 Parámetros de la curva de fragilidad de la tipología**

Tipología	Leve		Moderado		Extensivo		Completo	
	$\overline{Sd}_1$ (cm)	$\beta_1$	$\overline{Sd}_2$ (cm)	$\beta_2$	$\overline{Sd}_3$ (cm)	$\beta_3$	$\overline{Sd}_4$ (cm)	$\beta_4$
RC32L	0.49	0.28	0.7	0.37	1.835	0.82	5.24	0.83



**Figura 4-19 a y b, fachadas del edificio; c Pilares de la estructura; c) forjado de la estructura**

En la Figura 4-20 se presenta el espectro de capacidad de la Tipología RC 3.2L y el espectro de demanda. Esta Figura sirve como ejemplo para la estimación del punto de capacidad por demanda siguiendo la aproximación de igual desplazamiento. El desplazamiento espectral en este punto es cercano a 0.7 cm

La Figura 4-21 presenta las curvas de fragilidad de la tipología RC 3.2L así como el desplazamiento de la estructura en el punto de comportamiento. En la Tabla 4–15, en la Figura 4-22 y en la Figura 4-23 se presenta la matriz de probabilidad de daño, el grado de daño medio, el índice de pérdida económica, el índice de funcionalidad y el periodo de recuperación estimado.

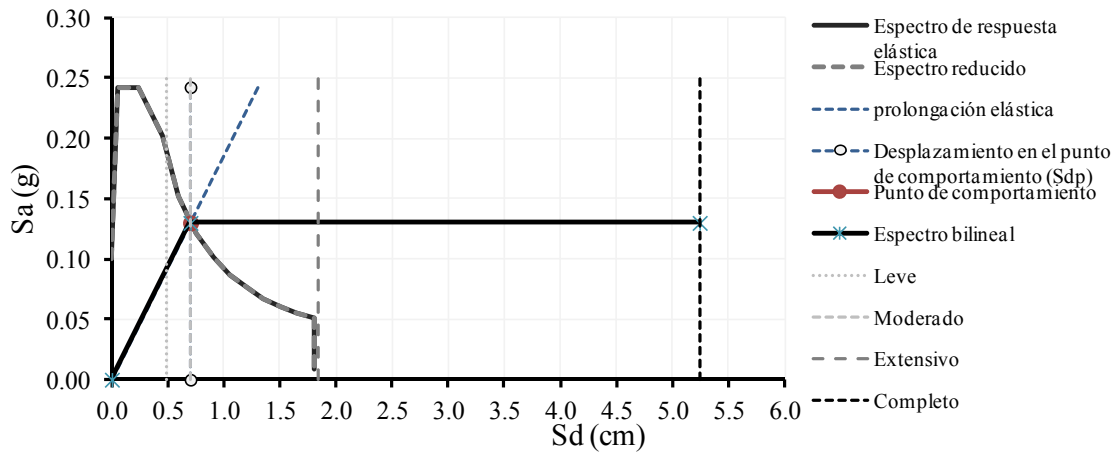


Figura 4-20 Espectro de respuesta elástica. Espectro de demanda. Espectro de capacidad y punto de comportamiento para los edificios de tipología RC3.2L

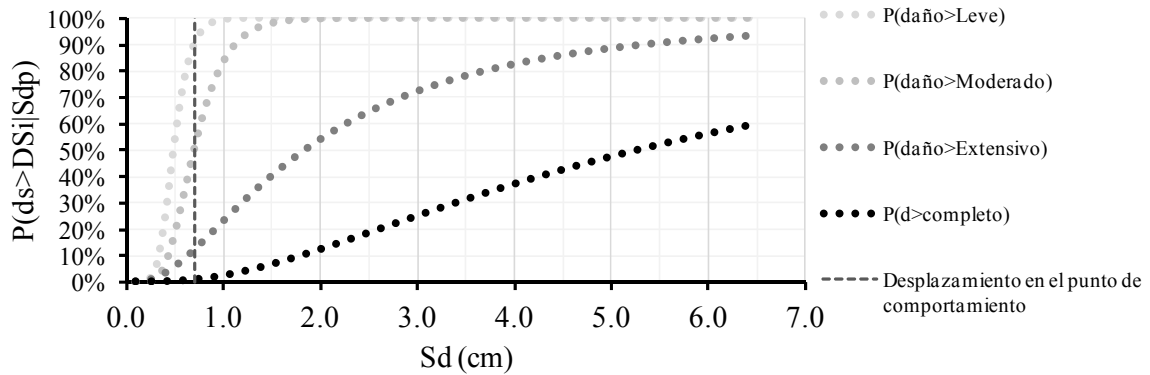
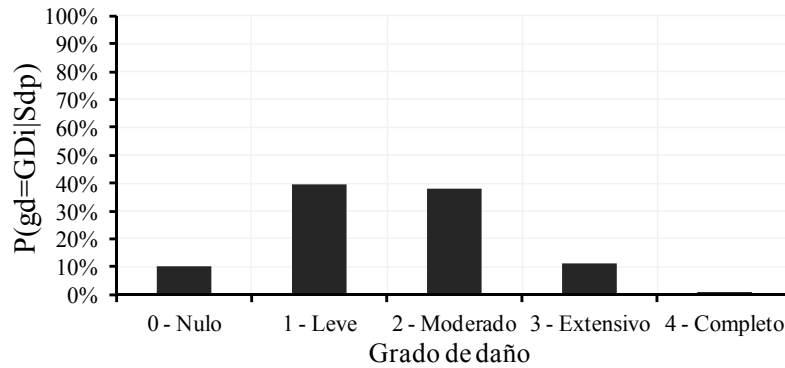


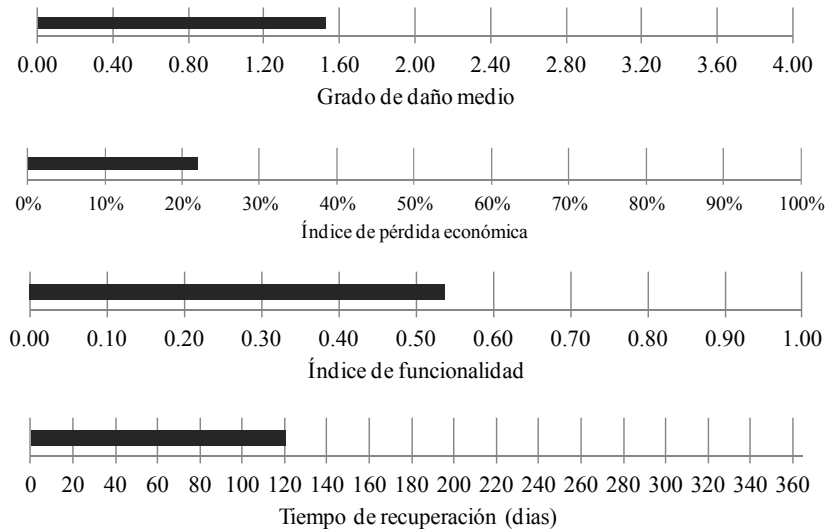
Figura 4-21 Curvas de fragilidad para la tipología RC3.2L

Tabla 4-15 Matriz de probabilidad de daño, grado de daño medio, índice de pérdida e índice de funcionalidad (Espitau de Val d’Aran)

Estado de daño	$P(ds=DS_i)$
$P(ds=nulo)$	10.1%
$P(ds=leve)$	39.8%
$P(ds=moderado)$	38.1%
$P(ds=extensivo)$	11.3%
$P(ds=completo)$	0.8%
Grado de daño medio	1.5
Grado de daño medio normalizado [0,1]	0.38
Índice de pérdida	25%
Índice de funcionalidad	0.54
Tiempo de recuperación (días)	120



**Figura 4-22 Matriz de probabilidad de daño- Espitau de Val d' Aran**



**Figura 4-23 Grado de daño medio, índice de pérdida económica, índice de funcionalidad y tiempo estimado de recuperación (Espitau de Val d' Aran)**

El daño de grado estimado para este edificio es menor a 2. Al comparar estos daños con los estándares de seguridad del Comité VISION 2000 (SEAO 1995) para eventos de periodo de retorno de 475 años, se concluye que el edificio si cumple con el nivel de comportamiento operacional. La pérdida económica es cercana al 20% de la reposición del edificio; la funcionalidad estimada para el edificio después de la ocurrencia de un evento probable de tal periodo de retorno es de 0.54 y el tiempo de recuperación estimado es de 120 días. Al respecto, se señala que en el terremoto de Lorca del 11 de mayo, el Hospital Rafael Méndez, el hospital de referencia de Lorca, sufrió daños estructurales entre nulos y leves, y daños no estructurales entre leves y moderados. Por esta razón se decidió que el hospital tenía que ser evacuado. Durante la reparación de los daños el funcionamiento del hospital fue restaurándose paulatinamente y se considera que después de un mes del evento se recobró por completo su funcionalidad. No obstante, la reparación de los quirófanos afectados tardó entre dos y nueve meses<sup>19</sup>. Estos hechos resaltan la importancia de la vulnerabilidad de los elementos no estructurales y los efectos del daño de estos elementos en la funcionalidad de las instalaciones.

<sup>19</sup> Ver: “Un año después de los seísmos. Sanidad tiene previsto acabar actuaciones en Hospital Rafael Méndez entre mediados y final de junio” [En línea]. Disponible en: <http://www.europapress.es/murcia/noticia-sanidad-tiene-previsto-acabar-actuaciones-hospital-rafael-mendez-mediados-final-junio-20120510121145.html> [Última consulta 11/11/2012].

4.5.2 CEIP Estudi Alejandro Casona

Por otro lado, el CEIP Estudi Alejandro Casona funciona en un edificio de dos plantas sobre rasante, de muros de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado. La planta de este edificio es rectangular, con algunos retrocesos en las esquinas; se considera que la irregularidad en planta es mediana; la irregularidad en altura se considera baja. De acuerdo a estos datos, el edificio se clasifica como de tipología M3.4L. En la Tabla 4-16 y en la Tabla 4-17 se presentan los parámetros del espectro de capacidad y de la curva de fragilidad de la tipología. En la Figura 4-24 se presentan fotos de la fachada, de los muros y del forjado del edificio.

**Tabla 4-16 Parámetros del espectro de capacidad de la tipología**

Tipología	Fluencia		Capacidad última	
	$Sd_v$ (cm)	$Sa_v$ (g)	$Sd_u$ (cm)	$Sa_u$ (g)
M34L	0.53	0.3	3.18	0.3

**Tabla 4-17 Parámetros de la curva de fragilidad de la tipología**

Tipología	Leve		Moderado		Extensivo		Completo	
	$\overline{Sd}_1$ (cm)	$\beta_1$	$\overline{Sd}_2$ (cm)	$\beta_2$	$\overline{Sd}_3$ (cm)	$\beta_3$	$\overline{Sd}_4$ (cm)	$\beta_4$
M34L	0.37	0.28	0.53	0.34	1.19	0.73	3.18	0.76



**Figura 4-24 (a), (b) y (c) fachadas del edificio; (d) muros y forjado**

En la Figura 4-25 se presenta el espectro de capacidad de la Tipología M3.4L y el espectro de demanda. Esta Figura sirve como ejemplo para la estimación del punto de capacidad por demanda siguiendo la aproximación de igual desplazamiento. El desplazamiento en el punto de comportamiento es cercano a 0.7 cm

La Figura 4-26 presenta las curvas de fragilidad de la tipología M3.4L así como el desplazamiento de la estructura en el punto de comportamiento. En la Tabla 4-18, en la Figura 4-27 y en la Figura 4-28 se presenta la matriz de probabilidad de daño el grado de daño medio, el índice de pérdida económica, el índice de funcionalidad y el periodo de recuperación estimado.

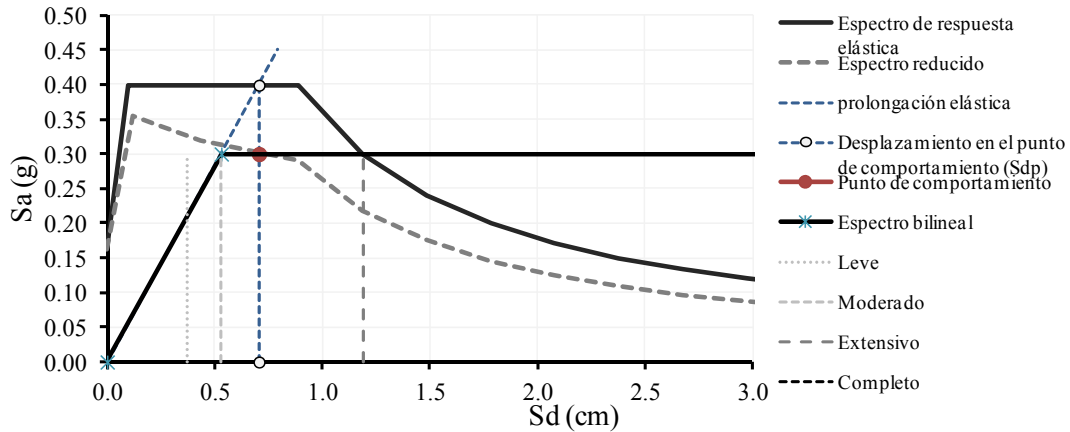


Figura 4-25 Espectro de respuesta elástica. Espectro de demanda. Espectro de capacidad y punto de comportamiento para los edificios de tipología M34L

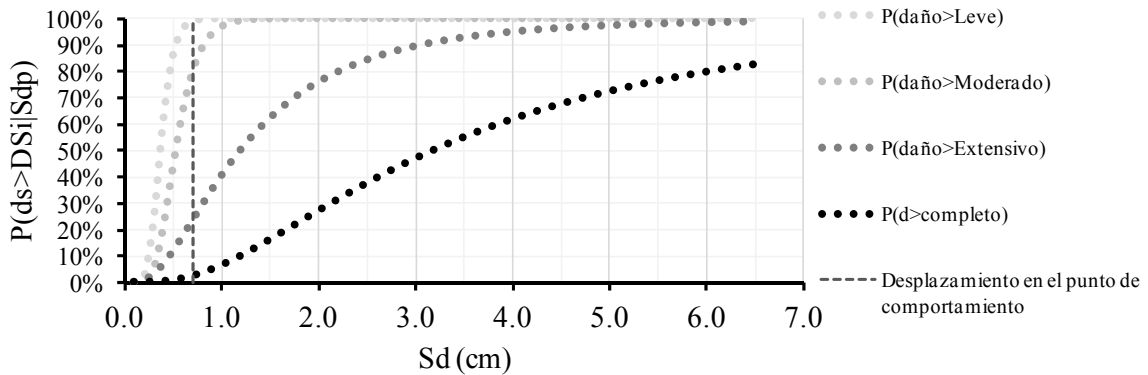


Figura 4-26 Curvas de fragilidad para la tipología M34L

Tabla 4-18 Matriz de probabilidad de daño, grado de daño medio, índice de pérdida e índice de funcionalidad (CEIP Estudi Alejandro Casona)

Estado de daño	P(ds=DS <sub>i</sub> )
P(ds=nulo)	1.1%
P(ds=leve)	18.9%
P(ds=moderado)	56.4%
P(ds=extensivo)	21.2%
P(ds=completo)	2.4%
Grado de daño medio	2.0
Grado de daño medio normalizado [0,1]	0.51
Índice de pérdida	32%
Índice de funcionalidad	0.22
Tiempo de recuperación (días)	160.9

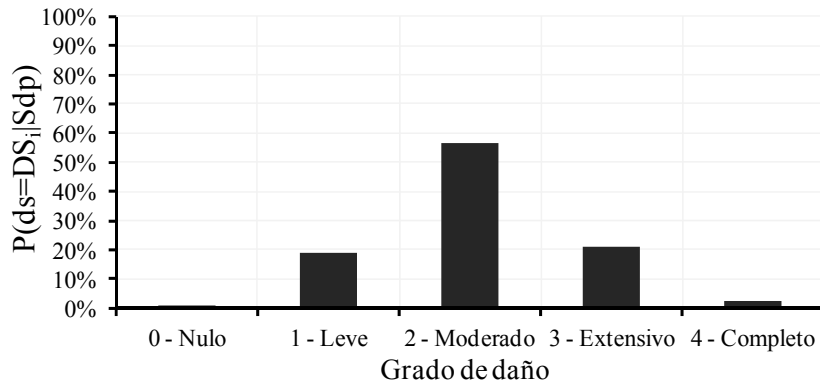


Figura 4-27 Matriz de probabilidad de daño- CEIP Estudi Alejandro Casona

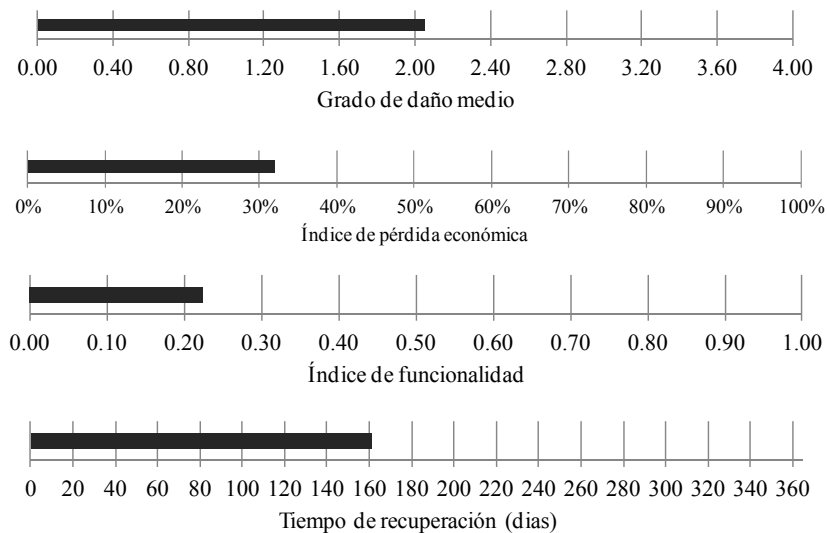


Figura 4-28 Grado de daño medio, índice de pérdida económica, índice de funcionalidad y tiempo estimado de recuperación (CEIP Estudi Alejandro Casona)

El daño de grado estimado para este edificio es mayor a 2. Al comparar estos daños con los estándares de seguridad del Comité VISION 2000 (SEAO 1995) para eventos de periodo de retorno de 475 años, se concluye que el edificio no cumple con el nivel de comportamiento operacional. La pérdida económica es cercana al 32% de la reposición del edificio; la funcionalidad estimada para el edificio después de la ocurrencia probable de un evento de tal periodo de retorno es de 0.2. Por último, el tiempo de recuperación estimado es de 160 días. En este caso se observa que a pesar de que los daños estructurales estimados son moderados, la funcionalidad esperada de la instalación es bastante reducida. Al respecto, en el terremoto de Lorca del 11 de mayo, el Instituto de Educación Secundaria J. Ibañez Martín sufrió daños estructurales moderados y daños no estructurales fuertes. En cuanto a las obras de reparación de la instalación, estas tardaron más de 4 meses<sup>20</sup>. Estos aspectos son relevantes tanto para la planificación de las actuaciones de emergencia, como para evaluar los costos asociados a la interrupción de los servicios y los efectos negativos en la educación de la comunidad.

<sup>20</sup> Ver: "Lorca. El Ibañez Martín no abrirá en septiembre". [En línea]. Disponible en: <http://www.laverdad.es/murcia/v/20110819/lorca/ibanez-martin-abrira-septiembre-20110819.html> [Última consulta 12/11/2012]

## 4.6 Resumen y discusión

Para actualizar el análisis de seguridad del Plan Especial de emergencias SÍSMICAS en CATALUÑA (SISMICAT), se persigue realizar la estimación de daños en edificios esenciales tales como escuelas y hospitales, considerando una metodología de carácter intermedio, en la cual, la demanda sísmica se representa para periodos de retorno específicos, y se define mediante los espectros de respuesta elástica correspondientes a su ubicación.

Con el fin de simplificar el cálculo de la demanda sísmica para periodos de retorno de 475 y 975 años, se ajustan y comparan los espectros sugeridos en el EC-8 Tipo I y Tipo II, así como los de la NCSE-02 con los espectros obtenidos en un PSHA realizado en Cataluña, España. Para la comparación se consideran dos alternativas y el criterio de elección es el error absoluto medio.

Así, en este estudio se consideran dos escenarios. El primero consiste en el sismo con un periodo de retorno de 475 años y el segundo con un periodo de retorno de 975 años. Los espectros de respuesta elástica 5% amortiguada, son compatibles con las formas espectrales definidas en el eurocódigo EC8 (tipo II) para terremotos de magnitud moderada. Los PGA considerados se han ajustado a partir de un estudio específico de la peligrosidad sísmica de Cataluña (PSHA por su sigla en inglés). Así, con el fin de calcular la demanda sísmica para un periodo de retorno de 475 años, se ajustan los espectros del EC 8 Tipo II de forma que la meseta de aceleración constante coincida con el valor máximo de los espectros obtenidos en el PSHA.

Para calcular la demanda sísmica para un periodo de retorno de 975 años se empleó un procedimiento similar. Al respecto, se señala que la reducción de las formas espectrales del EC 8 para que la meseta de aceleración constante coincida con los valores máximos de los espectros obtenidos en el PSHA, puede también observarse como una reducción del PGA. Para este caso particular, los valores reducidos del PGA para un periodo de retorno de 975 años son similares al PGA calculado para eventos de periodo de retorno de 475 años. A su vez, al normalizar las formas espectrales del EC 8 al PGA estimado para periodos de retorno de 475 años, se observa que tales espectros corresponden al percentil 70 de los obtenidos en el PSHA. A su vez, estos valores corresponden a los valores medios de los espectros obtenidos en el PSHA para un periodo de retorno de 975 años.

Estos resultados corresponden a espectros estimados en roca firme. Para considerar los efectos de suelo, se han adoptado los resultados de un estudio de mesozonación sísmica de Cataluña. En dicho estudio se ha desarrollado un mapa de clasificación de suelos y se han caracterizado los espectros de respuesta elástica, adoptando también, con ligeras modificaciones, los tipos de suelos y los parámetros sugeridos en el EC8 para espectros tipo II.

En cuanto a la vulnerabilidad de los edificios, se ha procedido de forma simplificada. Así, los edificios se clasifican en tipologías estructurales de acuerdo a la matriz tipológica del proyecto RISK-UE. Para la clasificación, se han diseñado y usado un conjunto de formularios en los que se recolecta información general de las instalaciones, así como las propiedades estructurales más relevantes. Una vez clasificados los edificios, estos se caracterizan por los espectros de capacidad y curvas de fragilidad correspondientes a cada tipología.

Para evaluar el comportamiento de los edificios ante los escenarios sísmicos considerados, se sigue también una metodología simplificada basada en espectros de capacidad. En este método se compara el espectro de capacidad de cada tipología con el espectro de demanda correspondiente a la ubicación del edificio. Como resultado se obtiene el desplazamiento espectral máximo de la estructura ante la acción sísmica considerada.

Para evaluar el daño, se emplean las curvas de fragilidad de cada tipología, las cuales, para cada estado de daño, definen la probabilidad de que éste sea excedido, como una función del desplazamiento espectral de la estructura. Una vez evaluadas las curvas de fragilidad, es posible encontrar la matriz de probabilidad de daño y el grado de daño medio.

Finalmente, la evaluación de la seguridad de los edificios se basa en la comparación del daño estimado con los requisitos de seguridad planteados por el comité VISION 2000. Así mismo, se establecen funciones para evaluar la pérdida económica, así como la funcionalidad dado el daño esperado, con el fin de valorar si la seguridad exigida es suficiente o no.



## 5 Evaluación de la seguridad sísmica de edificios de importancia especial en el Valle de Arán

### 5.1 Introducción

La comarca del Valle de Arán se encuentra ubicada al noroeste de la comunidad Autónoma de Cataluña, en los Pirineos, en la frontera con Francia y en el límite de la comunidad autónoma de Aragón (Ver Figura 5-1). De acuerdo a Idescat (2010) la población en el 2009 se estimó en 10295 habitantes. La superficie es de 633.6 km<sup>2</sup>, lo cual determina una densidad de población de 16.2 hab/km<sup>2</sup>. La capital de la Comarca es Vielha e Mijaran.

En esta región la peligrosidad sísmica es considerada moderada. En la Figura 5-2 (a) se presenta el mapa de intensidades percibidas en Cataluña durante el Siglo XX. De ésta se observa que en la comarca del Valle de Arán han ocurrido eventos de intensidad VIII en la escala MSK, siendo las más altas en toda la zona. En la Figura 5-2 (b) se observan los valores medios de la aceleración pico del terreno (PGA) para un escenario de 475 años obtenidos por GEOTER (2008). En la Comarca del Valle de Arán, el PGA es del orden de 115 cm/s<sup>2</sup>.

En cuanto al estudio de la amenaza y el riesgo sísmico en esta región, el programa europeo SISPyrr - Interreg IVA 2007-2013 Francia-España-Andorra<sup>21</sup> - tiene entre sus objetivos la puesta en marcha de un sistema común de adquisición de datos sobre los terremotos y una mejor adecuación de los medios científicos y tecnológicos para la preparación de la gestión de eventuales crisis sísmicas en los Pirineos. En este proyecto participan el IGC (Institut Geològic de Catalunya) como líder del proyecto, la OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) y el Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) en Francia, y el IGN (Instituto Geográfico Nacional) y la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) en España (SISPyrr 2010).

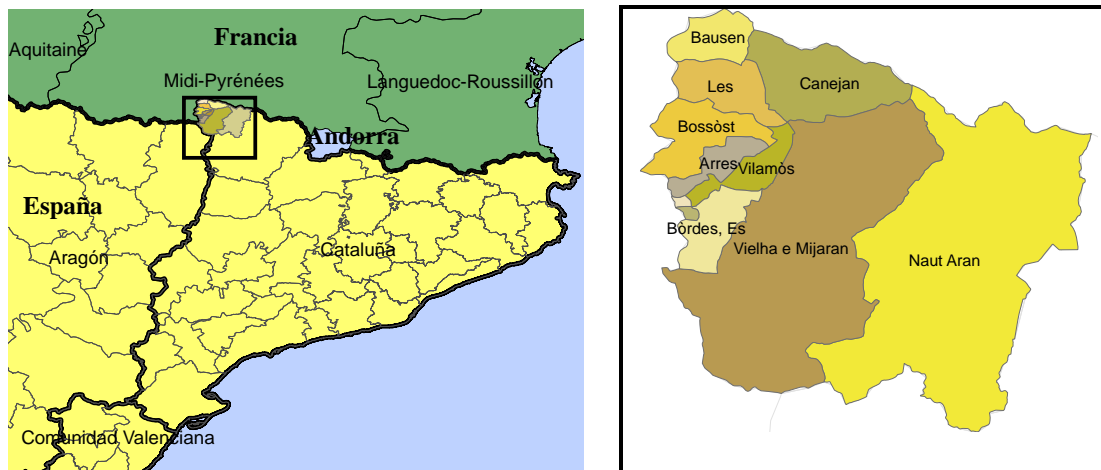
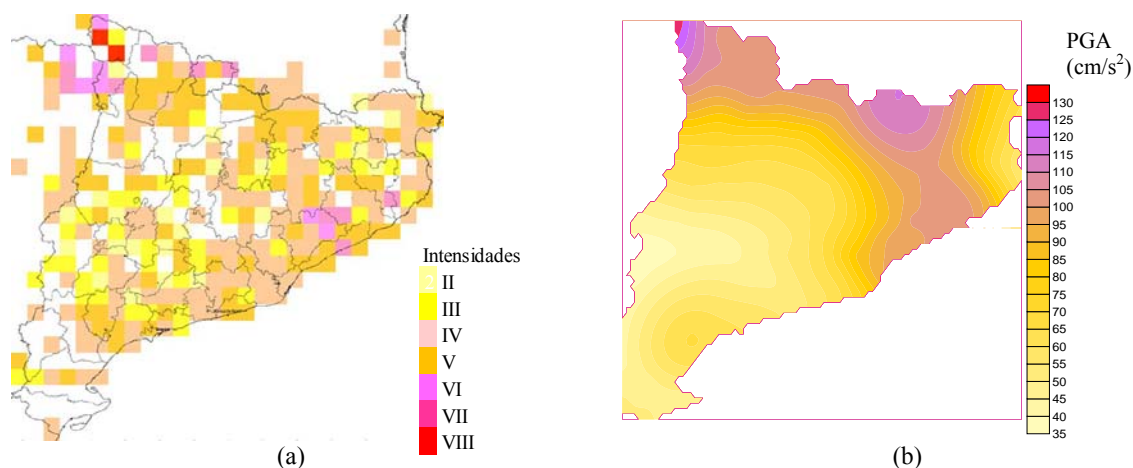


Figura 5-1 Ubicación geográfica de la zona de análisis

<sup>21</sup> Ver: <http://www.sispyr.eu/?lang=es> [Última consulta 09/11/2012]



**Figura 5-2 (a)-Intensidades máximas percibidas en Cataluña en el Siglo XX –(b)–Valores medios del PGA ( $\text{cm/s}^2$ ) para un escenario de Tr 475 años**

(Fuentes IGC<sup>22</sup>, GEOTER 2008)

Dentro de los resultados del proyecto SysPyr se encuentra la generación de escenarios de daños por eventos sísmicos. Estos resultados son útiles para dimensionar las pérdidas esperadas, para evaluar la seguridad de la infraestructura de acuerdo a estándares predefinidos y para diseñar planes de gestión de riesgos.

Estudios similares se han realizado en Chavez et al. (1999) y en González et al. (2007) evaluando la peligrosidad sísmica en términos de la intensidad macrosísmica y clasificando los edificios en clases de vulnerabilidad. A nivel municipal, Irizarry (2010) y Lantada (2009) estiman los daños en edificios en Barcelona empleando índices de vulnerabilidad, así como el método simplificado de espectros de capacidad sugeridos en el proyecto RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). En Pitalakis et al. (2006) se presenta la aplicación de estas metodologías en la ciudad de Thessaloniki, Grecia.

De esta manera, como contribución al proyecto SisPyr, se presenta, en este capítulo, la evaluación de la seguridad de un conjunto de edificios esenciales del valle de Arán siguiendo un método simplificado basado en espectros de capacidad. Los resultados de estos análisis son útiles también para el Plan Especial de Emergencias SÍSMICAS en CATALUÑA- SISMICAT, ya que permiten priorizar el análisis y reducción de la vulnerabilidad de los edificios de especial importancia en la zona de estudio. Estos resultados complementan los estudios realizados anteriormente en edificios de vivienda y en edificios esenciales, en los cuales la peligrosidad sísmica se define en términos de la intensidad macrosísmica y los edificios se clasifican en clases de vulnerabilidad (Rodríguez Pereira 2010, Monfort et al. 2011).

## 5.2 Inspección de los edificios esenciales del Valle de Arán

En el marco del proyecto SISpyr, asistentes de investigación de la UPC, con el apoyo de representantes del Consejo General de Arán y con responsables de protección civil de la zona, realizaron una campaña de inspección visual rápida de los edificios esenciales del Valle de Arán durante el periodo comprendido entre el 2 y 6 de agosto de 2010. Para organizar la información de la visita se usaron y adoptaron los Formularios de Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos y de hospitales, elaborados por el IGC en conjunto con la UPC (IGC 2010).

Dicha campaña se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento: 1) identificación de los edificios esenciales y planificación de las inspecciones; 2) recopilación de información antes de la campaña de inspección visual; 3) inspección visual rápida de los edificios; 4) revisión y análisis de resultados.

<sup>22</sup> IGC Mapa de intensidades máximas percibidas en Cataluña. [En línea]. Disponible en: [http://www.igc.cat/web/img/global/sxx\\_g.gif](http://www.igc.cat/web/img/global/sxx_g.gif) [Última consulta 09/11/2012]

*Identificación de los edificios esenciales:*<sup>23</sup>, representantes del IGC e investigadores de la UPC realizaron un listado preliminar de las instalaciones a considerar en el análisis de vulnerabilidad, incluyendo escuelas, instalaciones de salud, edificios de gobierno, de seguridad y personal de socorro, así como las construcciones destinadas a espectáculos públicos y grandes superficies comerciales. Dicho listado fue revisado y complementado por los responsables de protección civil y del Consejo General de Gobierno de Arán, estableciendo así el conjunto definitivo de 33 instalaciones (40 edificios) a incluir en el estudio (ver Anexo G). Asimismo, se identificaron posibles personas de contacto en cada institución y se elaboró un cronograma para la realización de las inspecciones.

*Recopilación de información:* una vez establecido el conjunto de instalaciones, asistentes de investigación de la UPC iniciaron el rellenado del Formulario 1, el cual incluye datos generales de las instituciones, tal como la ubicación y oferta de servicios. Esta información se adquirió a través de consultas en las páginas web de los ayuntamientos, en el Mapa escolar del Departament d'Ensenyament de la Generalitat de Catalunya y en sistemas de información geográfica como *Google Maps*, *Google Earth* y la *Guía de Cataluña*.<sup>24</sup>

*Inspección visual rápida de los edificios:* Para cada instalación incluida en el estudio, se realizaron inspecciones visuales en las cuales participaron asistentes de investigación de la UPC (Rodríguez Pereira, 2010), bomberos de la estación de Vielha y las personas de contacto de cada institución. Su objetivo fue verificar y complementar los datos del Formulario 1 e identificar las propiedades estructurales de los edificios incluidas en el Formulario 2. Así, se recopilaron datos relacionados con el año o periodo de construcción, el número de plantas y su tipología estructural. Por otro lado, se calificaron otros detalles estructurales como la irregularidad en planta y en altura, la posibilidad de golpeteo, la existencia de pilares cortos, de muros con demasiadas aberturas, de daños previos y de intervenciones estructurales.

Para la clasificación de los edificios en tipologías se verificaron propiedades estructurales como el material de construcción, el sistema resistente a cargas y el tipo de forjado. La clasificación se realizó de acuerdo a la matriz de tipologías del Formulario 2, siguiendo las instrucciones de la guía para rellenar los formularios y del Anexo Técnico (IGC 2010). Dicha matriz se basa en las tipologías del proyecto RISK UE, así como en la descripción de los edificios realizada por el IGC, la UPC y el BRGM.

*Revisión y análisis de resultados:* Una vez finalizadas las visitas, se realizó una revisión de la información gráfica obtenida (planos, fotos, informes) y de los datos incluidos en los Formularios 1 y 2. A partir de estos datos fue posible obtener una caracterización del conjunto de edificios según sus propiedades estructurales, así como sus descripciones según usos.

A través de la información obtenida es posible clasificar los edificios en tipologías estructurales representativas de la región. De esta manera es posible realizar evaluaciones simplificadas de su vulnerabilidad siguiendo métodos basados en índices de vulnerabilidad así como el método simplificado del espectro de capacidad. Así, este trabajo resulta útil también para la realización de futuros estudios de escenarios de daños. En Montfort et al. (2011) se presenta un escenario de daños potenciales en edificios residenciales en el Valle de Arán aplicando el método de índices de vulnerabilidad. Como complemento a este estudio, en este Capítulo se presenta una evaluación de daños en los edificios de importancia especial de la región. Para el desarrollo del análisis se adopta la metodología de evaluación de la seguridad de edificios esenciales presentada en el Capítulo 4.

---

<sup>23</sup>La Norma de Construcción Sismo resistente Española NCSE-02 considera los edificios de importancia especial (esenciales) como aquellos cuya destrucción por el terremoto puedan interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos; en esta categoría se incluyen hospitales, edificios e instalaciones de operación de líneas vitales, organismos para la respuesta a emergencias, monumentos históricos y edificios de almacenamiento de sustancias peligrosas.

<sup>24</sup> Ver: Guía de Cataluña: <http://mercuri.icc.cat/website/guia/carrerer.html>? [Última consulta 09/11/2012]

Maps Google: <http://maps.google.com/> [Última consulta 09/11/2012]

Mapa escolar de Cataluña <http://aplitic.xtec.cat/MapaEscolar/> [Última consulta 09/11/2012]

Departament d'Ensenyament. Consulta de centres i ensenyaments

[http://www10.gencat.net/pls/ense\\_ensenyam/p01.menu](http://www10.gencat.net/pls/ense_ensenyam/p01.menu) [Última consulta 09/11/2012]

### 5.3 Descripción del conjunto de edificios

A partir de las inspecciones se obtuvo una descripción del conjunto de edificios según sus propiedades estructurales. En el Anexo G se presenta un resumen de las propiedades estructurales de los edificios, en cuanto a su tipología estructural y detalles estructurales asociados a su año de construcción, irregularidad en planta, irregularidad en altura, posibilidad de golpeteo, columna corta, muros con demasiadas aberturas, daños previos, asentamientos diferenciales e intervenciones estructurales.

Por cada instalación, se presentan detalles sobre sus tipologías estructurales (Parte I) y se recopilan datos asociados a su oferta de servicios o usos (Parte II). Esta caracterización es útil para identificar aspectos de la capacidad de respuesta, tales como la disponibilidad de servicios médicos y de personal de socorro y seguridad, así como zonas de refugio temporal. Por otro lado, permite identificar las tipologías estructurales más frecuentes en cada tipo de servicio.

#### Parte I Descripción general del conjunto de edificios según propiedades estructurales

##### 5.3.1 Edificios según tipología estructural

En la Tabla 5-1 y en la Figura 5-3 se presenta el número y porcentaje de edificios según tipología estructural. De esta Tabla se observa que las tipologías más frecuentes son edificios de muros de piedra (M1.2), edificios de pilares y forjados de hormigón armado con muros de relleno irregulares (RC3.2) y edificios de muros de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería (M3.3) y forjados de hormigón armado (M3.4).

La composición de edificios según tipologías estructurales refleja las técnicas constructivas empleadas en la región y está relacionada con los periodos de construcción. Como se verá más adelante, los edificios construidos antes de 1962 son en su mayoría de muros de mampostería y de piedra.

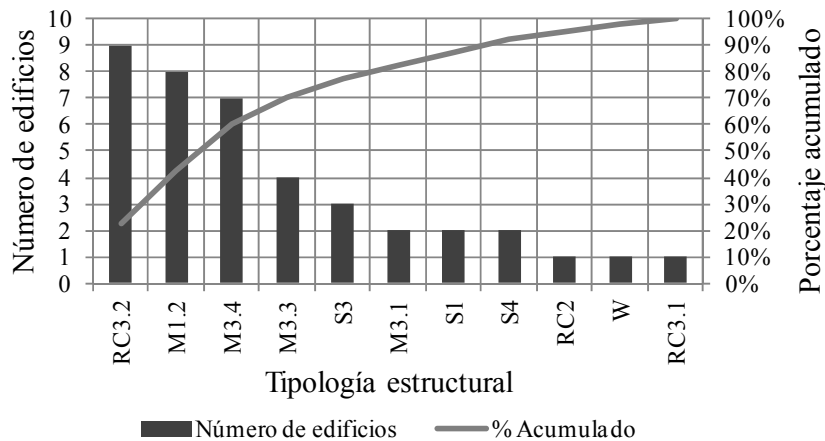


Figura 5-3 Número y porcentaje acumulado de edificios según tipologías estructurales

Tabla 5–1 Número y porcentaje de edificios según tipologías estructurales

Tipología		Número de edificios	Porcentaje
Muros de carga de mampostería no reforzada	M1.2 muros de carga con mampostería de piedra tallada	8	20.0%
	M3.1 con forjados de madera	2	5.0%
	M3.3 Con forjados mixtos de acero y mampostería	4	10.0%
	M3.4 Con forjados de losas de hormigón armado	7	17.5%
Estructuras de hormigón armado	RC3.2 Estructuras irregulares con tabiquería de mampostería	9	22.5%
	RC3.1 Estructuras regulares con tabiquería de mampostería	1	2.5%
	RC2 Muros de hormigón armado	1	2.5%
Estructura metálica	S1 Estructuras metálicas con tabiquería de mampostería no reforzada	2	5.0%
	S3 Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados “ <i>in situ</i> ”	3	7.5%
	S4 Sistemas o estructuras mixtas de acero y hormigón armado	2	5.0%
Madera	W Estructuras de madera	1	2.5%
Total general		40	100%

Nota: Se emplean las letras “L” para edificios de baja altura, “M” para edificios de mediana altura y “L” para edificios altos

### 5.3.2 Edificios según periodo de construcción

La clasificación de edificios según periodos de construcción permite hacer una revisión de los requisitos sismoresistentes que se tuvieron en cuenta en su diseño. De esta manera, es posible obtener una referencia de su vulnerabilidad al compararlos con los estándares de seguridad más recientes. En la Tabla 5–2 y en la Figura 5-4 se presentan el número y porcentaje de edificios según el periodo de construcción. Se observa que el 40% (16 de 40) de los edificios han sido construidos antes de 1962, periodo en el cual no existían requerimientos para el diseño sísmico. Entre 1962 y 1974 ninguno de los edificios esenciales fue construido.

Entre 1974 y 1995, se construyeron el 25% (10 de 40) de los edificios inspeccionados. En este periodo se adopta el uso de la norma sismoresistente PDS-1 (PDS-1 1974). Ésta normativa define las acciones verticales y horizontales para la construcción de las estructuras e introduce un coeficiente sísmico (relación entre la aceleración de un punto de la estructura respecto a la gravedad) que depende de factores asociados a la intensidad macrosísmica, al riesgo sísmico (relacionado con la intensidad y el periodo de retorno) la cimentación, el periodo estructural y la distribución del edificio.

La PDS-1 presenta una zonificación sísmica que clasifica el territorio español en zonas de baja, media y alta sismicidad. Esta norma se consideró aplicable para las zonas de media y alta sismicidad, mientras que en zonas de sismicidad baja, se consideró aplicable sólo para edificios e instalaciones especiales.

Al respecto, el municipio de Vielha se encuentra en una zona de intensidad macrosísmica VIII (alta sismicidad). En ésta región, para obras cuya destrucción llegara a ocasionar víctimas humanas, interrumpir un servicio necesario para la colectividad o producir importantes pérdidas económicas (obras del grupo 2), se restringía el uso de estructuras de adobe, tapial, mampostería en seco y estructuras entramadas de madera. Así mismo, para obras cuya destrucción pudiera interrumpir un servicio imprescindible después de ocurrido un terremoto o dar lugar a efectos catastróficos (obras del grupo 3), sólo se admitía el uso de de estructuras metálicas o de hormigón armado. En cuanto a la seguridad de las estructuras metálicas, al inicio de este período también se aprueba la norma MV-102-1975 (1975) “acero laminado para estructuras de edificación” que consolida la evolución de las técnicas de fabricación de productos laminados de acero.

Entre 1995 y 2002 se encuentran el 15% (6 de 40) de los edificios. En dicho periodo se adopta el uso de la norma sismoresistente NCSE-94 (1994), en la cual se sustituye el concepto de intensidad por el de peligrosidad sísmica asociada a un concepto de probabilidad e introduce los espectros de respuesta como base para el cálculo de las acciones sísmicas y el diseño estructural.

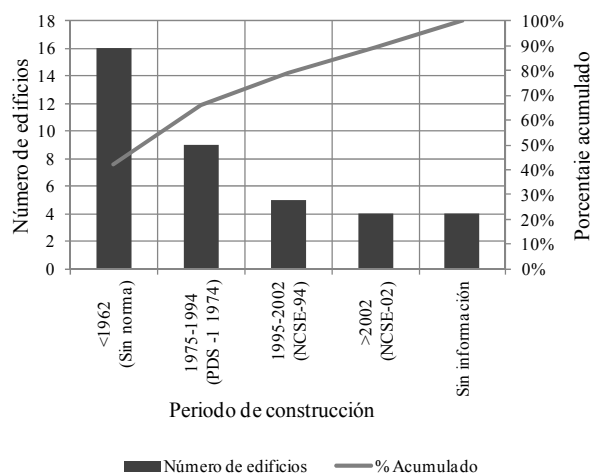
La NCSE-94 presenta un mapa de peligrosidad sísmica asociado a un periodo de retorno de 500 años, expresado en términos de la aceleración básica del terreno como fracción de la gravedad. Esta norma fue de obligatorio cumplimiento para edificios de importancia normal y especial (semejantes a las obras de los grupos 2 y 3 de la PDS-1 1974) ubicados en zonas cuya aceleración básica fuera mayor o igual a 0.06 g. En las zonas restantes, los requerimientos de este código se consideraron como recomendaciones.

Por otro lado, este código restringió el uso de estructuras de mampostería en seco en las edificaciones de normal o de especial importancia en zonas en las cuales la aceleración sísmica de cálculo fuera superior a 0.08 g. Al respecto, en los municipios de Es Bòrdes, Bausen, Bossòst y Canejan, ubicados en el Valle de Arán, se estima una aceleración básica cercana a 0.05g. Así, no es posible afirmar que en el diseño de éstos edificios se tuvieron en cuenta los requerimientos de la NCSE-94.

Son pocos (4 de 40) los edificios que fueron construidos después de 2002. En dicho año se adopta la Norma de Construcción Sismoresistente Española NCSE-02 (2002), la cual aumenta la exigencia a construcciones de importancia especial y presenta metodologías de diseño más completas y rigurosas en especial para edificios de muros de fábrica y hormigón armado. En el caso de las edificaciones de importancia normal y especial, esta norma es de obligatorio cumplimiento para aquellas ubicadas en zonas en las que la aceleración básica, para un escenario de periodo de retorno de 500 años, sea mayor a 0.04 g. Adicionalmente, en los casos de aplicación de la norma, se restringe el uso de estructuras de mampostería en seco, de adobe o de tapial para este tipo de edificaciones. Al respecto, en el municipio de Vielha, entre otros de la comarca del Valle de Arán, se estima una aceleración básica de 0.04 g, por lo tanto, se espera que en su diseño se hayan tenido en cuenta las restricciones de esta normativa.

**Tabla 5-2 Número de edificios y porcentaje según periodos de construcción**

Periodo de construcción	Norma sísmica aplicable	Número de edificios	Porcentaje	Acumulado
<1962	Sin norma	16	40%	40%
1975-1994	PDS-1 1974	10	25%	65%
1995-2002	NCSE-94	6	15%	80%
>2002	NCSE-02	4	10%	90%
Sin información		4	10%	100%
<b>Total general</b>		<b>40</b>	<b>100%</b>	

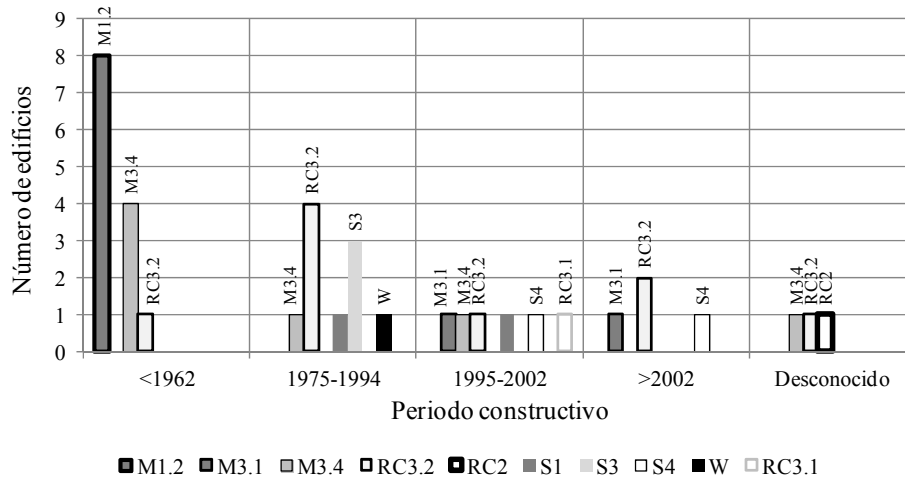


**Figura 5-4 Número y porcentaje acumulado de edificios según periodos de construcción**

En la Tabla 5-3 y en la Figura 5-5 se presenta el número de edificios según tipología estructural y periodo de construcción. Se observa que la mayoría de los edificios de muros de piedra, así como también los de muros de mampostería fueron construidos antes de 1962. En años posteriores se presentan en mayor proporción edificios de hormigón armado y estructuras metálicas, lo cual va de acuerdo con las restricciones incluidas en las normativas sismoresistentes españolas respecto al tipo de estructuras a utilizar en los edificios esenciales.

**Tabla 5-3 Número de edificios según tipología estructural y periodo de construcción**

Tipología	<1962	1975-1994	1995-2002	>2002	Desconocido	Total general
M1.2	8					8
M3.1			1	1		2
M3.3	3				1	4
M3.4	4	1	1		1	7
RC3.2	1	4	1	2	1	9
RC2					1	1
S1		1	1			3
S3		3				2
S4			1	1		1
W		1				2
RC3.1			1			1
Total general	16	10	6	4	4	40



**Figura 5-5 Número de edificios según tipología estructural y periodo de construcción**

Si bien los edificios en su mayoría han tenido modificaciones durante su vida útil, éstas no se han desarrollado para reducir su vulnerabilidad. Así, no se han presentado casos de intervenciones estructurales que actualicen la seguridad de los edificios a los requerimientos de las normativas de construcción más recientes.

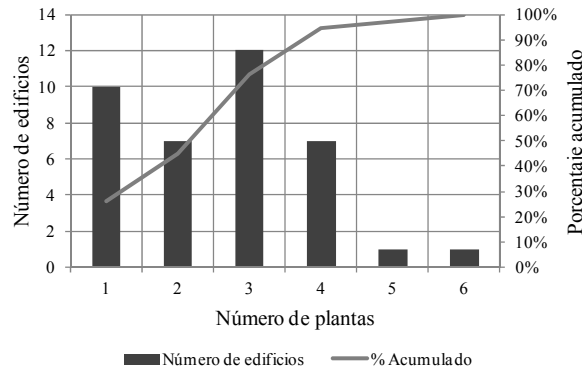
### 5.3.3 Edificios según número de plantas

En la Tabla 5-4 y en la Figura 5-6 se presenta el número y porcentaje de edificios según número de plantas sobre rasante. Se observa que la mayoría de las estructuras tienen menos de cuatro plantas. Por lo tanto, la mayoría de los edificios estarán clasificados en tipologías de mediana y baja altura. De estos resultados debe tenerse en cuenta que los polideportivos son considerados como edificios de una sola planta, no obstante, sus alturas son mayores a las típicas de un edificio de pilares y forjados de hormigón o de muros de mampostería.

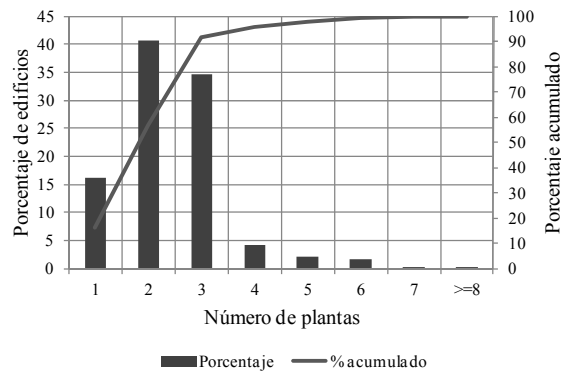
Con fines comparativos, en la Figura 5-7 se presenta el porcentaje del total de edificios en la Comarca de Valle de Arán según número de plantas. Estos datos permiten identificar los patrones regionales en cuanto a la altura de los edificios, los cuales en su mayoría (cerca del 90%) son menores de cuatro plantas.

**Tabla 5-4 Número y porcentaje de edificios según número de plantas**

Número de plantas	Número de edificios	Porcentaje
1	11	28%
2	8	20%
3	12	30%
4	7	18%
5	1	3%
6	1	3%
<b>Total general</b>	<b>40</b>	<b>100%</b>



**Figura 5-6 Número y porcentaje acumulado de edificios según número de plantas**



**Figura 5-7 Porcentaje y porcentaje acumulado de edificios según número de plantas en la comarca de Val d' Aran**

(Fuente Idescat 2010 a)

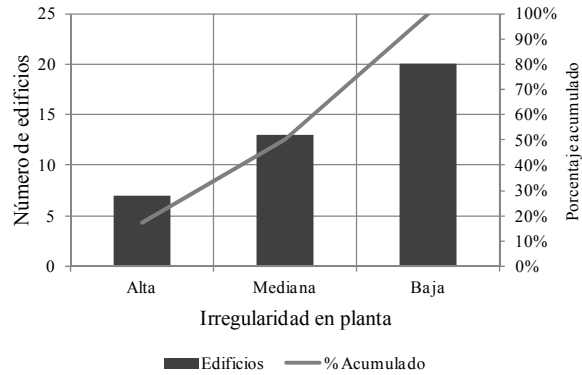
### 5.3.4 Edificios según irregularidades en planta

En la Tabla 5-5 y en la Figura 5-8 se presentan el número, el porcentaje y el porcentaje acumulado de edificios según su calificación por irregularidad en planta. Cerca del 50% de los edificios tienen plantas rectangulares, para los cuales se considera que su irregularidad es baja; cerca del 32% se califica con irregularidad en planta media y el 18% restante con alta.



**Tabla 5–5 Número y porcentaje de edificios según irregularidad en planta**

Irregularidad en planta	Edificios	Porcentaje	% Acumulado
Alta	7	18%	18%
Mediana	13	32%	50%
Baja	20	50%	100%
Total general	40	100	



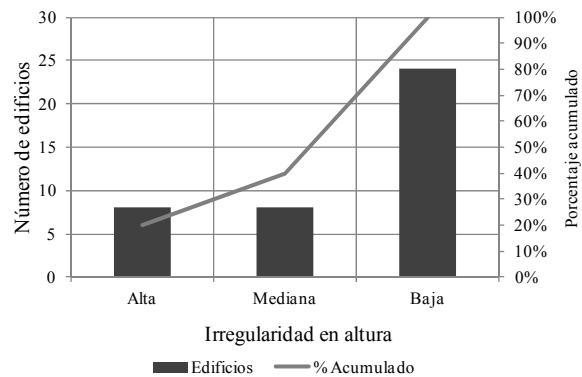
**Figura 5-8 Número y porcentaje acumulado de edificios según irregularidad en planta**

### 5.3.5 Edificios según irregularidades en altura

En la Tabla 5–6 y en la Figura 5-9 se presenta el número, el porcentaje y el porcentaje acumulado de edificios según su calificación por irregularidad en altura. El 60% se calificó con irregularidad baja, el 20% con irregularidad media y el 20% con alta.

**Tabla 5–6 Número y porcentaje de edificios según irregularidad en altura**

Irregularidad en altura	Edificios	Porcentaje	% Acumulado
Alta	8	20%	20%
Mediana	8	20%	40%
Baja	24	60%	100%
Total general	40	100%	



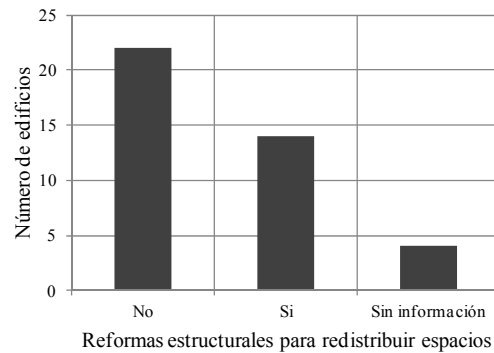
**Figura 5-9 Número y porcentaje acumulado de edificios según irregularidad en altura**

### 5.3.6 Edificios según reformas estructurales

En la Tabla 5-7 y en la Figura 5-10 se presenta el número y porcentaje de edificios en los cuales se han realizado intervenciones para redistribuir espacios. Estas obras se han realizado para el mantenimiento y conservación de los edificios, para adecuar sus espacios para el funcionamiento de las instituciones, así como para preservar su valor cultural y patrimonial. Por ejemplo, de los edificios de administración de gobierno, todos han tenido intervenciones. En la Figura 5-11 y en la Tabla 5-8 se presentan el número y porcentaje de edificios en los cuales se han realizado intervenciones para repararlos. Éste caso es poco frecuente y no está relacionado con daños producidos por eventos sísmicos.

**Tabla 5-7 Número de edificios según reformas para redistribuir espacios**

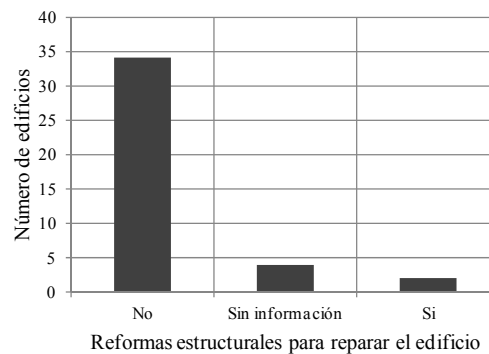
Reformas para redistribuir espacios	Número de edificios	Porcentaje
No	22	55%
Si	14	35%
Sin información	4	10%
Total general	40	100%



**Figura 5-10 Número de edificios con reformas estructurales para redistribuir espacios**

**Tabla 5-8 Número de edificios con reformas para reparar el edificio**

Reformas para reparar el edificio	Número de edificios	Porcentaje
No	34	85%
Sin información	4	10%
Si	2	5%
Total general	40	100



**Figura 5-11 Número de edificios con reformas para reparar el edificio**

### 5.3.7 Otros detalles estructurales

En esta sección se presentan las observaciones recopiladas respecto a otros detalles estructurales relacionados con la posibilidad de golpeteo, la existencia de pilares cortos y de muros con demasiadas aberturas. En relación a la posibilidad de golpeteo, se observa que la mayoría de los edificios (29 de 40) no presentan posibilidad de golpeteo debido a que se encuentran aislados o lo suficientemente separados de los edificios contiguos. En el caso de edificios de pilares y forjados, sólo se identificaron dos casos de posible desarrollo de pilares cortos. En el caso de edificios de muros de carga, la mayoría tienen muros exteriores sólidos; se encuentran pocos casos de muros estructurales con demasiadas aberturas. En cuanto a los daños observados, en la Tabla 5-9 se presenta el número de edificios según fisuras en elementos estructurales. En pocos edificios se identificaron daños, los cuales, no han sido originados por eventos sísmicos.

**Tabla 5-9 Número de edificios según fisuras en elementos estructurales**

Fisuras en elementos estructurales	Cuenta de edificios
No	30
Si	9
Sin información	1
Total general	40

### Parte II Descripción del conjunto de edificios esenciales según usos y tipologías estructurales

Para complementar la descripción, en la Tabla 5-10 y en la Figura 5-12 se presentan los edificios según usos y tipologías estructurales. Se observa que los edificios para espectáculos públicos y/o grandes centros comerciales son estructuras metálicas o de hormigón armado. Los edificios de enseñanza, al igual que los de administración de gobierno y de personal de ayuda, son en su mayoría de muros de mampostería y de piedra; en menor medida se encuentran edificios de hormigón armado. En el caso de los edificios de salud, se encuentran estructuras de hormigón armado y de mampostería.

**Tabla 5-10 Número de edificios según tipología estructural y uso**

Uso	Tipologías estructurales											Total general	
	Piedra		Mampostería				Hormigón armado			Metálica			Madera
	M1.2	M3.1	M3.3	M3.4	RC3.1	RC3.2	RC2	S3	S4	S1	W		
Administración de gobierno	3			2		1							6
Edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales					1	2		3	2	2	1		11
Enseñanza	3	1	1	2		2	1						10
Patrimonio	1												1
Personal y equipo de ayuda	1	1	2	1		2							7
Salud			1	2		2							5
Total general	8	2	4	7		10	1	3	2	2	1		40

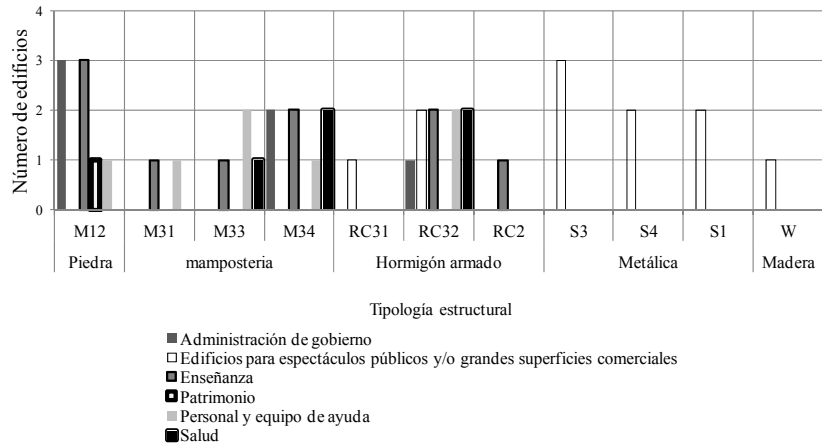


Figura 5-12 Número de edificios según tipología estructural y uso

Por otro lado, en la Tabla 5-11 y en la Figura 5-13 se presenta el número de edificios según uso y periodos de construcción. Se observa que los edificios de administración de gobierno y de enseñanza son los sectores en los cuales se encuentran las estructuras más antiguas.

Tabla 5-11 Edificios según uso y periodo de construcción

Uso	<1962	1975-1994	1995-2002	>2002	Desconocido	Total general
Administración de gobierno	5		1			6
Edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales		7	3	1		11
Enseñanza	6			2	2	10
Patrimonio	1					1
Personal y equipo de ayuda	3	1	2		1	7
Salud	1	2		1	1	5
Total general	16	10	6	4	4	40

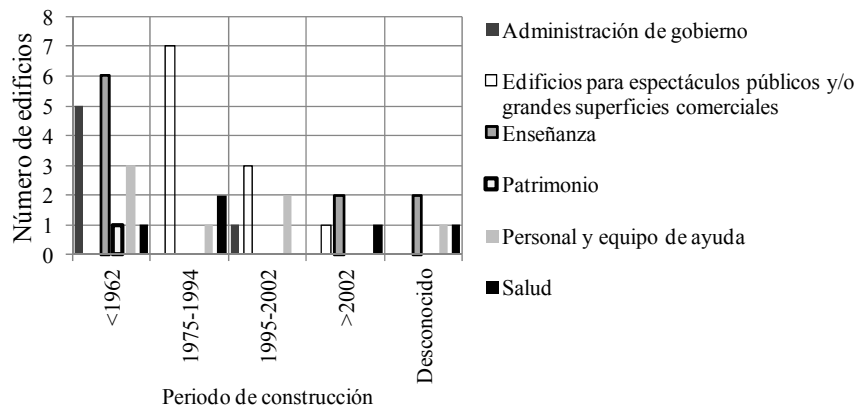


Figura 5-13 Edificios según uso y periodo de construcción

### 5.3.8 Edificios de salud

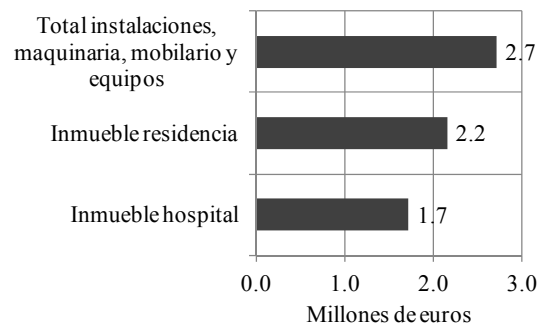
En el Valle de Arán, la oferta de servicios de salud está condicionada por la dispersión de la población en una zona montañosa de baja accesibilidad y con una limitada oferta de transporte público. En cuanto al flujo de pacientes, el Valle de Arán actúa como un referente de servicios especializados de la población de la comarca de Alta Ribagorça, de la comunidad de Aragón y eventualmente de la zona norte del Pallars Sobirà. Adicionalmente, existe un flujo de pacientes hacia los recursos sanitarios franceses en casos de atención sanitaria urgente. Al respecto, los servicios de salud del Valle de Arán forman parte de un proyecto transfronterizo (Sécurité-Urgence-Pyrenées) cuyo objetivo es contar con información común respecto a los servicios de urgencia y rescate de la zona (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2008).

La oferta de servicios de salud se realiza a través de los Centros de Atención Primaria (CAP) y del Espitau (hospital) de Val d’Aran. Los primeros corresponden a instalaciones sencillas que cuentan sólo con habitaciones para diagnóstico general. De los CAP visitados, el de Salardú está ubicado en el mismo edificio del ayuntamiento. Los CAP de Arties y Bossòst funcionan en edificios en los que se alojan otras actividades. Por otro lado, el Espitau del Val d’Aran, es un hospital general básico y cuenta con 31 camas de hospitalización. De acuerdo con el “Pla Funcional d’ampliació i millora de l’Espitau Val d’Aran” (Consorci Hospitalari de Catalunya 2009), el índice de ocupación de referencia es del 85%.

En cuanto a sus instalaciones, el hospital está compuesto por tres edificios. Funcionalmente, estos se pueden clasificar en dos tipos, siendo uno para servicios de atención médica (hospital) y los restantes para la atención de adultos mayores (residencia y su ampliación). En el hospital se encuentran los tanques de almacenamiento de gases y agua y desde allí se distribuyen a los otros edificios.

En cuanto a las tipologías constructivas de los edificios, el hospital es una estructura de pilares de hormigón armado con forjados reticulares y muros de relleno de mampostería no reforzada. La planta de este edificio es rectangular, alargada y tiene una planta subterránea y tres plantas sobre rasante. Existe un espacio abierto entre la planta baja y la primera planta por lo que se considera que existe alta irregularidad en altura.

Por otro lado, la residencia está compuesta por dos estructuras: el edificio original y su ampliación. El edificio original corresponde a una construcción antigua de muros de mampostería de cuatro plantas sobre rasante y una planta subterránea. Éste edificio fue reformado en el año 2006, modificándose los forjados por unos de hormigón armado. En cuanto a la ampliación, es un edificio de planta rectangular y tiene una planta subterránea y cuatro niveles sobre rasante. Su estructura es de pilares de hormigón armado y muros de relleno de mampostería. El valor económico del hospital se describe en la Figura 5-14 y en la Tabla 5-12.



**Figura 5-14 Resumen de valores de los inmuebles, instalaciones, maquinaria, equipo y mobiliario del hospital**

**Tabla 5–12 Valor de los edificios y contenidos de la residencia y el hospital**

Descripción	Valor €
Inmueble hospital	1,716,577.2
Inmueble residencia	2,150,840.1
Inmueble construcciones (Depuradora)	63,389.5
Inmueble construcciones (Urgencias)	595,189.1
Instalaciones	361,824.3
Instalaciones Radiología	322,572.1
Instalaciones urgencias	21,435.1
Maquinaria y aparatos de uso clínico	388,786.3
Mobiliario	249,043.2
Equipos informáticos	226,504.1
Aplicaciones informáticas	143,469.0
Útiles	402,767.5
Total instalaciones, maquinaria, mobiliario y equipos	2,711,590.7
Total	6,642,397.4

### 5.3.9 Edificios de enseñanza

En la Tabla 5–13 y en la Tabla 5–14 se presentan el número de centros, alumnos y profesores según nivel educativo para el año 2006 en la comarca de Valle de Arán. Esta información sirve para dimensionar el alcance del estudio al compararla con los datos obtenidos en las inspecciones. En este sentido, la Tabla 5–15 presenta los edificios escolares visitados, clasificados por nivel de enseñanza. Estos datos también son útiles para identificar cuáles son los centros educativos que pueden tener mayor concentración de alumnos durante terremotos, así como de la importancia de cada centro en la oferta de los servicios en la región de análisis.

Se incluyeron dos guarderías, siete centros de educación primaria, uno de educación secundaria obligatoria y bachillerato y uno de formación técnica. Así, se abarcó la mayoría de los centros de enseñanza de la zona. En cuanto al número de ocupantes, se observa que algunos centros (5 de 11) tienen menos de 30 alumnos; 3 de 11 tienen entre 30 y 100 alumnos. Sólo dos escuelas y el albergue pueden tener más de 100 ocupantes. De acuerdo con esto, la mayoría de las escuelas tienen una baja concentración de personas.

Los centros de educación primaria son en su mayoría edificios construidos entre 1920 y 1950 siguiendo un modelo arquitectónico de un edificio de muros de piedra, de planta rectangular alargada y de dos niveles sobre rasante. Originalmente, los forjados de estos edificios eran de madera, tal como se observa en las fotos de la escuela *CEIP Casteth Leon*, ubicada en Es Bordes (Ver Anexo G, Formulario 29). En varios de estos centros se han efectuado diferentes reformas estructurales entre las que encuentran casos de redistribución de espacios, intervención en los muros y forjados y la adición de vigas y pilares metálicos o de hormigón armado.

Los edificios más recientes y de mayor ocupación son el CEIP Garona y el IES d'Aran. Son estructuras de pilares y forjados de hormigón armado, de tres y seis niveles sobre rasante respectivamente, ubicados en un terreno pendiente con irregularidades en planta y en altura.

**Tabla 5–13 Número de centros y alumnos según nivel educativo (2006)**

Nivel educativo	Centros	Alumnos
Educación infantil	10	354
Primaria	8	514
ESO	1	315
Bachillerato	1	56
Centros de formación de grado medio	2	111
Centros de formación de grado superior	1	20

(Fuente Idescat 2010 b)

**Tabla 5–14 Número de profesores según nivel de educación (2006)**

Nivel educativo	Profesores
Infantil y primaria	98
Secundaria	59
Educación especial	0

Fuente (Idescat 2010 b)

**Tabla 5–15 Número de alumnos según centro educativo y nivel de instrucción**

Nivel	Institución	Alumnos
Educación infantil: guarderías	EEI Municipal Bossòst (guardería)	18
	EEI Municipal Vielha (guardería)	60
	Escola Mairau Era Cunhera	
Educación infantil: parvulario, Educación primaria	CEIP Sant Martí	6
	CEIP Casteth Leon	6
	CEIP Eth Roser	7
	CEIP de Salardú	21
	CEIP Loseron	76
	CEIP Estudi Alejandro Casona	94
	CEIP Garona (nou)	490
Educación primaria, educación especial, parvulario	IES d'Aran (Juan Marc)	530
Educación secundaria obligatoria, Bachillerato, Formación profesional de grado medio	EFTE Centre Públic de Tècnics Esportius dera Val d'Aran	180
Técnico de deporte, Técnico superior en deporte		

La guardería EEI Bossòst está ubicada en el mismo edificio del ayuntamiento de Bossòst. Los demás centros educativos funcionan en edificios independientes.

### 5.3.10 Edificios de personal y equipos de ayuda

En esta categoría se encuentran los edificios destinados para servicios de bomberos, Policía Nacional, Guardia Civil y Mossos de Esquadra. En la Tabla 5–16 se presenta un número aproximado de oficiales que ocupan en un día promedio las instalaciones. Respecto a los edificios de bomberos, éstos se caracterizan por tener una estructura compuesta por el aparcamiento y áreas destinadas a oficinas, centros de comunicación entre otros servicios para el uso de los oficiales. En cuanto a su estructura, sólo la estación de Vielha es de pilares y forjados de hormigón armado. Las demás son de muros de mampostería o de piedra, como en el caso del parque de bomberos voluntarios de Les.

En los edificios de la Policía Nacional y la Guardia civil, las primeras plantas se usan para los servicios institucionales; las restantes están habilitadas para la vivienda de los oficiales. En cuanto a su estructura, son edificios de muros de mampostería no reforzada. En los casos en los cuales no fue posible realizar una verificación del tipo de forjado, se supuso que son mixtos de acero y mampostería dados el periodo de construcción y las técnicas constructivas más frecuentes.

El edificio de los Mossos de Esquadra es una construcción reciente que sigue un modelo arquitectónico propio de estas instalaciones. Su estructura es de pórticos de hormigón armado con muros de relleno de mampostería no reforzada y una cubierta metálica circular.

**Tabla 5–16 Número aproximado de oficiales según institución**

Institución	Personal
Parc de Bombers Voluntaris de Vielha e Mijaran	10
Parc de Bombers Voluntaris de Bossòst	5
Parc de Bombers Voluntaris de Les	5
Policia Nacional	10
Guardia Civil	Sin información
Comissaria de la Policia de la Generalitat - Mossos d'Esquadra	15

### *5.3.11 Edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales*

En esta categoría se encuentran los supermercados, así como los polideportivos de cada municipio y el Palacio de Hielo. Por sus funciones, estos edificios requieren amplios espacios para los cuales se adaptan pórticos metálicos o bien estructuras de pilares y forjados de hormigón armado. En el caso del supermercado “Caprabo”, su estructura es de pórticos y cerchas metálicas, de cubierta liviana con muros de relleno de bloques de hormigón. El supermercado Boya es una estructura compuesta, siendo el primer nivel de pilares y forjados de hormigón armado y las plantas restantes de pórticos metálicos. Los muros perimetrales son de mampostería no reforzada o de hormigón. Las cubiertas son livianas y están soportadas por cerchas metálicas.

Los polideportivos son estructuras de pilares metálicos de diversas secciones (rectangulares, circulares, en I) y cerchas metálicas. Sólo en el polideportivo de Les, la estructura es de cerchas de madera. Estos edificios tienen muros de relleno de mampostería no reforzada y cubiertas ligeras metálicas. En el caso del nuevo polideportivo de Vielha, esta estructura presenta muros de hormigón armado, así como pilares y cerchas metálicas. En la Tabla 5–17 se presenta una medida aproximada de su superficie que permite tener una idea de la posible concentración de población o de su uso potencial como albergue en condiciones de emergencia.

Por otro lado, el Palacio de Hielo es una estructura compuesta según las funciones del edificio. Se encuentran pilares, vigas y forjados de hormigón armado que sirven de soporte para las zonas de la piscina y pista de hielo. Por otro lado, se encuentran pórticos metálicos en las zonas de fachada, pasos y escaleras. El edificio fue reformado con el fin de utilizar parte de la zona prevista para gradas de espectadores, subdividiendo así el edificio en dos niveles y habilitando así espacios para la construcción de una pista de hielo, una piscina climatizada, entre otros servicios de recreación. Para la reforma se consideraron: la Norma MV 101-1962 para definir las acciones en la edificación, la norma EH-82 “Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado”, así como la norma sísmica PDS-1-1 1974 y la norma NBE MV-103 – “Cálculo de estructuras de acero laminado en edificación”.



**Tabla 5–17 Superficie aproximada de los polideportivos inspeccionados**

Edificio	Área (m <sup>2</sup> )
Polideportivo de Bossòst	875
Polideportivo de Les	450
Polideportivo de Vielha (nuevo)	1372.5
Antiguo polideportivo de Vielha	1160
Polideportivo de Salardú	600

### 5.3.12 Monumentos históricos o artísticos o de interés cultural y edificios de administración de gobierno

En esta categoría se encuentra el Archivo Histórico del Valle de Arán y los edificios de los ayuntamientos y del Consejo General de Arán. Los edificios de este tipo corresponden a edificios construidos o bien antes de 1900, o entre 1900 y 1950. Son edificios adaptados para usos de oficina; su estructura en la mayoría de los casos es de muros de piedra o de mampostería, cuya altura varía entre tres y cuatro plantas sobre rasante, con forjados de madera. Dada su antigüedad, en estos edificios se han desarrollado reformas estructurales para redistribuir espacios. Por otro lado, el Archivo histórico es un edificio de muros de piedra, construido hacia 1820, de cuatro plantas sobre rasante, con irregularidades en planta y en altura.

## 5.4 Estimación del daño esperado y evaluación de la seguridad de los edificios

La estimación del daño esperado se realiza siguiendo el método simplificado de espectros de capacidad, tal como se describe en el Capítulo 4. Su aplicación se basa en la clasificación de los edificios en tipologías estructurales, para las cuales se adoptan los espectros de capacidad sugeridos en el proyecto RISK UE y HAZUS entre otras fuentes (ver Tabla 5–18).

**Tabla 5–18 Referencias empleadas para definir los parámetros de los espectros de capacidad de los edificios**

Tipología	Referencia
M1.2	Giovinazzi (2005)
M3.1	
M3.3	
M3.4	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Università degli Studi di Genova (UNIGE); edificios sin diseño sismoresistente (pre code)
RC2	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) edificios de nivel bajo de diseño sismoresistente (Low code)
RC3.2	Moreno (2006)
RC3.1	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) edificios de nivel bajo de diseño sismoresistente (Low code)
S1	HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003)
S3	
S4	
W	

En cuanto a la demanda sísmica, tal como se ha explicado en el Capítulo 4, se adaptan las formas espectrales propuestas en el Eurocódigo 8 a los espectros de amenaza uniforme desarrollados por GEOTER (2008), para los periodos de retorno de 475 y 975 años. A su vez, para considerar los efectos de sitio, se utiliza la clasificación y caracterización de la respuesta sísmica de los diferentes tipos de suelo obtenida en un estudio de mesozonación elaborado para Cataluña (IGC 2011). Así, al comparar los espectros de demanda y de capacidad, se determina el punto de comportamiento de los edificios. Una vez conocido el desplazamiento en el punto de comportamiento, es posible estimar la probabilidad de exceder un determinado estado de daño haciendo uso de las curvas de fragilidad sugeridas en el proyecto RISK UE. Para el caso de las tipologías S1, S3, S4 y W se emplearon las curvas de fragilidad definidas en el manual de la metodología HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003).

En la Figura 5-15 se presenta el porcentaje y porcentaje acumulado de instalaciones según rangos del PGA para periodos de retorno de 475 (a) y 975 años (b). Se observa que cerca del 65% de las instalaciones están expuestas a un PGA entre 0.1 g y 0.11 g. El porcentaje restante están expuestas a un PGA que varía entre 0.11 g y 0.12 g. Para periodos de retorno de 975 años, menos del 5% de las instalaciones están expuestas a un PGA entre 0.1 g y 0.11 g; cerca del 30% de las instalaciones están expuestas a un PGA entre 0.11 g y 0.12. El resto de las instalaciones (cerca del 65%) están expuestas a un rango de PGA entre 0.12 g y 0.13 g.

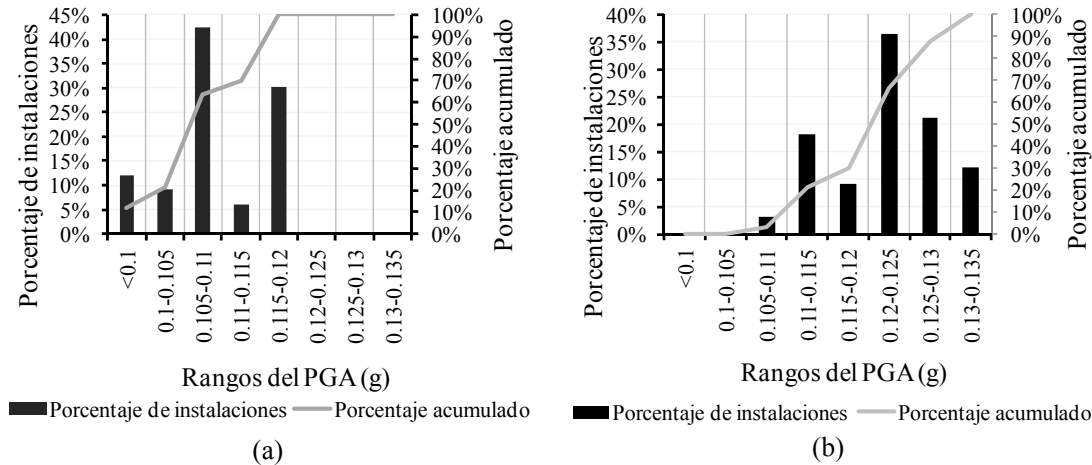


Figura 5-15 Porcentaje de instalaciones según rangos del PGA (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años

En la Figura 5-16 se presenta el porcentaje de instalaciones según tipos de suelo. Cerca del 70% se encuentra en roca firme (suelo tipo A), Un 20% en suelo tipo C y un 10% en suelo tipo E. En la Figura 5-17 se presenta el porcentaje de instalaciones por rangos de PGA al considerar los tipos de suelo, para periodos de retorno de 475 años y 975 años.

En la Figura 5-17 se observa que cerca del 70% de las instalaciones están expuestas a un PGA menor que 0.12 g para un periodo de 475 años; las cuales corresponden a edificios ubicados en roca firme; un 20% están expuestas a PGA's de entre 0.16 y 0.18 g y el porcentaje restante (10%) a PGA's de entre 0.18 y 0.22 g. Estas instalaciones están ubicadas en suelos tipo C y E. Para periodos de retorno de 975 años, cerca del 70% de las instalaciones están expuestas a un PGA menor que 0.14 g y corresponden a edificios ubicados en roca firme. El porcentaje restante (30%) están expuestas a PGA's del orden de 0.18 g y 0.24 g y están ubicadas en suelos tipos C y E.

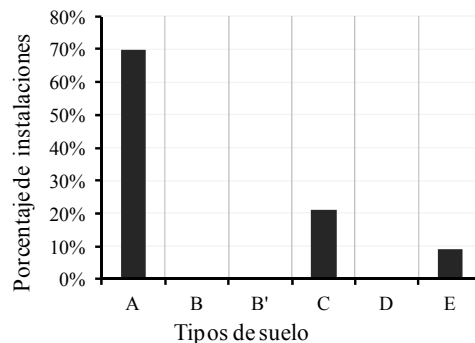


Figura 5-16 Porcentaje de instalaciones según tipos de suelo

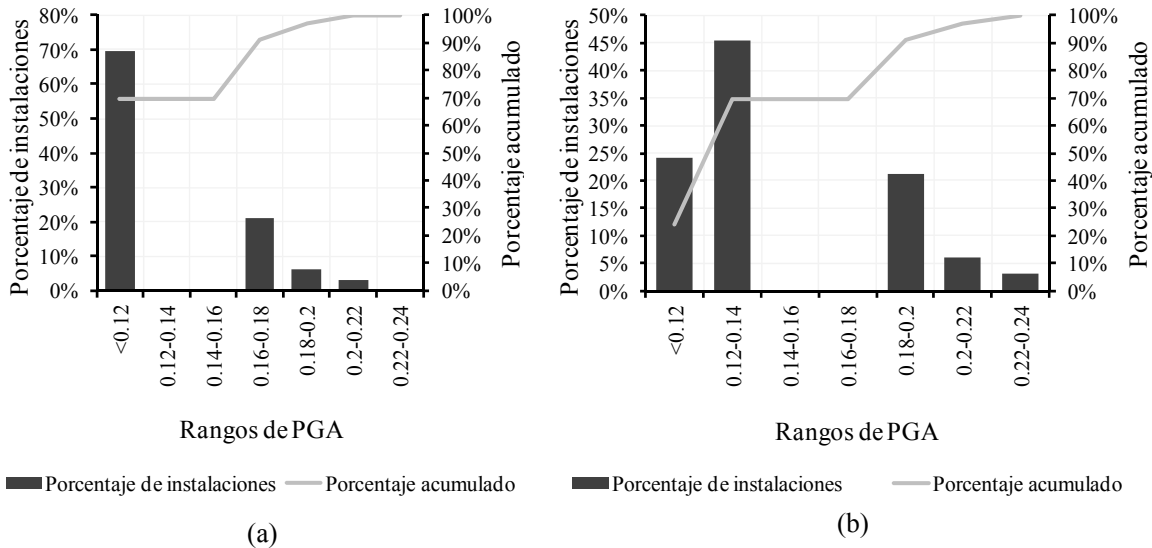


Figura 5-17 Porcentaje de instalaciones según rangos de PGA considerando el tipo de suelo

En la Figura 5-18 se presentan los valores máximos, mínimos y promedios de la aceleración básica en superficie, según tipologías estructurales. De esta Figura se encuentra que edificios de tipologías M3.1L, M3.1M, M3.3M, M3.4L (comunes en instalaciones de administración de gobierno, enseñanza, salud y personal de equipos de ayuda), W1 y S3L (comunes en instalaciones para espectáculos públicos), están expuestos a los mayores valores de aceleración: entre 0.175 g y 0.215 g para periodos de retorno de 475 años; entre 0.195 g y 0.235 g para periodos de retorno de 975 años. Estos edificios están ubicados en zonas de suelos tipo C o E.

Los edificios de tipología M1.2M, RC3.2L y S3L están expuestos en zonas tanto de roca como en suelos tipo C o E y por esta razón están expuestos a un rango de aceleraciones que varía entre 0.095g y 0.175g para periodos de retorno de 475 años. Las demás tipologías están expuestas a aceleraciones espectrales menores que 0.12g o 0.13g para periodos de retorno de 475 y 975 años, respectivamente. Estos edificios están ubicados en roca firme.

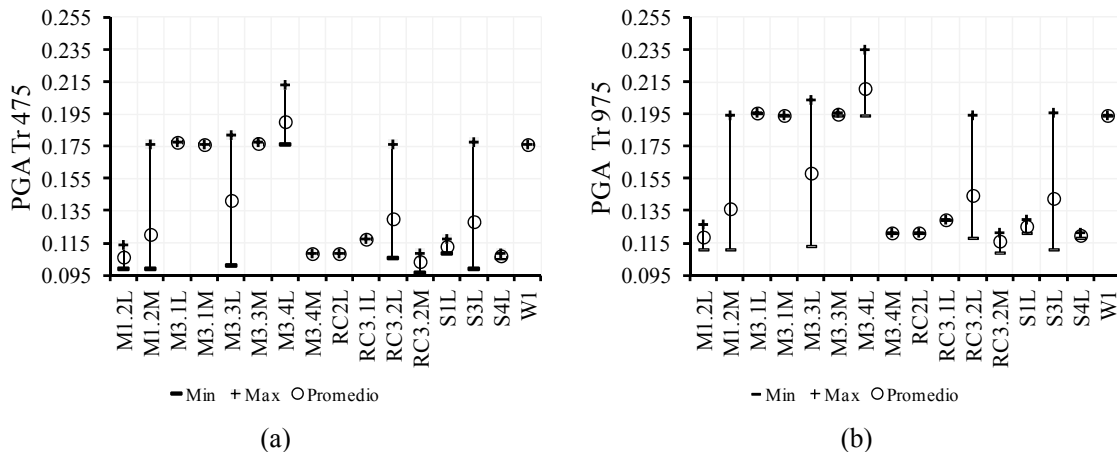


Figura 5-18 Valores máximos, mínimos y promedio del PGA (g) considerando el tipo de suelo y según tipologías (a), Tr= 475 años; (b), Tr= 975 años

En la Figura 5-19 se presenta para cada instalación, el PGA en roca y el PGA considerando el tipo de suelo, para un periodo de 475 años. De esta Figura es posible identificar las instalaciones que se encuentran expuestas a mayores valores de la acción sísmica.

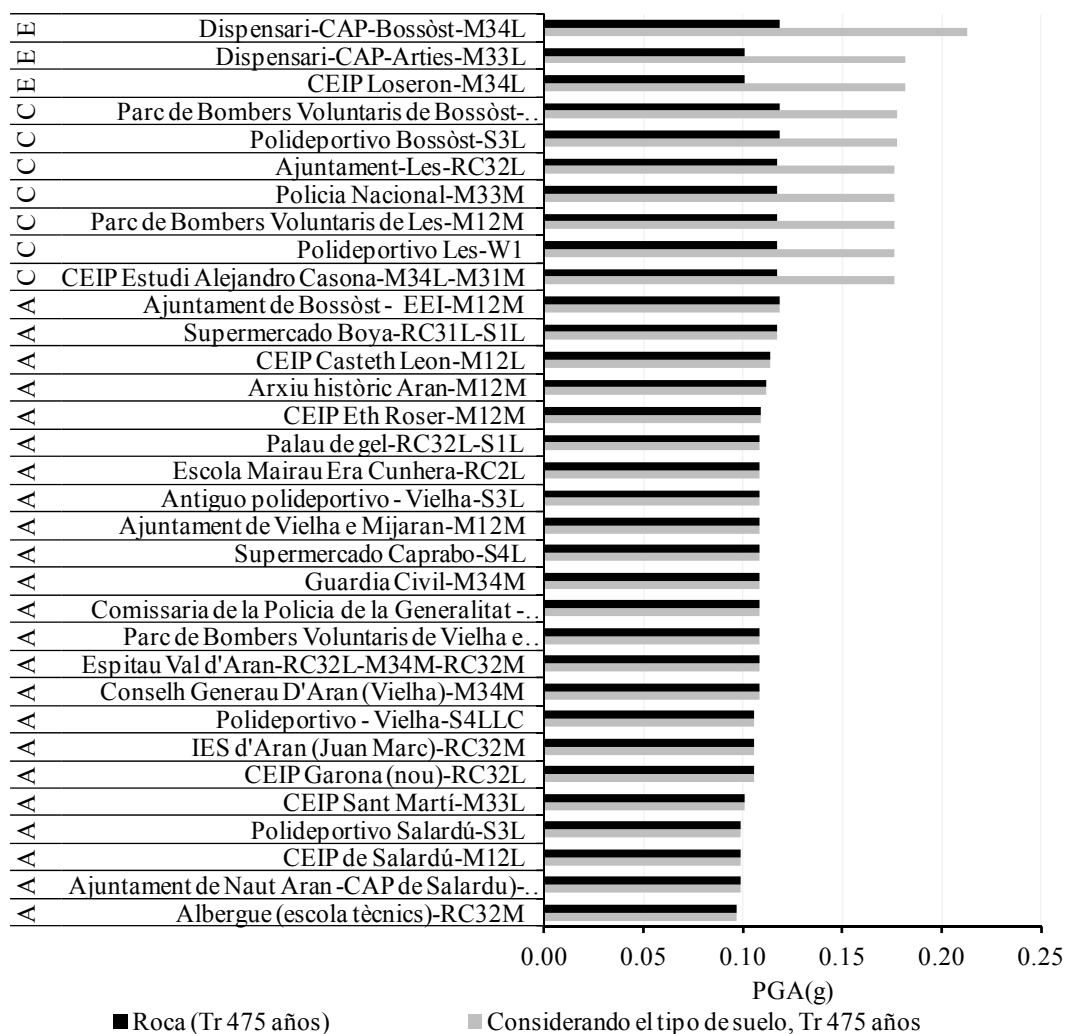
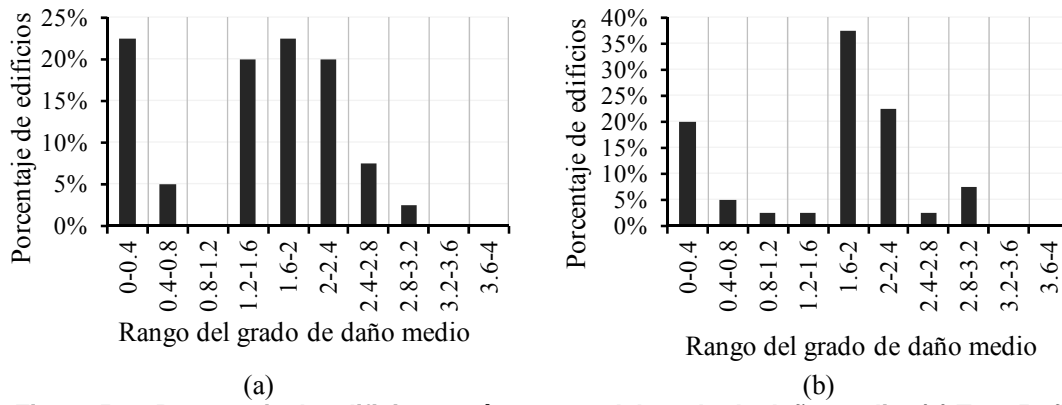


Figura 5-19 PGA en roca y considerando el tipo de suelo, Tr 475 años; para cada instalación

5.4.1 Evaluación del grado de daño y de la seguridad de los edificios

En la Figura 5-20 se presentan los porcentajes de edificios según rangos del grado de daño medio estimado para los periodos de retorno de 475 años (a) y 975 años (b). En esta Figura, se observa que para un periodo de 475 años, Cerca del 70% de los edificios tienen un grado de daño medio menor a 2, el cual representa el estado de daño moderado. Para los demás edificios, el daño varía entre 2 y 3.2 (entre moderado y extensivo). Al considerar los estándares de seguridad sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995) para un periodo de retorno de 475 años, los edificios esenciales deben tener un daño menor que moderado (nivel de comportamiento operacional). Así, los edificios con un grado de daño mayor que 2 no cumplen tal requisito.



**Figura 5-20 Porcentaje de edificios según rangos del grado de daño medio; (a) Tr 475 años; (b) 975 años**

De la Figura 5-20 (b) se observa que para un periodo de 975 años, cerca del 8% de los edificios tienen un grado de daño medio mayor a 2.8 o de 0.7 cuando se normaliza en el intervalo (0,1); éstos valores representan daños cercanos al estado de daño extensivo. Al considerar la escala de daño de Rosseto y Elnashai (2003) y los estándares de seguridad sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995) para un periodo de retorno de 975 años, estos edificios (el 8%) no cumplen con el requisito de seguridad de la vida.

El grado de daño se estimó para cada edificio inspeccionado. En el Anexo G se presenta para cada edificio una ficha descriptiva de la evaluación del comportamiento y daño de cada edificio. Dicha ficha incluye: el espectro de capacidad de la tipología correspondiente, el espectro de respuesta de acuerdo al PGA y tipo de suelo, el espectro de demanda, las coordenadas del punto de comportamiento, la evaluación de las curvas de fragilidad, de la matriz de probabilidad de daño y del grado de daño medio.

Cuando una instalación o servicio se compone de diferentes edificios, el daño medio en cada instalación se estimó promediando el daño de los edificios que lo componen. En la Figura 5-21 se presenta el grado de daño medio de cada instalación, así como el PGA considerando el tipo de suelo, para un periodo de retorno de 475 años (a) y 975 años (b). A partir de estos resultados es posible identificar las instalaciones que merecen especial atención de acuerdo al grado de daño medio esperado y a los estándares de seguridad establecidos para los periodos de retorno considerados.

Por otro lado, en la Figura 5-22 se presenta el grado de daño medio agrupado según el uso de las instalaciones (a) de salud; (b) enseñanza; (c) edificios de administración de gobierno y monumentos históricos; (d) edificios de personal y equipos de ayuda; (e) edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales. Esto permite revisar por sectores cuáles son los edificios que deben tener prioridad respecto a la gestión de su seguridad sísmica.

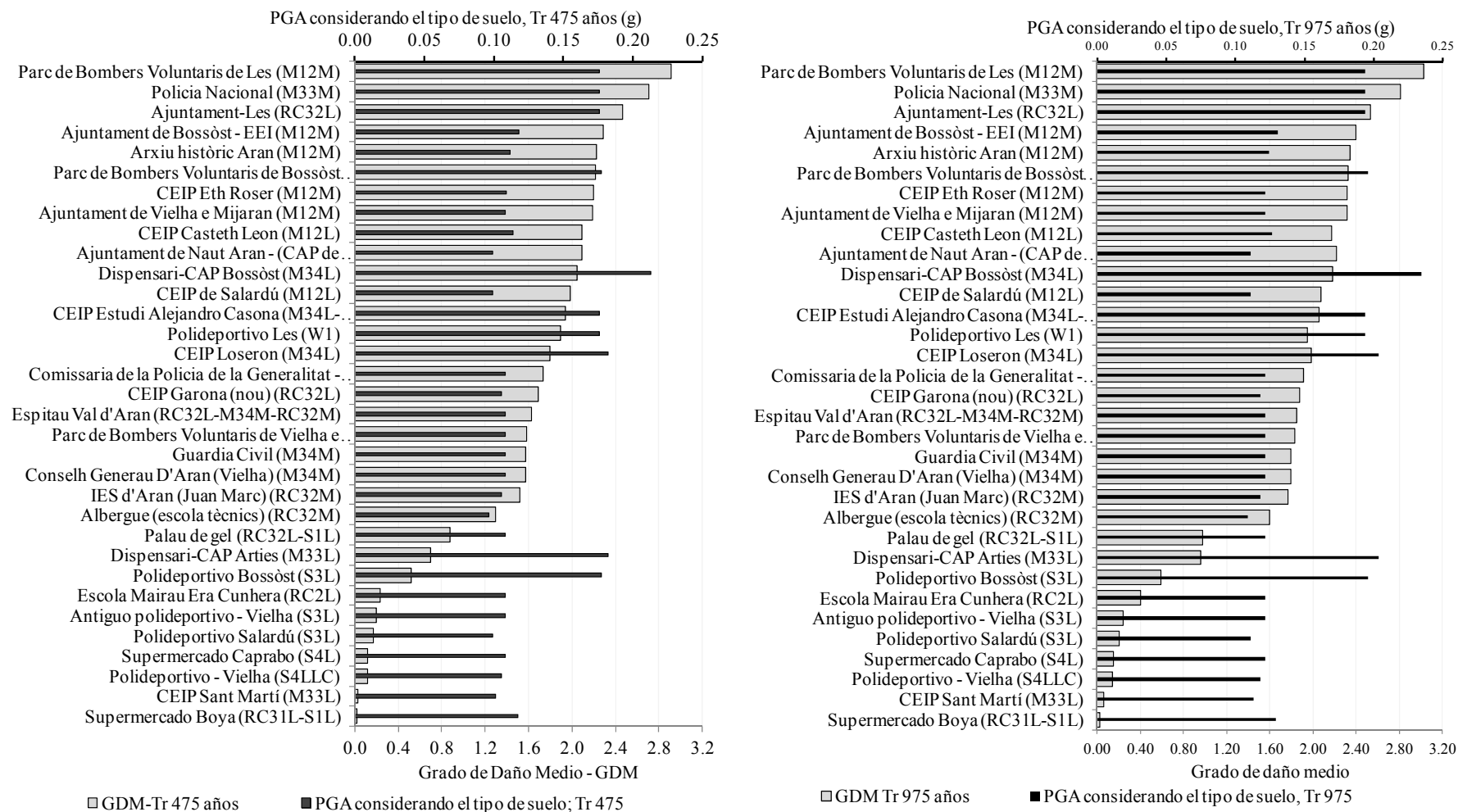
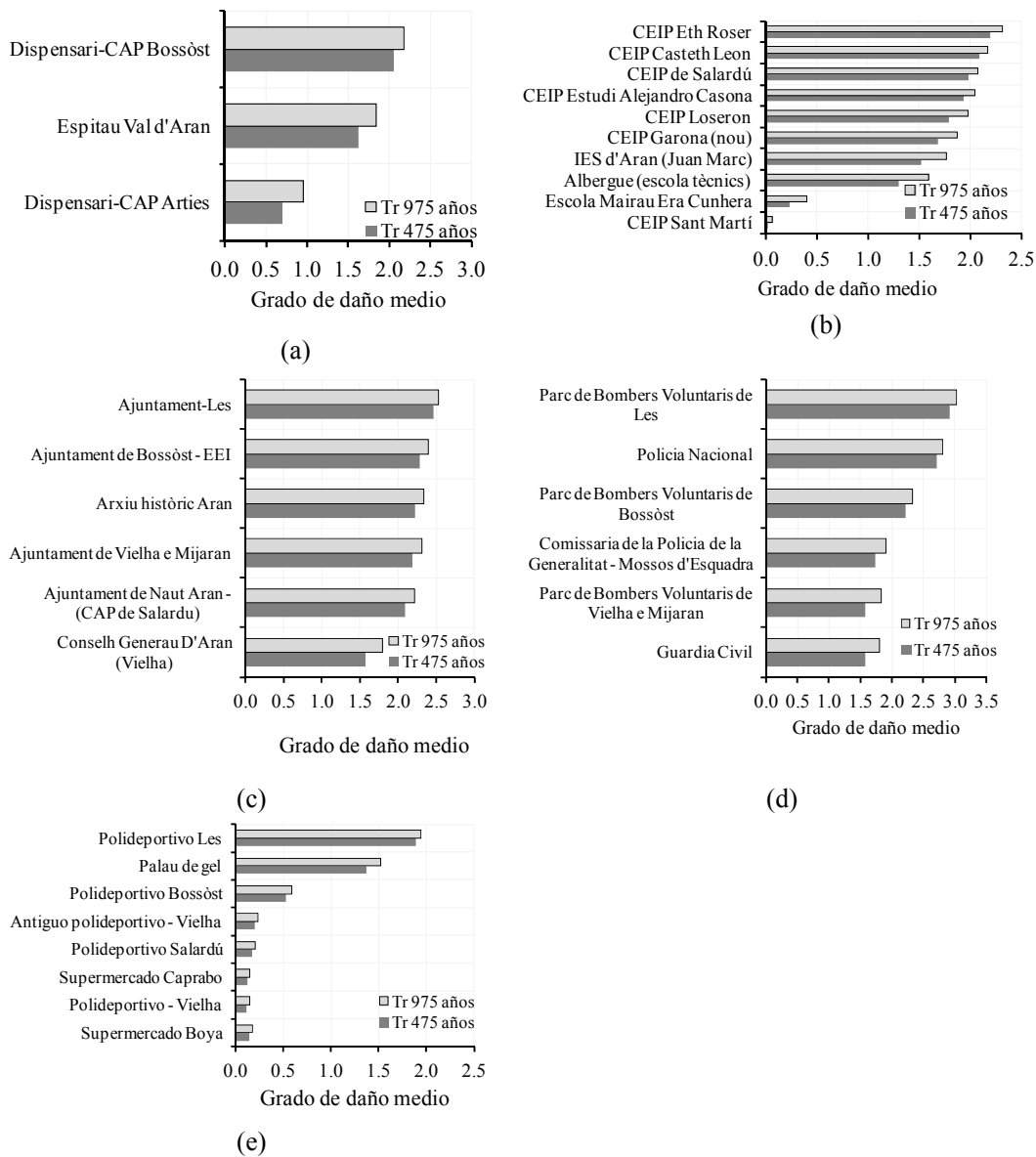
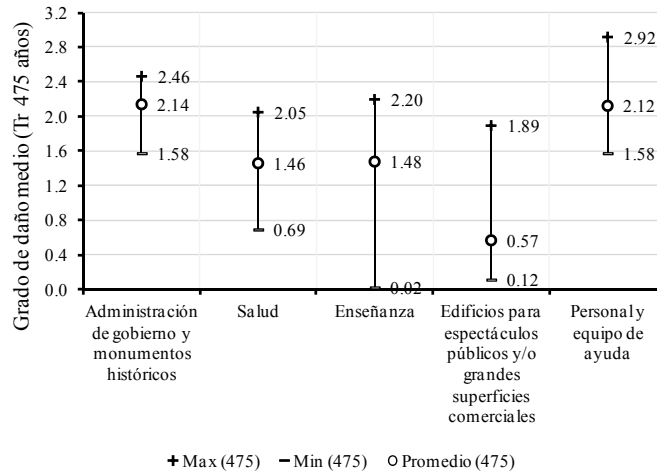


Figura 5-21 Grado de daño medio y PGA (considerando el tipo de suelo) según instalación (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años

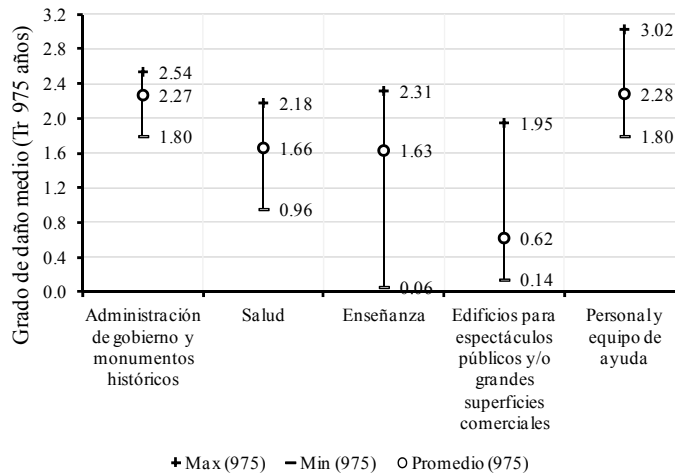


**Figura 5-22 Grado de daño medio en instalaciones según uso: (a) salud;(b) enseñanza; (c) edificios de administración de gobierno y monumentos históricos;(d) edificios de personal y equipos de ayuda;(e) edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales**

En la Figura 5-23 y en la Figura 5-24 se presentan los valores máximos, mínimos y promedio del grado medio de los edificios, agrupados según uso de las instalaciones y calculados para los periodos de retorno de 475 y 975 años, respectivamente. En estas figuras se observa que los daños son más altos en el sector de personal y equipos de ayuda. Daños similares se observan en los edificios de gobierno y monumentos históricos. En cuanto a la homogeneidad de los daños en los edificios según usos, se observa que los daños en los edificios de enseñanza, así como en los edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales son bastante heterogéneos. Por otro en el sector de gobierno y monumentos históricos, los daños de los edificios son más homogéneos y los índices de daño medio varían entre 1.58 y 2.46 para el escenario de 475 años de periodo de retorno y entre 1.8 y 2.54 para el caso del escenario de periodo de retorno de 975 años.



**Figura 5-23 Valores máximos y mínimos del grado de daño medio para los edificios según uso (Tr 475 años)**



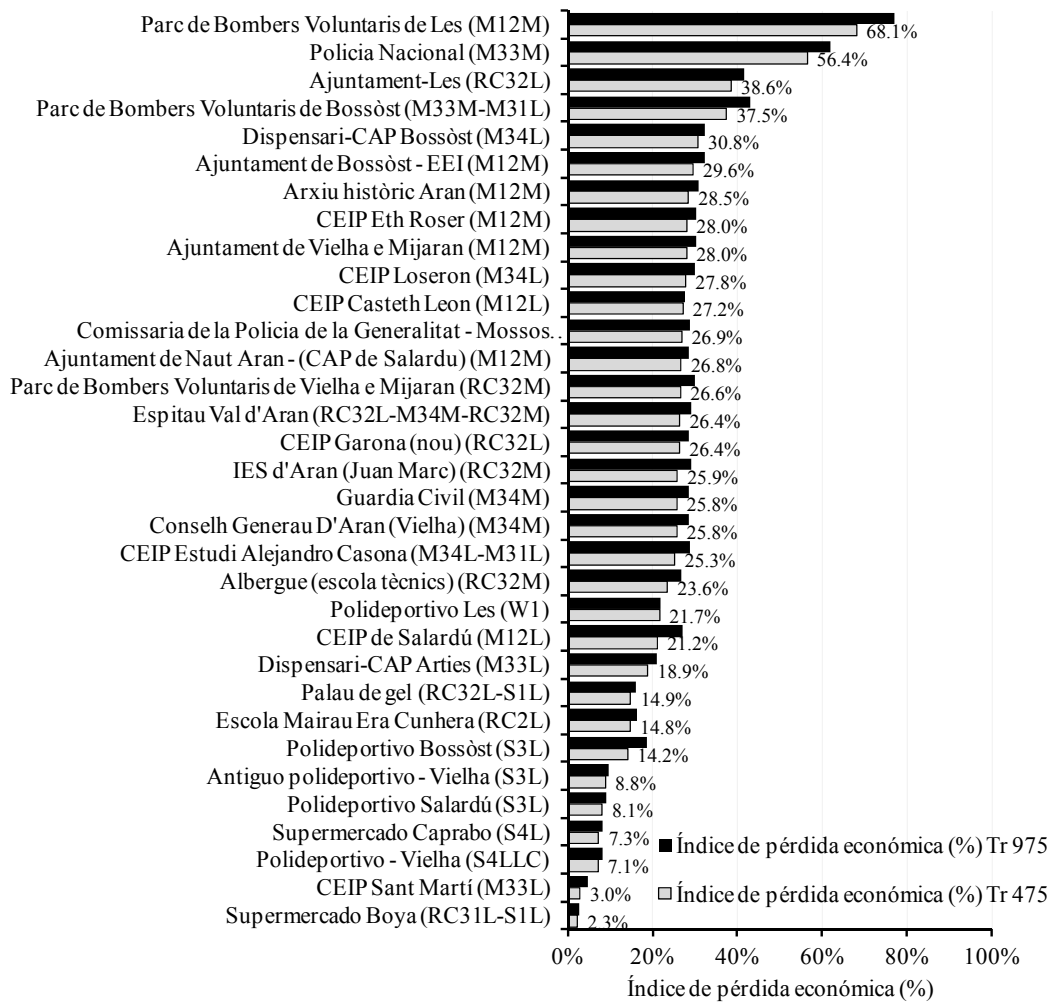
**Figura 5-24 Valores máximos y mínimos del grado de daño medio para los edificios según uso (Tr 975 años)**

#### 5.4.2 Índices de pérdida económica, de funcionalidad y periodos esperados de recuperación de servicios

Además del grado de daño medio, la priorización del análisis y reducción de la vulnerabilidad puede fundamentarse en criterios asociados con la pérdida económica, la pérdida de funcionalidad y el tiempo de recuperación de la infraestructura. Estos valores pueden estimarse siguiendo las metodologías presentadas en el Capítulo 4. Al respecto, en la Figura 5-25 se presenta el índice de pérdida económica estimado para cada instalación y periodo de retorno.

Las pérdidas económicas directas se estiman para cada edificio. Estas pérdidas se calculan a partir de la matriz de probabilidad de daño y de los valores de la pérdida en porcentaje asociados a cada estado de daño (ver Capítulo 4). Para cada instalación se suman las pérdidas económicas de cada uno de los edificios que los componen. Así, el índice de pérdida (de cada instalación) se obtiene dividiendo dicha suma por el valor de reposición de los edificios. De la Figura 5-25 se observa que el mayor índice de pérdida económica es cercano al 68% del valor de reposición del edificio para periodos de retorno de 475 años. Para el conjunto de edificios, el valor promedio del índice de pérdida económica es cercano al 25%.





**Figura 5-25 Índice de pérdida económica**

En forma similar, el índice de funcionalidad se estimó para cada edificio, considerando los resultados del grado de daño medio y los criterios de comportamiento sugeridos en el documento FEMA 396 (2003), tal como se describe en el Capítulo 4. El índice de funcionalidad de cada instalación se obtuvo promediando el índice de funcionalidad de los edificios que lo componen.

En la Figura 5-26 se presenta el Índice de funcionalidad estimado para cada instalación. En esta Figura se observa que a pesar de que el daño estimado es moderado, la funcionalidad de los edificios se reduce considerablemente. Este resultado está relacionado con los niveles de comportamiento asociados a edificios de especial importancia. Según la evaluación del grado de daño medio para periodos de retorno de 475 años, cerca del 35% de los edificios tienen un daño mayor o igual a 2 (daño moderado) y por lo tanto no cumplen el nivel de seguridad de ocupación inmediata. Por esta razón, su funcionalidad se espera que sea reducida. En la Figura 5-27 se presenta el porcentaje de instalaciones según rangos del índice de funcionalidad. En esta Figura se observa que cerca del 50% tienen un índice de funcionalidad menor a 0.5.

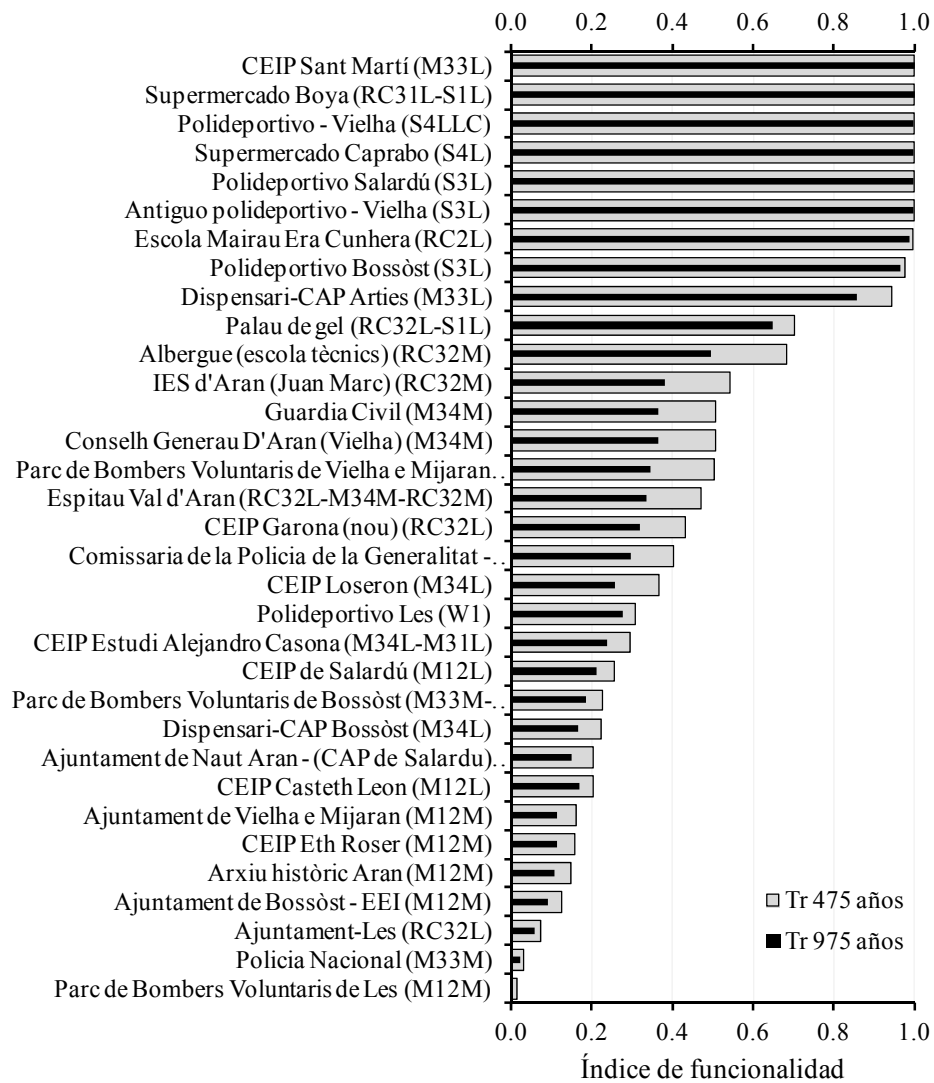


Figura 5-26 Índice de funcionalidad

Nota: 1 significa plena funcionalidad; 0 indica pérdida total de su función.

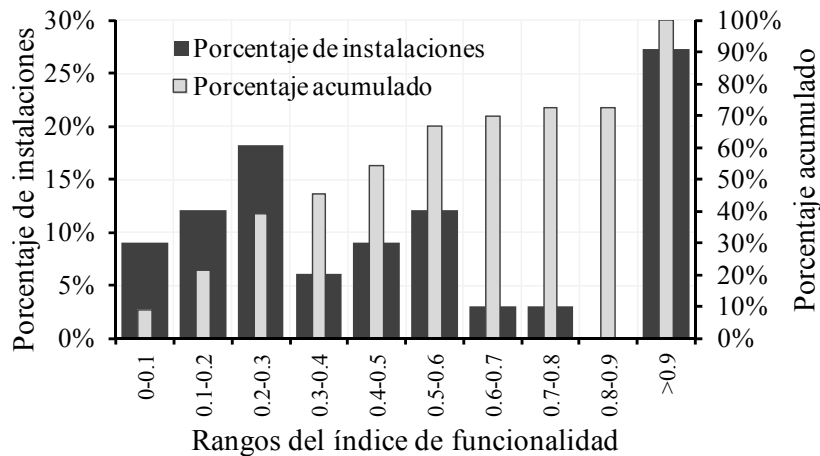


Figura 5-27 Porcentaje de instalaciones según rangos del índice de funcionalidad (Tr 475 años)

El tiempo esperado de recuperación se estimó para cada edificio, siguiendo una relación entre el grado de daño medio y los periodos de recuperación planteados en el documento FEMA 227 (FEMA 1992), tal como se describe en el Capítulo 4. Para instalaciones con más de un edificio, el tiempo de recuperación se estimó promediando los resultados de los edificios que lo componen.

En la Figura 5-28 se presenta el tiempo de recuperación estimado para cada instalación. En la Figura 5-29 se presentan el porcentaje de instalaciones según rangos del tiempo de recuperación para periodos de retorno de 475 años. De estas Figuras se observa que cerca del 60% de las instalaciones tienen un periodo de recuperación entre 0 y 150 días. Cerca del 35% tienen un periodo de recuperación entre 150 y 200 días. Alrededor del 5% tienen un periodo de recuperación mayor a 200 días.

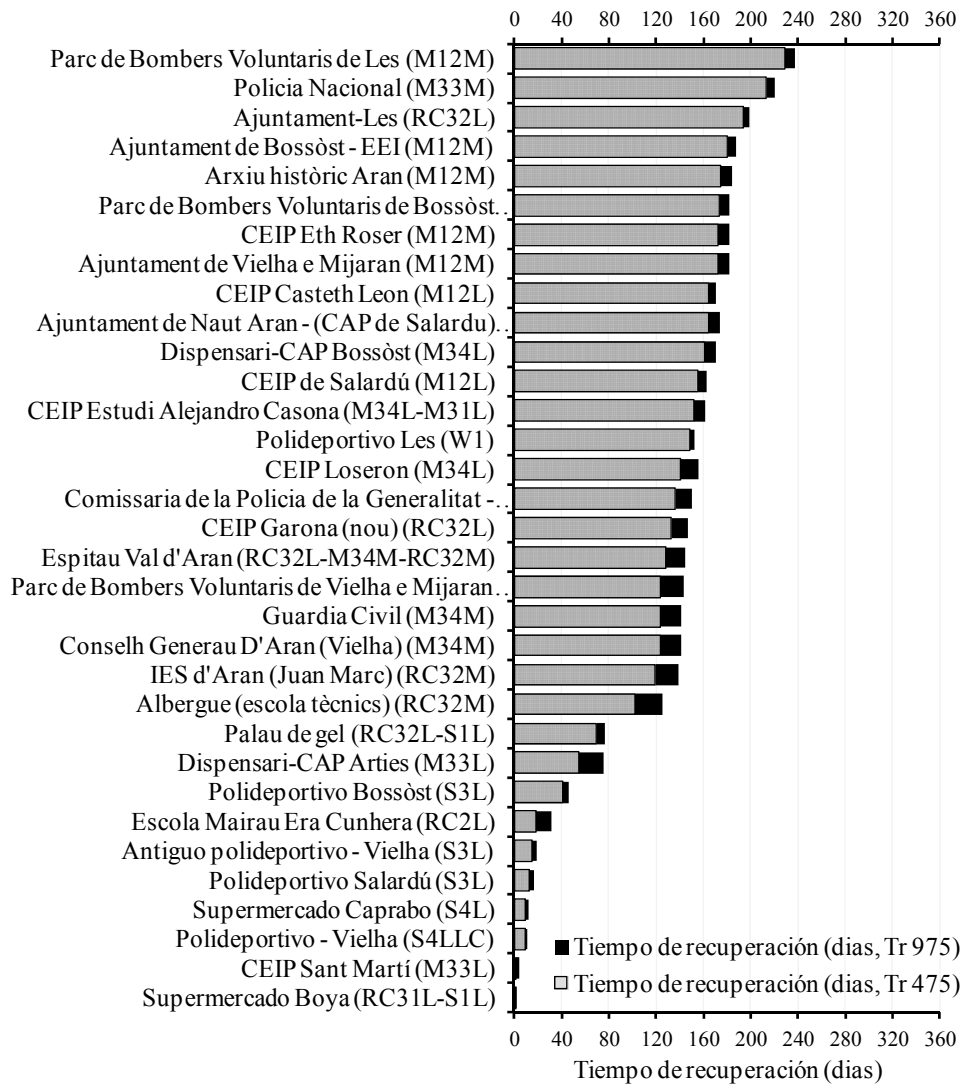


Figura 5-28 Tiempo de recuperación

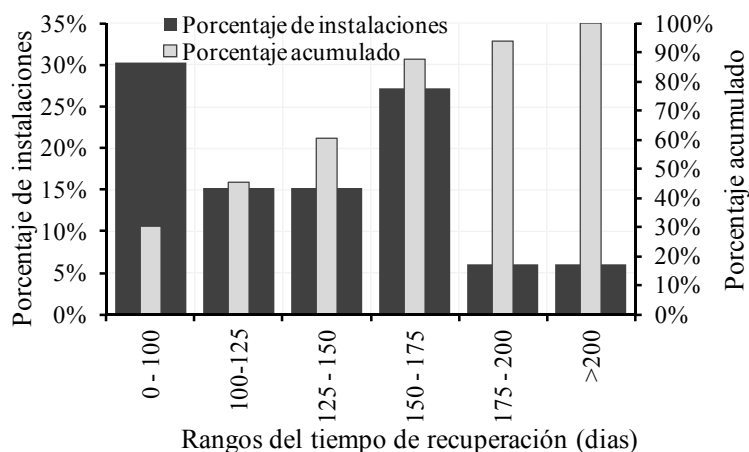


Figura 5-29 Porcentaje de instalaciones según rangos de recuperación (Tr 475 años)

## 5.5 Resumen y discusión

En este Capítulo se han presentado los resultados de la evaluación de la seguridad de edificios de importancia especial del Valle de Arán. Para esta evaluación, se llevaron a cabo inspecciones visuales rápidas en una muestra significativa de edificios de salud, de enseñanza, de personal y equipos de ayuda, de edificios para espectáculos públicos y/o grandes superficies comerciales, de administración de gobierno y monumentos históricos. En estas inspecciones se recolectó información general de las instalaciones en cuanto a su ubicación y funciones, así como datos relacionados con su tipología estructural y otros detalles estructurales. Para las inspecciones se usaron y adaptaron los formularios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales y centros educativos desarrollados por la UPC en conjunto con el IGC.

De los resultados de la inspección, se concluye que el 20% son estructuras de muros de piedra, cerca del 32.5% de muros de mampostería no reforzada, 27.5% de edificios de hormigón armado y 17.5% de edificios metálicos. Los edificios restantes (2.5%) son estructuras de madera. Aproximadamente el 76% de los edificios no tienen más de tres niveles sobre rasante; por esta razón, la mayoría se clasifica como edificios bajos.

Cerca del 42% de los edificios, en especial escuelas de educación primaria y ayuntamientos, fueron construidos antes de 1962 sin requerimientos sismoresistentes. Dado que antes del año 2002 las normativas sísmicas se consideraban como recomendaciones, o no se consideraban de obligatorio cumplimiento para algunos municipios del Valle de Arán, no se puede afirmar que los edificios construidos hasta dicho año (cerca del 37%) tengan requerimientos sismoresistentes. Sólo el 11% de los edificios han sido construidos con posterioridad al 2002, por lo tanto se espera que incorporen en su diseño los requerimientos de la norma NCSE-02. Si bien los edificios en su mayoría han tenido modificaciones durante su vida útil, estas no se han desarrollado para reducir su vulnerabilidad sísmica. Así, no se han presentado casos de intervenciones estructurales que actualicen la seguridad de los edificios a los requerimientos de las normativas de construcción más recientes.

En cuanto a otros detalles estructurales, cerca del 50% de los edificios tienen plantas rectangulares, en los cuales se considera que su irregularidad es baja; alrededor del 32% se califica con irregularidad en planta media y el 18% restante con alta. Respecto a la irregularidad en altura, el 60% se calificó con irregularidad baja, el 20% con irregularidad media y el 20% con alta. En relación a la posibilidad de golpeteo, se observa que la mayoría de los edificios no presentan esta deficiencia debido a que se encuentran aislados o lo suficientemente separados de los edificios contiguos. En el caso de edificios de pilares y forjados, sólo se identificaron dos casos de posible desarrollo de pilares cortos.

De la clasificación de los edificios según su uso y tipologías estructurales, se concluye que los edificios para espectáculos públicos y/o grandes centros comerciales son estructuras de pórticos metálicos o de pilares y forjados de hormigón armado. Los edificios de enseñanza, al igual que los de administración de gobierno y de personal de ayuda, son en su mayoría de muros de mampostería y de piedra; las escuelas más recientes y de mayor número de alumnos tienen estructura de pilares y forjados de hormigón armado. En el caso de los edificios de salud, hay estructuras de hormigón armado y de mampostería.

En cuanto a la peligrosidad sísmica, para periodos de retorno de 475 años, cerca del 65% de los edificios están expuestos a valores de PGA entre 0.1 y 0.11 g. El porcentaje restante están expuestos a valores de PGA que varían entre 0.11 y 0.12 g. Para periodos de retorno de 975 años, menos del 5% de los edificios están expuestos a valores de PGA entre 0.1 y 0.11g; cerca del 30% de los edificios están expuestos a valores de PGA entre 0.11 y 0.12. El resto de los edificios (cerca del 65%) están expuestos a PGA's entre 0.12g y 0.13g.

Para estimar la acción sísmica considerando efectos de sitio, se adoptaron las formas espectrales del Eurocódigo 8 (tipo II) de acuerdo con los resultados de un estudio de mesozonación realizado en Cataluña (GEOTER 2008). Cerca del 70% de las instalaciones se encuentran en roca firme (suelo tipo A), Un 20% en suelo tipo C y un 10% en suelo tipo E. Los edificios ubicados en suelos distintos a roca firme están expuestos a PGA's que varían entre 0.16 g y 0.22 g para periodos de retorno de 475 años. Para periodos de retorno de 975 años, los edificios están expuestos a valores de PGA's de entre 0.18 g y 0.24 g.

Una vez conocidas los espectros de capacidad y los espectros de demanda correspondientes a cada edificio, el daño esperado se evaluó siguiendo el método simplificado de espectros de capacidad propuesto en el proyecto RISK UE. Considerando un periodo de retorno de 475 años, cerca del 70% de los edificios tienen un grado de daño medio menor a 2, el cual representa el estado de daño moderado. Para los demás edificios, el daño varía entre 2 y 3.2 (entre moderado y extensivo). Al considerar los estándares de seguridad sugeridos por el Comité VISION 2000 para un periodo de retorno de 475 años, los edificios esenciales deben tener un daño menor que moderado (nivel de comportamiento operacional). De esta manera, los edificios con un grado de daño medio mayor que 2 (cerca del 30%) no cumplen tal requisito.

Para el análisis del escenario con un periodo de retorno de 975 años, se ha estimado que cerca del 8% de los edificios tienen un grado de daño mayor a 2.8, cercano al estado de daño extensivo. Al adoptar los estándares de seguridad sugeridos por el Comité VISION 2000 (SEAO 1995) para un periodo de retorno de 975 años, se considera que este porcentaje de edificios no cumplen con el nivel de comportamiento de seguridad de la vida.

De la comparación de los valores del grado de daño medio esperado entre los diferentes tipos de edificios, se observó que las instalaciones de personal y equipos de ayuda, así como los edificios de gobierno y de patrimonio histórico, son los que tienen, en conjunto, mayores daños esperados.

Como complemento al análisis de seguridad, se realizaron estimaciones del índice de pérdida económica, del índice de funcionalidad y del tiempo de recuperación estimado de acuerdo a los daños esperados del edificio. De estos resultados se concluye que el promedio de las instalaciones, para un periodo de retorno de 475 años, tienen un índice de pérdida económica del 25% de su coste de reposición. En cuanto a su funcionalidad, se observa que se cerca del 50% tienen un índice de funcionalidad menor a 0.5. Por último, cerca del 60% de las instalaciones tienen un periodo de recuperación entre 0 y 150 días. Cerca del 35% tienen un periodo de recuperación entre 150 y 200 días. Alrededor del 5% tienen un periodo de recuperación mayor a 200 días

Así, los resultados del análisis del grado de daño medio esperado, la evaluación de la seguridad de los edificios y las estimaciones de pérdidas económicas, pérdidas de funcionalidad y tiempos de recuperación pueden permitir establecer prioridades para el análisis y reducción de la vulnerabilidad de acuerdo a los daños estimados y a los requisitos de seguridad adoptados. En este sentido, destacan los edificios del Parque de bomberos de Les y el edificio de la Policía Nacional, que son los que muestran un comportamiento sísmico más problemático.



## **6 Evaluación de la seguridad sísmica de centros educativos de Cataluña**

### **6.1 Introducción**

La gestión de la infraestructura educativa está afectada por aspectos como la población en edad escolar (la demanda), las necesidades educativas, las políticas en educación y el presupuesto disponible. En zonas expuestas al peligro sísmico, también es necesario verificar su seguridad sísmica. En Cataluña (España), entre 1990 y 2001 se desarrollaron 604 proyectos de centros de educación pública. La inversión total fue alrededor de 736 millones de euros (Generalitat de Catalunya, Departament d'Ensenyament, 2003). Durante este periodo, se han desarrollado guías para la construcción de nuevas instalaciones educativas en las cuales se definen los estándares de calidad en cuanto a criterios urbanísticos, al diseño arquitectónico y a otros criterios económicos y de sostenibilidad. En cuanto a las técnicas de construcción, la mayoría de las nuevas instalaciones fueron construidas usando sistemas industrializados, como pilares y vigas de hormigón prefabricado, muros de hormigón prefabricado y estructuras metálicas, dadas sus ventajas económicas.

Estas tipologías estructurales han sido seleccionadas de acuerdo a la estimación de los costos totales de las instalaciones, tomando en cuenta los costos esperados de mantenimiento durante la vida útil del proyecto (Generalitat de Catalunya, Departament d'Ensenyament, 2003). En este sentido, Pons (2009) resalta que el uso de sistemas industrializados satisface los requisitos de construcción y ampliación de los centros educativos para solucionar la falta de plazas escolares, bajo las restricciones de tiempo y costos.

La inclusión de los costos de mantenimiento representa el valor social y económico de las instalaciones educativas y permite una adecuada administración de la infraestructura. Un crecimiento sistemático de las inversiones, sin una clara previsión de los fondos requeridos para mantener la infraestructura, concluiría en un deterioro progresivo de las instalaciones (Generalitat de Catalunya, Departament d'Ensenyament, 2003).

Sin embargo, la seguridad sísmica no se incluye específicamente. Por esta razón, es interesante introducir en el análisis de costos durante la vida útil del proyecto, los valores esperados de las pérdidas económicas, así como los efectos en sus ocupantes, dada la ocurrencia probable de eventos sísmicos. Este tipo de análisis han sido desarrollados por Smyth et al. (2004), López et al. (2007) y Murachi et al. (2010) con el fin de identificar los beneficios y los costos de la seguridad de las escuelas, tomando en cuenta los costos de construcción, las pérdidas directas, indirectas y personas heridas, esperadas o probables en caso de terremoto.

Actualmente, entre los objetivos del programa Europeo SISPyR (Interreg IVA 2007-2013, Francia-España-Andorra), se encuentra el estudio de escenarios de riesgo sísmico, en los que se incluye el análisis de la seguridad de edificios esenciales. Para este fin se emplea un método simplificado basado en espectros de capacidad, de acuerdo a los procedimientos propuestos en el proyecto RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski, 2003) y descritos en el Capítulo 4. En este contexto, este capítulo presenta la evaluación de la seguridad de un conjunto de centros educativos de Cataluña. En el análisis se incluye un grupo de escuelas construidas con sistemas industrializados. También se considera un grupo de centros educativos ubicados en las capitales de comarca de la Provincia de Girona, así como en diversos municipios de Val d'Aran.

Como punto de partida, se consultó la evolución de la arquitectura escolar en Cataluña durante el siglo XX, con el fin de identificar a nivel general, las técnicas constructivas, la tipología de edificios, su distribución en el territorio, así como las dimensiones y capacidad de los centros educativos de acuerdo con las directrices vigentes para la construcción de esta infraestructura. Estos aspectos se encuentran en el Anexo D. Por otro lado, se realizaron inspecciones visuales rápidas, así como revisiones de planos arquitectónicos y estructurales, memorias de cálculo y fotos, entre otros documentos, con el fin de identificar las principales propiedades estructurales de los centros incluidos en el estudio.

A partir de estos datos, los centros de enseñanza se clasificaron en tipologías estructurales empleando los formularios de evaluación de la vulnerabilidad de centros educativos, elaborados por la Universidad Politécnica de Cataluña en conjunto con el Instituto Geológico de Cataluña. Como resultado, se obtuvieron los datos suficientes para realizar análisis aproximados de la seguridad de un conjunto de escuelas siguiendo un método simplificado basado en espectros de capacidad. Vale la pena observar que estas metodologías también fueron aplicadas a la evaluación de escenarios de daños de edificios residenciales y patrimoniales en la ciudad de Barcelona (Irizarry et al. 2010, Lantada et al. 2009). En el Anexo H se presenta un resumen de la información obtenida, los formularios rellenos para cada instalación y un listado de centros educativos construidos con sistemas industrializados.

De forma análoga a lo realizado en el capítulo anterior, la evaluación de la seguridad de los edificios se lleva a cabo mediante la comparación entre el daño esperado y el comportamiento esperado para edificios esenciales, de acuerdo a los requisitos propuestos en el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995). Además, se estiman las pérdidas económicas esperadas con el fin de disponer de una herramienta que permita definir prioridades para las políticas de reducción de vulnerabilidad. Los resultados de este trabajo contribuyen también a la actualización del Plan Especial de Emergencias SÍSMICAS en CATaluña SISMICAT (Chavez et al. 1999, Susagna et al. 2006).

### 6.1.1 Organización del sistema educativo en Cataluña

Administrativamente, la organización territorial de Cataluña consta de 41 Comarcas y 948 municipios. La superficie es de 32107 km<sup>2</sup> y tiene una población estimada a 2010 de 7475420 habitantes, con una densidad de 232.83 hab/km<sup>2</sup>. La población en edad escolar (3 a 16 años) es de 1000055 habitantes. Hay 2221 centros escolares públicos de educación infantil, 1568 de educación primaria, 487 de Educación Secundaria Obligatoria, 450 de bachillerato, 225 de formación profesional de grado medio y 179 de formación profesional de grado superior (Idescat 2010).

El Departament d'Ensenyament del Gobierno de la Generalitat es el organismo encargado de la administración de la enseñanza en Cataluña. Dentro de sus funciones está la actuación en materia de ordenación curricular e innovación del sistema educativo, la dirección y evaluación de los centros públicos, la planificación de la oferta educativa, entre otras. Territorialmente, el Departament d'Ensenyament se divide en Servicios territoriales (ver Figura 6-1). Estos deben ejecutar las directrices del Departament. Entre sus funciones se encuentra supervisar las obras de construcción, de mejora y de remodelación de los centros de titularidad del departamento.

Actualmente, la enseñanza en Cataluña se clasifica en los siguientes niveles:<sup>25</sup>

<i>Educació infantil</i>	Se organiza en dos ciclos (de 0 a 3 años y de 3 a 6 años), siendo el segundo gratuito
<i>Educació primària</i>	Consta de tres ciclos (inicial, medio y superior) con dos cursos cada uno, que se hacen entre los 6 y los 12 años
<i>Educación secundaria obligatoria (ESO):</i>	Consta de cuatro cursos, que se hacen entre los 12 y los 16 años. Hay programas de diversificación curricular a partir del tercer curso, que están orientados al título de graduado en ESO
<i>Bachillerato</i>	Consta de dos cursos y se organiza en tres modalidades: 1) artes, 2) ciencias y tecnología y 3) humanidades y ciencias sociales. El título de bachillerato da acceso a la educación superior.
<i>Formación profesional</i>	La formación profesional se estructura en ciclos formativos de grado medio (CFGM) y en ciclos formativos de grado superior (CFGS) que permiten tener los títulos de técnico y técnico superior

---

<sup>25</sup> Ver: Sistema Educativo en Cataluña [En línea]. Disponible en: [http://www20.gencat.cat/docs/canaleducacio/Home/Orientat/Utilitats/Itineraris/%20formatius/pdf/sistema\\_educativo.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/canaleducacio/Home/Orientat/Utilitats/Itineraris/%20formatius/pdf/sistema_educativo.pdf) [Última consulta 09/11/2012].





Figura 6-1 Mapa de servicios territoriales del Departament d'Ensenyament

Como referencia a la demanda de plazas escolares, en la Tabla 6-1 se presenta el número de alumnos según nivel de educación, en centros públicos. En la Figura 6-2 se presenta el número de alumnos en los niveles de infantil (a), primaria (b) y ESO (c).

Tabla 6-1 Número de alumnos según nivel de educación

infantil	Primaria	Educación Secundaria Obligatoria	Bachillerato	Secundaria Centros de Formación Grado Medio	Centros de Formación Grado Superior
210582	279357	166623	54370	33798	30723
Total: 775.453					

Fuente Idescat (2010)

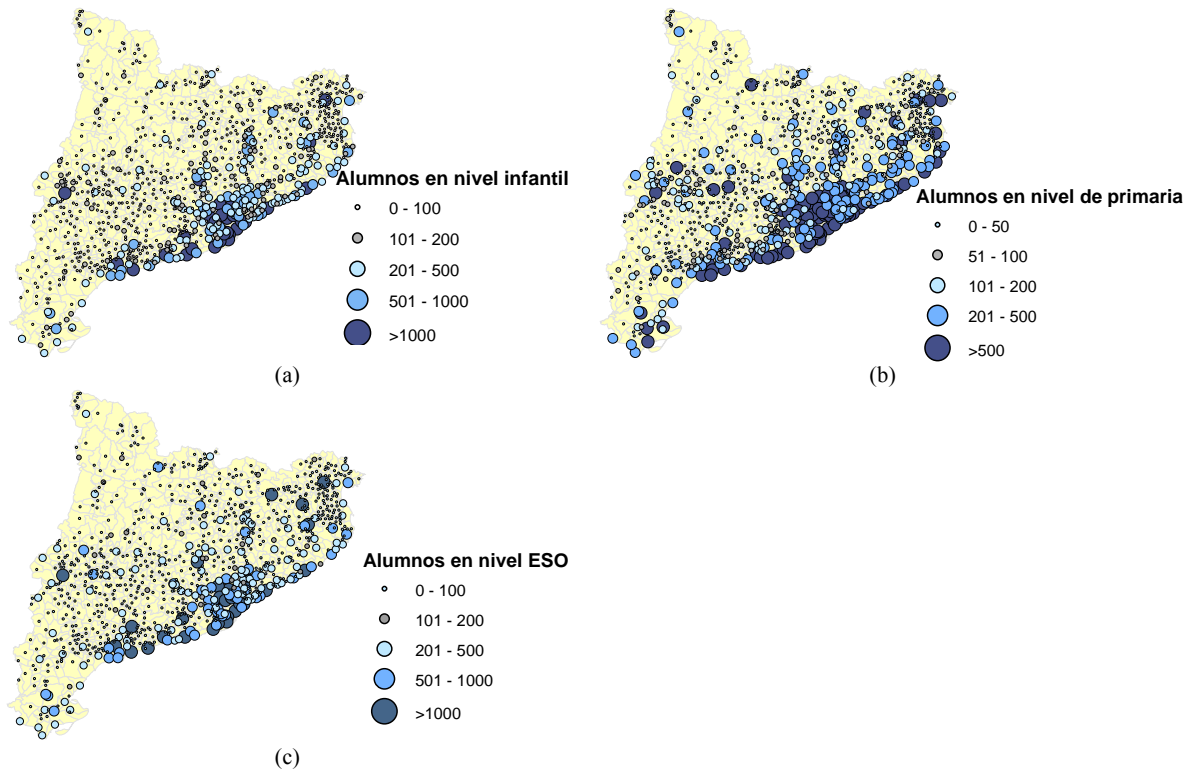
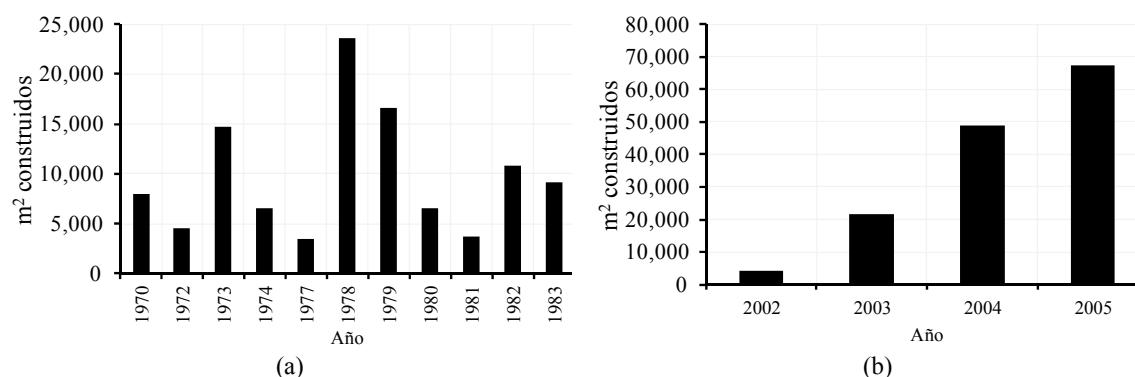


Figura 6-2 Alumnos según nivel de instrucción en cada municipio

## 6.2 Descripción de los centros educativos incluidos en el análisis

### 6.2.1 Centros educativos construidos con sistemas industrializados

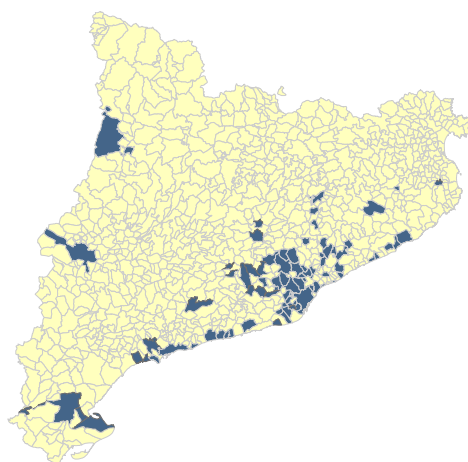
En este grupo de instalaciones se incluye un conjunto de centros educativos construidos con sistemas industrializados y que son descritos en Pons (2009). Contiene un total de 68 centros educativos construidos entre 1970 y 1983, así como 70 centros construidos entre 2002 y 2006. Para cada centro se cuenta con información del año de construcción, la superficie, el programa, la empresa promotora y constructora, su ubicación, volumetría, el sistema constructivo, las partes prefabricadas, las partes montadas y el estado actual. La evolución de la construcción de estas escuelas se presenta en la Figura 6-3.



**Figura 6-3 Evolución de la construcción de centros escolares con sistemas industrializados: (a) entre 1970 y 1983; (b) entre 2002 y 2006**

Fuente (Pons 2009)

En la Figura 6-4 se presentan los municipios en los cuales se ubican los Centros de Educación Infantil y Primaria (CEIP), que fueron construidos con sistemas industrializados y que se incluyen en este análisis. En esta figura se observa que estos edificios están concentrados en la Provincia de Barcelona y en municipios cercanos a la costa. Según Pons (2009), estas escuelas se construyeron de acuerdo a la estrategia del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) entre 1970 y 1983, así como la del Departament d'Ensenyament, según la falta de plazas escolares, o en dónde se había previsto su necesidad.



**Figura 6-4 Municipios de Cataluña en los que se han construido centros escolares con sistemas industrializados**

(Adaptado de Pons, 2009)

En cuanto a la volumetría de las escuelas, Pons (2009) las clasifica en 7 grupos para las construidas durante la primera etapa y en once para las de la segunda etapa (ver Tabla 6–2). De esto se observa que los edificios son estructuras con configuraciones en planta en su mayoría irregulares, compuestas en su mayoría por varios bloques.

**Tabla 6–2 Tipos de volumetría de las escuelas de la muestra**

Volumetría	Etapa 1 : 1970-1983				Etapa 2: 2002-2006			
	Número	Área (m <sup>2</sup> )	% (escuelas)	% (área)	Número	Área (m <sup>2</sup> )	% (escuelas)	% (área)
Rectangular	42	40.206	61,8%	38%	5	8.491	7,4%	8%
Rectangular (con cortes)					16	23.918	23,5%	22%
Planta en forma de U	13	36.237	19,1%	34%	9	28.118	13,2%	26%
Planta en forma de doble H	8	17.730	11,8%	17%	3	8.980	4,4%	8%
Planta en forma de T	2	5.253	2,9%	5%	6	9.448	8,8%	9%
Planta en forma de H	1	2.561	1,5%	2%	8	20.450	11,8%	19%
Planta en forma de cruz	1	2300	1,5%	2%			0,0%	0%
Planta en forma de L	1	2.431	1,5%	2%	15	38.760	22,1%	36%
Planta en forma de E					1	2.034	1,5%	2%
Planta en forma de F					2	6.457	2,9%	6%
2 Planta en forma de Z					2	3.925	2,9%	4%
Planta irregular					3	10.701	4,4%	10%
Totales	68	106.718	100	100	70	161.282	100	100

*Fuente (Pons 2009)*

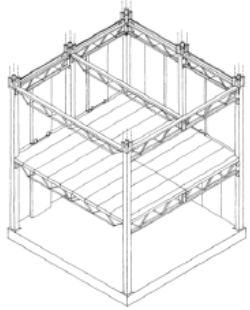





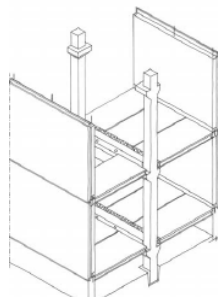
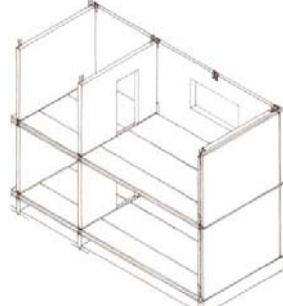
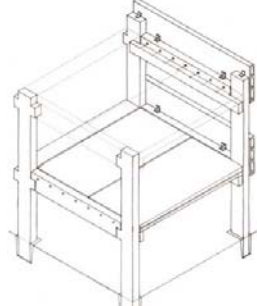

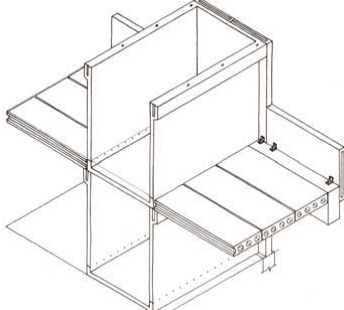
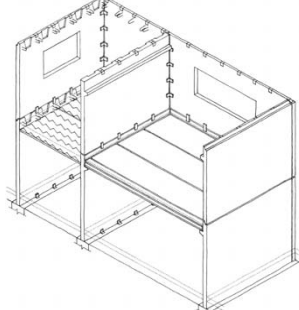
Por otro lado, Pons (2009) clasifica los centros seleccionados en 12 sistemas constructivos de acuerdo a los materiales empleados, la estructura y el tipo de cerramientos. En la Tabla 6–3 se presenta el conjunto de sistemas y en la Figura 6-5 se presentan esquemas que permiten identificar sus principales características.

Esta clasificación de los centros escolares industrializados es útil para la evaluación de su seguridad ya que permite seleccionar las tipologías estructurales de los proyectos RISK UE y/o HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003), que las describan razonablemente. De esta manera, es posible asignar las curvas de capacidad y las curvas de fragilidad respectivas (Ver Tabla 6–4).

Tabla 6-3 sistemas constructivos industrializados encontrados en centros educativos

Tipo de sistema	Estructura	Forjado	Cerramientos	Sistema
Ligero (estructura metálica)	Pilares y vigas de acero	Losas de hormigón armado prefabricado	Plafones autoportantes monocapa de hormigón armado	[1] Estructura metálica modulada y cerramientos por componentes
		Forjados de placas de hormigón y fibras	Plafones de hormigón y fibras	[2] Estructura metálica modulada y cerramientos de plafones de hormigón y fibras
		Forjados alveolares de hormigón armado prefabricado	Plafones sándwich	[3] Estructura metálica modulada y cerramientos de plafones sándwich
	Estructura de módulos y pilares de vigas de acero y forjados mixtos o losas de hormigón armado	Módulos de medidas prefijadas	Componentes diversos	[4] Estructura de módulos metálicos de medidas prefijadas y componentes
		Módulos plegables	Componentes diversos	[5] Estructura de módulos metálicos plegables de medidas prefijadas y componentes
		Módulos de medidas abiertas	Componentes diversos	[6] Estructura de módulos metálicos de medidas abiertas y componentes
Pesado (estructura de hormigón)	Estructura de muros portantes	Forjado de placas alveolares de hormigón armado	Muros portantes tricapa de hormigón armado	[8] Muros portantes tricapa y placas de hormigón armado prefabricado
		Forjado de placas alveolares de hormigón armado	Muros portantes monocapa de hormigón armado	[12] Muros portantes macizos y placas de forjado de hormigón prefabricado
	Estructura de muros portantes tricapa, pilares y vigas de hormigón armado	Forjados alveolares de hormigón armado prefabricado	Muros portantes tricapa de hormigón armado	[7] Muros portantes tricapa, pórticos y placas de forjado de hormigón prefabricado
	Pilares y vigas de hormigón armado	Forjados alveolares de hormigón armado prefabricado	Placas alveolares de hormigón armado prefabricado	[9] Pórticos, placas de forjado y fachada de hormigón prefabricado
		Forjados alveolares de hormigón armado prefabricado	Plafones autoportantes monocapa de hormigón armado	[10] Pórticos, placas de forjado y plafones autoportantes de hormigón prefabricado
	Estructura de módulos	placas alveolares de hormigón armado	Plafones autoportantes de hormigón armado sándwich	[11] Módulos portantes, placas de forjado y plafones de hormigón prefabricado

Fuente (Pons 2009)

 <p>[1] Estructura metálica modulara y cerramientos por componentes</p>	 <p>[2] Estructura metálica modulara y cerramientos de plafones de hormigón y fibras</p>	 <p>[3] Estructura metálica modulara y cerramientos de plafones sándwich</p>
 <p>[4] Estructura de módulos metálicos de medidas prefijadas y componentes</p>	 <p>[5] Estructura de módulos metálicos plegables de medidas prefijadas y componentes</p>	 <p>[6] Estructura de módulos metálicos de medidas</p>
 <p>[7] Muros portantes tricapa, pórticos y placas de forjado de hormigón prefabricado</p>	 <p>[8] Muros portantes tricapa y placas de hormigón armado prefabricado</p>	 <p>[9] Pórticos, placas de forjado y fachada de hormigón prefabricado</p>
 <p>[10] Pórticos, placas de forjado y plafones autoportantes de hormigón prefabricado</p>	 <p>[11] Módulos portantes, placas de forjado y plafones de hormigón prefabricado</p>	 <p>[12] Muros portantes macizos y placas de forjado de hormigón prefabricado</p>

**Figura 6-5 Sistemas constructivos industrializados encontrados en centros educativos**

Fuente (Pons 2009)

**Tabla 6–4 Clasificación de los sistemas industrializados en tipologías HAZUS y RISK UE**

Sistema estructural (Pons, 2009)		Tipologías HAZUS	Tipologías RISK UE
[1]	Estructura metálica modulara y cerramientos por componentes	S1 Pórticos de acero	S1
[2]	Estructura metálica modulara y cerramientos de plafones de hormigón y fibras	S1 Pórticos de acero	S1
[3]	Estructura metálica modulara y cerramientos de plafones sándwich	S1 Pórticos de acero	S1
[4]	Estructura de módulos metálicos de medidas prefijadas y componentes	S1 Pórticos de acero	S1
[5]	Estructura de módulos metálicos plegables de medidas prefijadas y componentes	S1 Pórticos de acero	S1
[6]	Estructura de módulos metálicos de medidas abiertas y componentes	S1 Pórticos de acero	S1
[7]	Muros portantes tricapa, pórticos y placas de forjado de hormigón prefabricado	PC2 Pórticos de hormigón prefabricado con muros a cortante	RC6
[8]	Muros portantes tricapa y placas de hormigón armado prefabricado	PC1 Muros y forjados de hormigón prefabricado	RC5
[9]	Pórticos, placas de forjado y fachada de hormigón prefabricado	PC2 Pórticos de hormigón prefabricado con muros a cortante	RC6
[10]	Pórticos, placas de forjado y plafones autoportantes de hormigón prefabricado	PC2 Pórticos de hormigón prefabricado con muros a cortante	RC6
[11]	Módulos portantes, placas de forjado y plafones de hormigón prefabricado	PC1 Muros y forjados de hormigón prefabricado	RC5
[12]	Muros portantes macizos y placas de forjado de hormigón prefabricado	PC1 Muros y forjados de hormigón prefabricado (Tilt up walls)	RC5

Del conjunto de edificios construidos con sistemas industrializados, la mayoría se componen de pórticos de hormigón con elementos prefabricados (el 46%), cerca del 11% son de muros de hormigón de elementos prefabricados, el 43% son de pórticos metálicos resistentes a momento.

### 6.2.1 Centros educativos de las capitales de comarca de la Provincia de Girona y de los municipios del Valle de Arán

En conjunto con gestores de protección civil de la comarca de Val d’Aran, se seleccionaron un grupo de escuelas para ser incluidas en el estudio de seguridad de los edificios esenciales de la región (ver Capítulo 5). Sobre estas escuelas asistentes de investigación de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), en colaboración con personal del grupo de bomberos de la estación del municipio de Vielha, desarrollaron una inspección visual rápida de los centros educativos (Rodríguez Pereira, 2010). Esta inspección se realizó adoptando los Formularios de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Centros Educativos, elaborados por el Instituto Geológico de Cataluña (IGC) y la UPC (IGC 2010).

Durante la inspección se verificaron y rellenaron los datos del Formulario 1 (datos generales) y se identificaron las propiedades estructurales de los edificios, incluidas en el Formulario 2. De esta manera se recopilaban datos relacionados con el año o periodo de construcción, el número de plantas y su tipología estructural. Por otro lado, se calificaron otros detalles estructurales como la irregularidad en planta y en altura, la posibilidad de golpeteo, la existencia de pilares cortos, de muros con demasiadas aberturas, de daños previos y de intervenciones estructurales.

Por otro lado, el conjunto de centros educativos de las capitales de Comarca de la Provincia de Girona fue seleccionado en acuerdo entre personal del Departament d’Ensenyament, la UPC y el IGC. En total se identificaron 54 instalaciones (117 edificios). Para cada una, se dispuso de planos estructurales, arquitectónicos, memorias de construcción y de obras de ampliación y reforma, entre otros documentos.

Esta información fue suministrada por responsables del Departament d’Ensenyament. Se utilizó una carpeta de ficheros compartida en un servicio FTP (Protocolo de Transferencia de Archivos), el cual fue administrado por el IGC. De esta manera, asistentes de investigación de la UPC revisaron dichos documentos y a partir de estos datos realizaron una caracterización del conjunto de edificios según sus

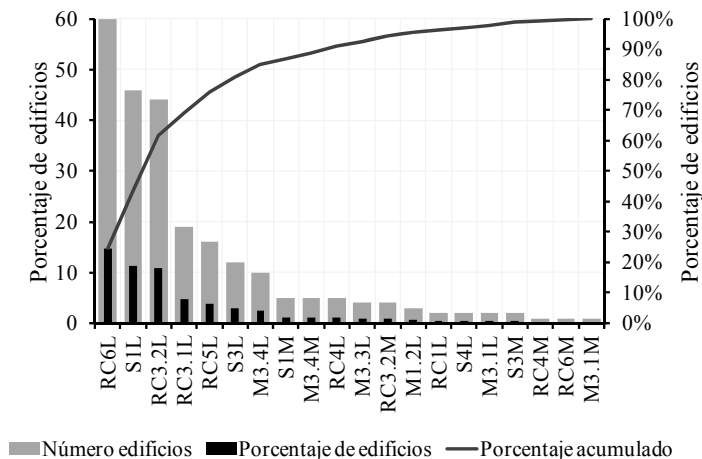
propiedades estructurales, empleando los formularios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos.

Cerca del 15% son edificios de muros de mampostería no reforzada. Alrededor del 57% de los edificios son de pilares y forjados de hormigón armado. Cerca del 13% son edificios de muros de hormigón y pórticos de hormigón prefabricado. Cerca del 14% son edificios con estructura metálica. En el Anexo H se presenta la lista de los centros educativos analizados, los formularios en los cuales se describe la información general de las instalaciones, las características estructurales de los edificios, así como su clasificación en tipologías estructurales.

En la Tabla 6-5 se presentan las tipologías estructurales identificadas para el análisis. En la Figura 6-6 se presenta el porcentaje de edificios analizados según tipologías. En la Figura 6-7 se presenta el porcentaje de edificios según número de plantas y en la Figura 6-8 se presenta el porcentaje de edificios según periodos de construcción. De estas Figuras se observa que la mayoría de edificios son construcciones con sistemas industrializados (pórticos de hormigón prefabricado-RC6, muros de hormigón prefabricado -RC5 y de elementos metálicos -S1 y S3), así como estructuras de pilares y forjados de hormigón armado (RC32 y RC31). La mayoría de edificios son de hasta 3 plantas sobre rasante, razón por la cual la mayoría de los edificios se clasifican como estructuras de baja altura.

**Tabla 6-5 Tipologías estructurales consideradas**

Tipologías estructurales	Descripción
M1.2	Muros de carga de mampostería de piedra tallada
M3.1	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera
M3.3	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería
M3.4	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado
RC1	Estructuras de hormigón armado resistentes a momento
RC3.2	Estructuras irregulares de hormigón armado con tabiquería de mampostería
RC3.1	Estructuras regulares de hormigón armado con tabiquería de mampostería
RC4	Sistemas duales con muros y pórticos de hormigón armado
RC5	Muros de hormigón prefabricado
RC6	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón
S1	Estructuras metálicas resistentes al momento
S3	Estructuras metálicas con tabiquería de mampostería no reforzada
S4	Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados “in situ”



**Figura 6-6 Porcentaje de edificios según tipologías estructurales**

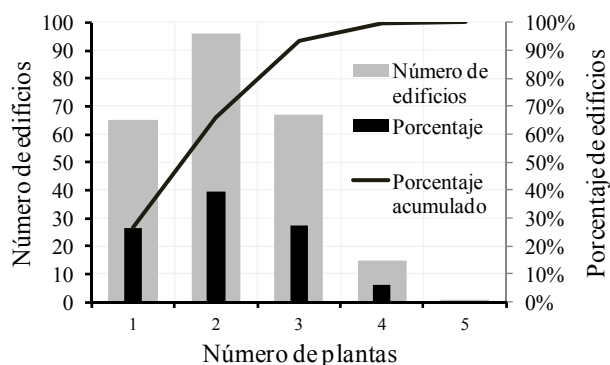


Figura 6-7 Número y porcentaje de edificios según número de plantas

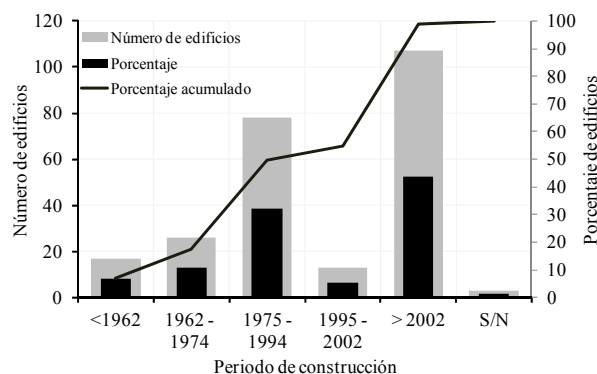


Figura 6-8 Número y porcentaje de edificios incluidos en el estudio, según periodos de construcción

En cuanto a los periodos de construcción, destacan dos periodos por el número de edificios, entre 1975 y 1994, así como a partir del año 2002. Esto muestra por un lado, los planes de urgencia desarrollados con la construcción de sistemas industrializados en la década de los 70, así como la promoción de centros educativos en los años 90. A su vez, el aumento en la construcción de edificios a partir de 2002 corresponde a la construcción de centros con sistemas industrializados.

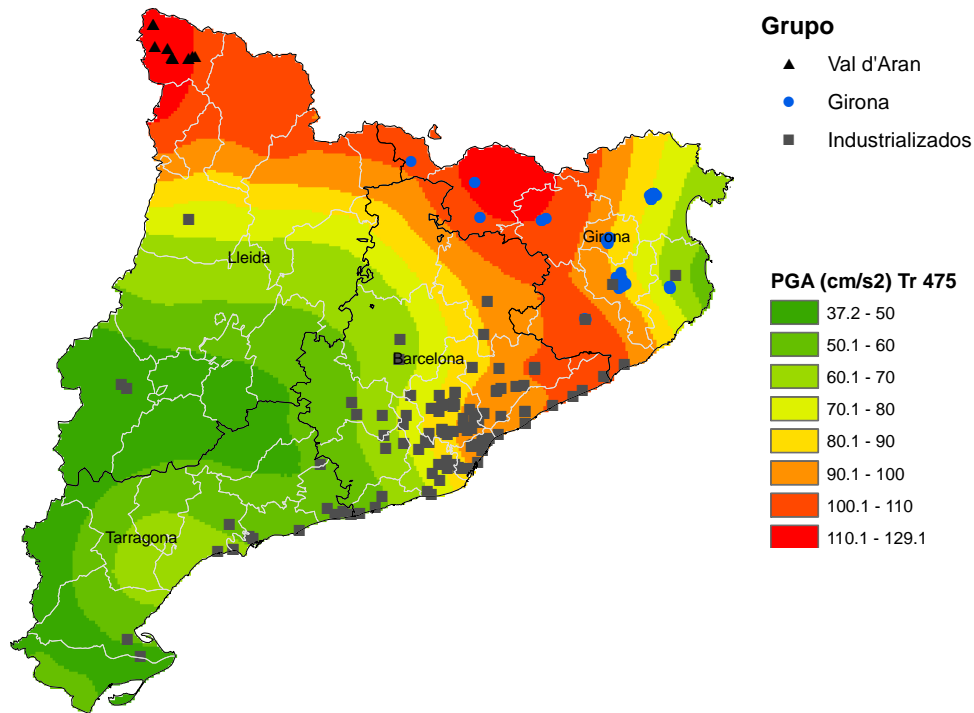
En cuanto a la distribución geográfica de los centros educativos analizados, en la Figura 6-9 se presenta su ubicación, así como el PGA esperado (valores medios en roca firme) para un periodo de retorno de 475 años, de acuerdo con el estudio de peligrosidad desarrollado por GEOTER (2008).

Además de la ubicación y tipología estructural de los edificios, se identificaron las áreas construidas utilizando los documentos existentes, así como informes de las fichas de catastro<sup>26</sup>. Por otro lado, el número de alumnos se obtuvo de información disponible en el mapa escolar de Cataluña<sup>27</sup>, así como a partir de estimaciones propias basadas en el número de grupos en cada institución y suponiendo que cada grupo se compone de 22 alumnos en promedio.

<sup>26</sup> Ver: Sede electrónica de catastro. Consulta de datos catastrales [En línea] <https://www1.sedecatastro.gob.es/OVCFrames.aspx?TIPO=CONSULTA>. Última consulta [25/05/2012]

<sup>27</sup> Ver: Departament d'Ensenyament - Mapa escolar [En línea]. Disponible en: <http://aplitic.xtec.cat/MapaEscolar/> [Última consulta 18/09/2012].

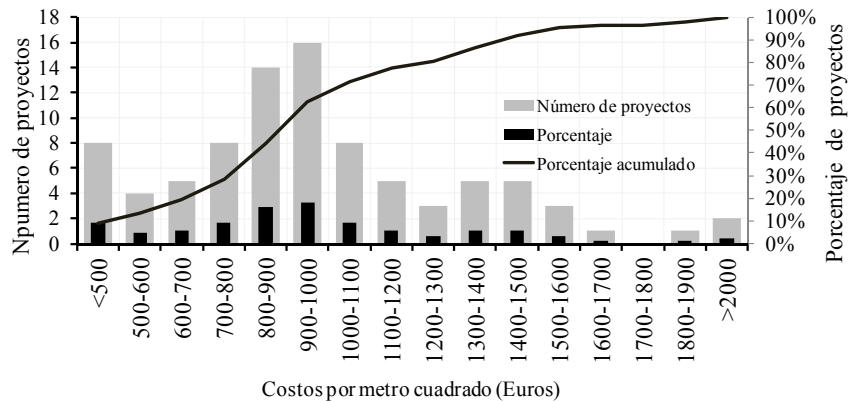




**Figura 6-9 Ubicación de los centros educativos analizados y PGA de Cataluña para un periodo de retorno de 475 años**

*Adaptado de GEOTER (2008)*

Para estimar el valor económico de cada instalación, el área construida se multiplicó por un valor estándar por metro cuadrado, considerando los costos por m<sup>2</sup> de adecuación, ampliación y reforma de 88 proyectos ejecutados entre los años 2007 y 2009. Un resumen de estos valores se presenta en la Figura 6-10.



**Figura 6-10 Costos por m<sup>2</sup> de proyectos de adecuación, ampliación y reforma realizados entre 2007 y 2009 en Cataluña**

### 6.3 Evaluación del daño esperado y de la seguridad de los centros educativos de la muestra

La evaluación del daño esperado se realizó siguiendo el método simplificado basado en espectros de capacidad, descrito en el Capítulo 4. Su aplicación se basa en la clasificación de los edificios en tipologías estructurales, para las cuales se conocen los espectros de capacidad (ver Tabla 6-6). En el Anexo B se presentan los parámetros de dichos espectros y de las curvas de fragilidad correspondientes.

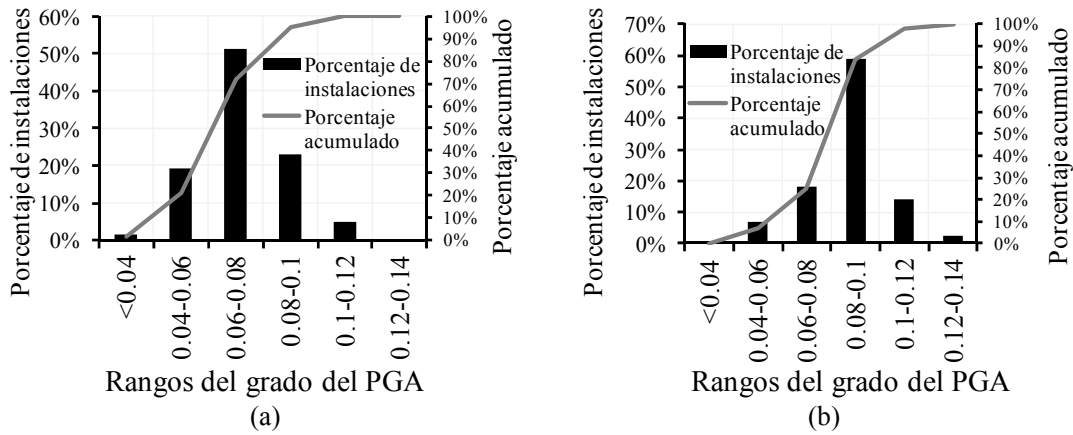
El comportamiento de los edificios con elementos de hormigón prefabricado ha sido estudiado en los proyectos Europeos Ecoleader (2001-2003) y Growth (2002-2006). Biondini et al. (2008) y Biondini et al. (2010) presentan criterios para el diseño de edificios de hormigón armado con elementos prefabricados y desarrollan análisis estáticos no lineales y análisis dinámicos modales para validarlos. Por otro lado, Wilson et al. (2008) evalúa el comportamiento sísmico de estructuras de muros portantes de hormigón con elementos prefabricados en zonas de moderada sismicidad. En Şenel & Kayhan (2010) se presenta la evaluación de la fragilidad y daño de edificios industriales de pórticos construidos en Turquía con elementos de hormigón armado prefabricado. Estos trabajos han sido utilizados como referencia para evaluar el comportamiento de edificios de hormigón industrializados. No obstante, se resalta la importancia del desarrollo de modelos de las tipologías estructurales más representativas de los centros educativos en Cataluña, construidos con elementos prefabricados, con el fin de aumentar la confiabilidad de este estudio.

**Tabla 6–6 Referencias empleadas para definir los parámetros de los espectros de capacidad de los edificios**

Tipología	Referencia
M1.2	Giovinazzi (2005)
M3.1	
M3.3	
M3.4	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Università degli Studi di Genova (UNIGE); edificios sin diseño sismoresistente (pre code) RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003)
RC1	Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) edificios de nivel bajo de diseño sismoresistente (Low code)
RC3.2	Moreno (2006) RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003)
RC3.1	Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) edificios de nivel bajo de diseño sismoresistente (Low code)
RC4	HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003)
RC5	Wilson et al. (2008)
RC6	Biondini et al. (2008) y Biondini et al. (2010)
S1	
S3	HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003)
S4	

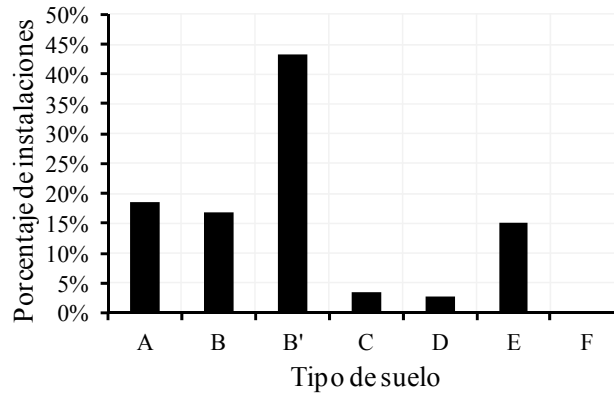
El análisis de seguridad se realiza para eventos de periodo de retorno de 475 y 975 años. Para estimar la acción sísmica en roca firme, se adaptan las formas espectrales propuestas en el Eurocódigo 8 a los espectros de amenaza uniforme desarrollados por GEOTER (2008), tal como se describió en el Capítulo 4. A su vez, para considerar los efectos de sitio, se utiliza la clasificación y caracterización de la respuesta sísmica de los diferentes tipos de suelo obtenida en un estudio de mesozonación elaborado para Cataluña (IGC 2011). Cabe señalar que en la estimación del daño de las tipologías S1, S3, S4 se emplearon las curvas de fragilidad definidas en el manual de la metodología HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003).

En la Figura 6-11 se presenta el porcentaje de instalaciones según rangos del PGA al que se encuentran expuestas (en roca firme), para periodos de retorno de 475 y 975 años. En esta Figura se observa que para periodos de retorno de 475 años, cerca del 20% de las instalaciones están expuestas a un PGA menor que 0.06 g. Cerca del 75% están expuestas a PGA's de entre 0.06 g y 0.1 g. Alrededor del 5% están expuestas a PGA's de entre 0.1 g y 0.12 g. Para el periodo de retorno de 975 años, cerca del 8% de las instalaciones están expuestas a un PGA menor que 0.06 g. Alrededor del 80% están expuestas a PGA's de entre 0.06 g y 0.1 g; el porcentaje restante (cerca del 12%), están expuestas a PGA's de entre 0.1 g y 0.13g.



**Figura 6-11 Porcentajes de instalaciones según rangos del PGA en roca firme: (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años**

En la Figura 6-12 se presenta el porcentaje de instalaciones según tipos de suelo. Cerca del 19% se encuentra en roca firme (suelo tipo A), Un 17% en suelo tipo B y un 43% en suelo tipo B'. Cerca del 15% se encuentra ubicado en suelo Tipo E. Menos del 10% están situados en suelos C y D.



**Figura 6-12 Porcentaje de instalaciones según tipo de suelo**

En la Figura 6-13 se presenta el porcentaje de instalaciones según rangos de PGA, considerando efectos de sitio. A diferencia de los valores obtenidos en la clasificación según PGA en roca firme (ver Figura 6-11), se observa que debido a los factores de amplificación de cada tipo de suelo, la mayoría de las instalaciones (cerca del 70%) están expuestas a PGA's mayores que 0.08 g, para eventos de periodo de retorno de 475 años: Alrededor del 30% están expuestas a PGA's de entre 0.08 g y 0.1 g. Cerca del 25% de las instalaciones están expuestas a PGA's de entre 0.1 g y 0.12 g; un 10% de las instalaciones están expuestas a PGA's de entre 0.12 g y 0.14 g. Un porcentaje menor al 5% se encuentra expuesto a PGA's de entre 0.14 g y 0.2 g.

Para periodos de retorno de 975 años, la mayoría de las instalaciones (cerca del 65%) están expuestas a PGA's mayores que 0.1 g: cerca del 30% están expuestas a PGA's de entre 0.1 g y 0.12 g; un 20% de las instalaciones están expuestas a PGA's de entre 0.12 g y 0.14 g. Alrededor del 10% de las instalaciones están expuestas a PGA's de entre 0.14 g y 0.16 g. Un porcentaje cercano al 5% están expuestas a PGA's de entre 0.16 g y 0.22 g. Estas diferencias señalan la importancia del estudio de mesozonación sísmica para describir la acción sísmica y estimar los daños en los centros educativos.

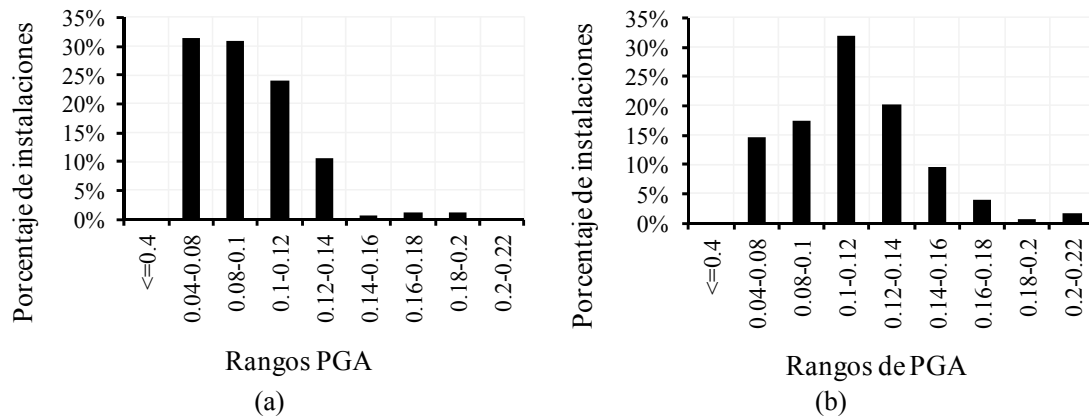


Figura 6-13 Porcentaje de instalaciones según rangos de PGA considerando el tipo de suelo: (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años

### 6.3.1 Evaluación del daño y de la seguridad sísmica de los centros educativos

Al comparar los espectros de demanda (correspondientes a la ubicación del edificio) con los espectros de capacidad (correspondientes a la tipología estructural), se determina el punto de comportamiento de los edificios. Una vez conocido el desplazamiento en el punto de comportamiento, es posible estimar la probabilidad de exceder un determinado estado de daño haciendo uso de las curvas de fragilidad propuestas en el proyecto RISK UE. En el Anexo H se presenta, para cada edificio incluido en el estudio, una ficha descriptiva de la evaluación del comportamiento y del daño. Dicha ficha incluye: el espectro de capacidad de la tipología correspondiente, el espectro de respuesta de acuerdo al PGA y tipo de suelo, el espectro de demanda, las coordenadas del punto de capacidad por demanda (desplazamiento espectral, aceleración espectral), la evaluación de las curvas de fragilidad, así como la matriz de probabilidad de daño y el grado de daño medio esperado.

En la Figura 6-14 se presentan porcentajes de centros educativos según rangos del grado de daño medio estimado para los periodos de retorno de 475 y 975 años. En esta Figura se observa que para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 80% de las instalaciones tienen un grado de daño menor que 1 (daños entre nulos y leves); alrededor del 10% tienen daños que varían entre 1.6 y 2 (daños entre leves y moderados). Muy pocos (menos del 5%) tienen daños mayores al estado moderado. Al considerar los niveles de seguridad sugeridos por el comité VISION 2000 (SEAOC 1995), se observa que estos últimos (menos del 5%) no cumplen con el nivel de comportamiento operacional. Los edificios restantes tienen daños menores que moderados y por lo tanto sí cumplen tal requisito.

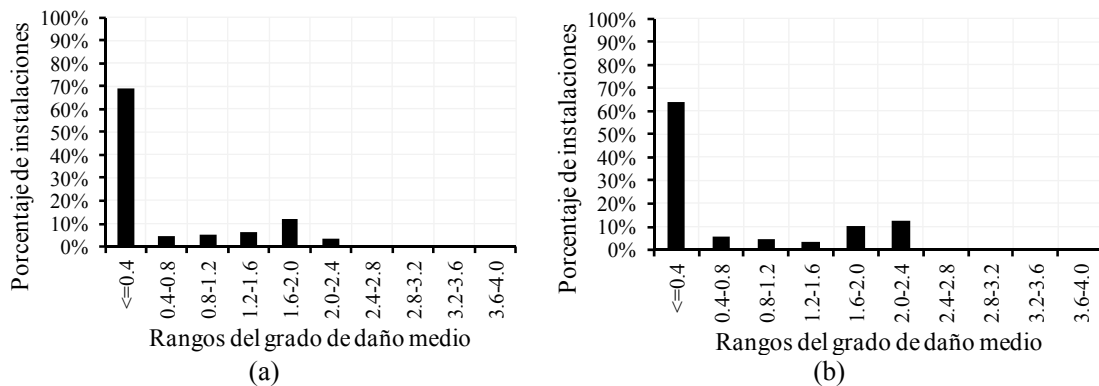


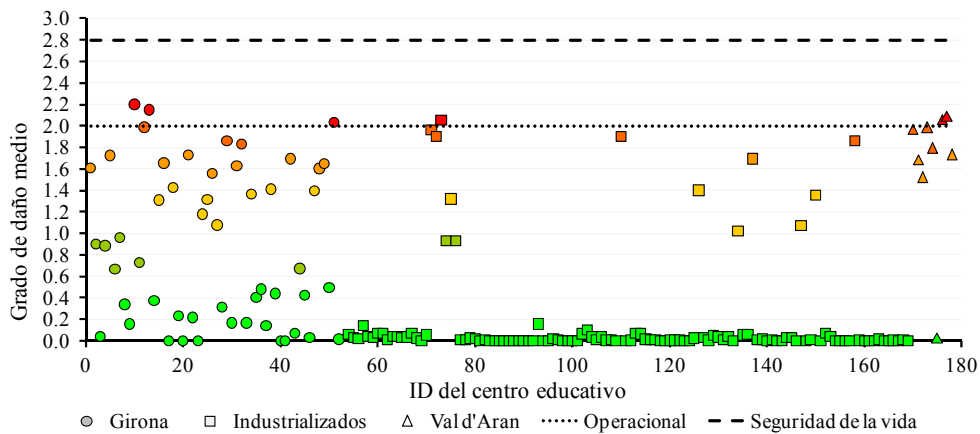
Figura 6-14 Porcentaje de instalaciones según rangos del grado de daño medio (a) Tr 475 años; (b) 975 años

Para periodos de retorno de 975 años, todas las instalaciones tienen daños menores que el estado de daño extensivo (grado de daño medio cercano a 2.8). Cerca del 70% tienen daños entre nulos y leves (el grado de

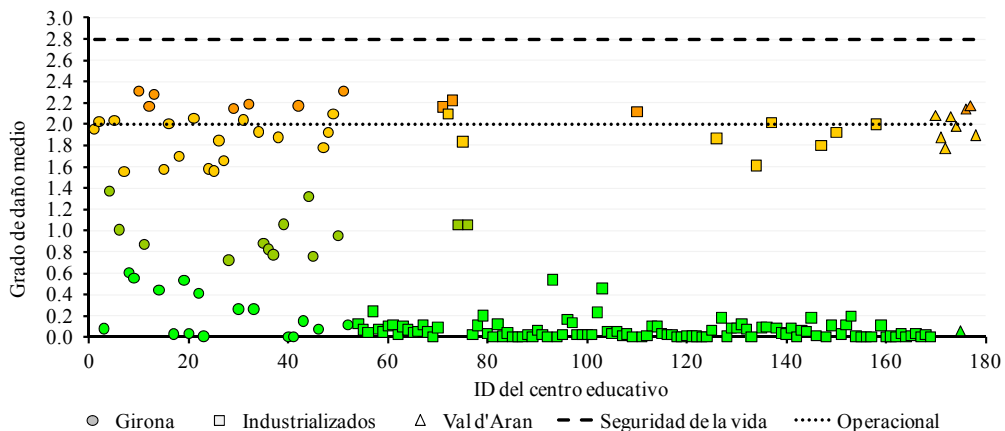
daño es menor a 1); alrededor del 15% tienen daños entre leves y moderados (el grado de daño varía entre 1 y 2) y cerca del 15% tienen daños mayores que moderados (el grado de daño es mayor que 2). Al considerar los niveles de seguridad sugeridos por el comité VISION 2000 (SEAOC 1995), se observa que todos los centros cumplen con el nivel de comportamiento de seguridad de la vida, para el cual el daño debe ser menor que extensivo.

En la Figura 6-15 y en la Figura 6-16 se presentan los centros educativos de acuerdo al grado de daño medio estimado para los periodos de retorno de 475 y 975 años, respectivamente. Los edificios se encuentran organizados según los grupos analizados: conjunto de centros educativos de la Provincia de Girona (ID entre 1 y 53), conjunto de centros educativos construidos con sistemas industrializados (ID entre 54 y 170) y el conjunto de edificios del Valle de Arán (ID entre 171 y 179).

Para eventos de periodo de retorno de 475 años, se observa que el daño esperado en la mayoría de los centros construidos con sistemas industrializados varía entre nulo y leve. Los edificios con daños más elevados se encuentran ubicados tanto en la provincia de Girona como en Val d'Aran. Estos resultados son consistentes con la distribución territorial de los edificios y la peligrosidad sísmica a la que están expuestos, tal como se presenta en la Figura 6-9 y se expuso en el Capítulo 5 correspondiente a edificios esenciales del Val d'Aran.

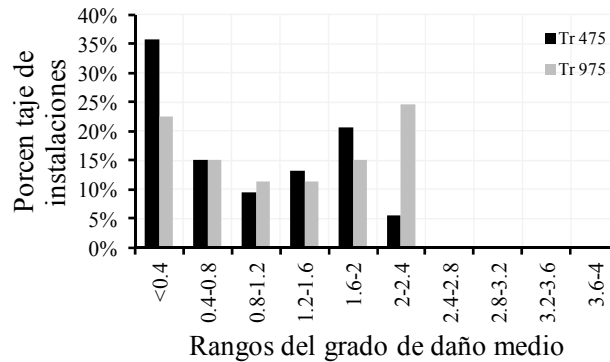


**Figura 6-15** Grado de daño medio de los edificios (Tr 475 años) y nivel de comportamiento operacional (SEAOC 2000)



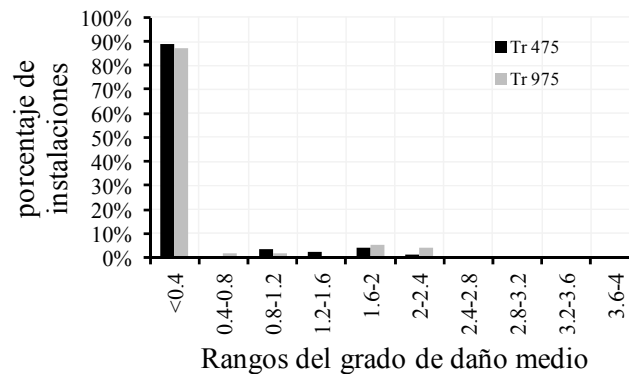
**Figura 6-16** Grado de daño medio de los edificios (Tr 975 años) y nivel de comportamiento de seguridad de la vida (SEAOC 2000)

En Figura 6-17, Figura 6-18 y en la Figura 6-19 se presenta el porcentaje de instalaciones según rangos del grado de daño medio, para los grupos de instalaciones de Girona, de centros construidos con sistemas industrializados y de centros ubicados en la Comarca de Val d’Aran, respectivamente.



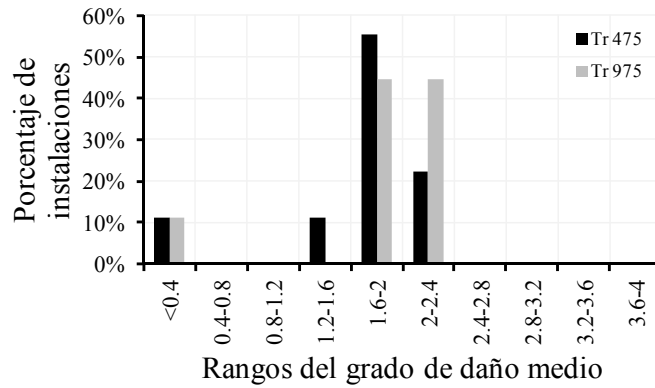
**Figura 6-17 Porcentaje de instalaciones de la Provincia de Girona según rangos del grado de daño medio para periodos de retorno de 475 y 975 años**

En el caso de los centros de Girona, de 54 instalaciones se observa que para periodos de retorno de 475 años, cerca del 60% tienen daños entre nulos y leves (el grado de daño es menor a menor a 1). Cerca del 35% tienen daños que varían entre leves y moderados (el grado de daño varía entre 1.2 y 2). El 5% de los edificios tienen un grado de daño mayor a 2 y no cumplen con el requisito de nivel operacional. Para periodos de 975 años, el 45% tienen daños entre nulos y leves, cerca del 25% tienen daños entre leves y moderados y el 25% daños entre moderados y extensivos.



**Figura 6-18 Porcentaje de instalaciones construidas con sistemas industrializados según rangos del grado de daño medio para periodos de retorno de 475 y 975 años**

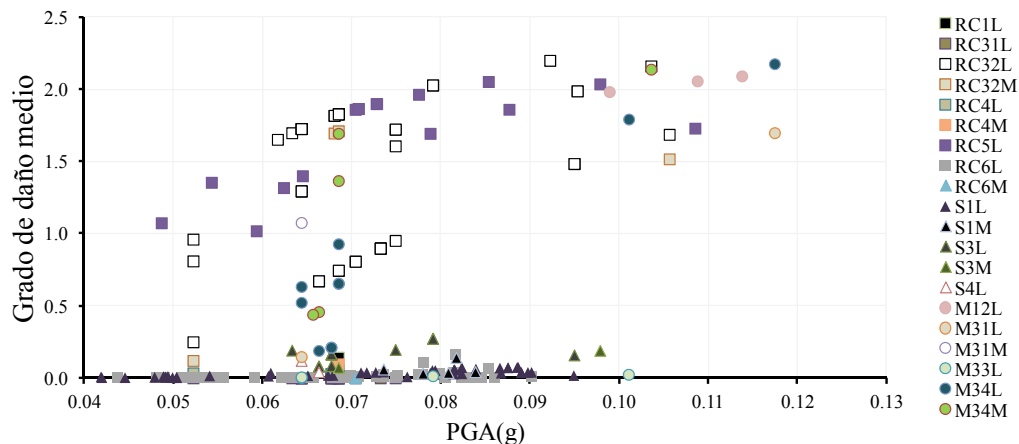
En el caso de los centros construidos con elementos prefabricados, de 116 instalaciones más del 80% tienen daños entre nulos y leves para los dos periodos de retorno. Cerca del 10% tienen daños entre leves y moderados. Muy pocos edificios (menos del 5%) de los edificios tienen daños mayores al estado moderado.



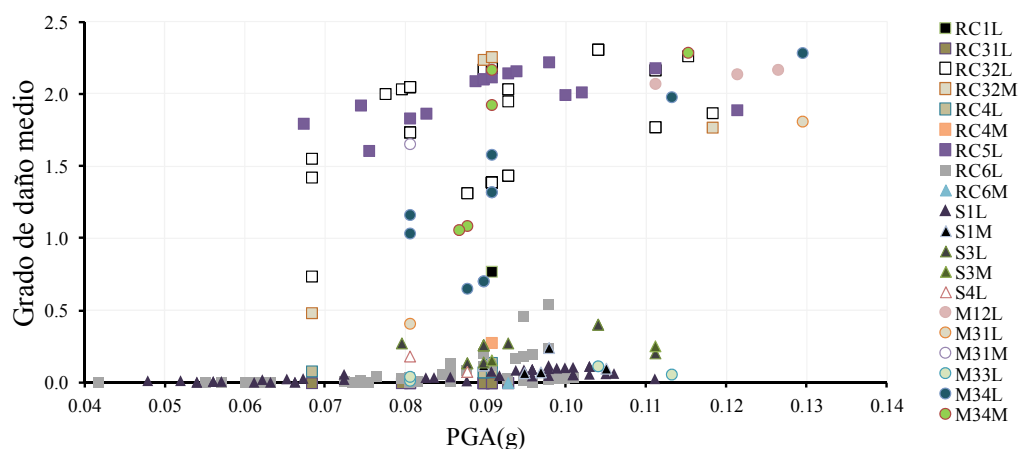
**Figura 6-19 Número de centros educativos de la Comarca de Val d' Aran según rangos del grado de daño medio para periodos de retorno de 475 y 975 años**

En el caso de los edificios de la Comarca de Val d' Aran, se observa que para periodos de retorno de 475 años, la mayoría tienen daños entre leves y moderados. Cerca del 20% (2 de 9) tienen daños mayores al estado de daño moderado. Para periodos de retorno de 975 años, cerca del 40% (4 de 9) tienen daños mayores al estado moderado.

En la Figura 6-20 y en la Figura 6-21 se presentan el grado de daño medio y el PGA de los edificios analizados. De esta Figura se observa que los edificios de muros de piedra (M1.2), de mampostería no reforzada con forjados de madera (M3.1) y con forjados de hormigón armado (M3.4), así como las estructuras irregulares de hormigón armado (RC3.2) tienen mayores niveles de daño que los edificios de estructuras metálicas (pórticos resistentes a momento -S1, pórticos resistentes a momento con muros de relleno de mampostería-S3 y estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados "in situ" S4), que los edificios regulares de hormigón armado con muros de relleno de mampostería (RC3.1).



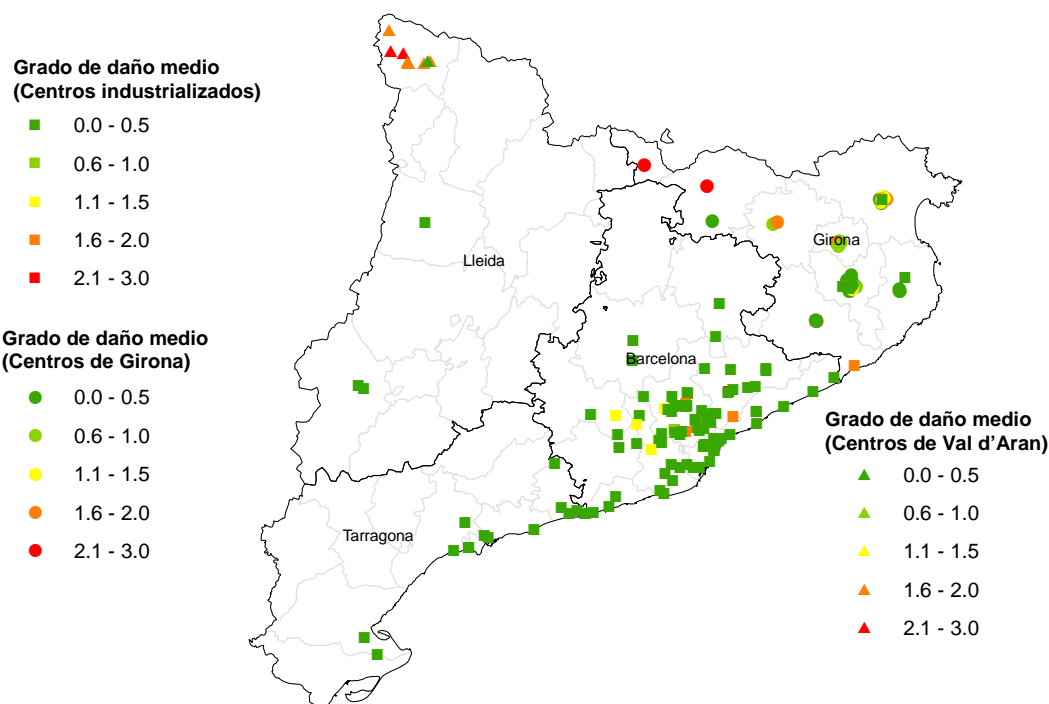
**Figura 6-20 Grado de daño medio según tipologías y valores de PGA (roca) para un periodo de retorno de 475 años**



**Figura 6-21 Grado de daño medio según tipologías y valores de PGA (roca) para un periodo de retorno de 975 años**

Se observa que para los edificios construidos con sistemas industrializados, los cuales han sido caracterizados con las tipologías de estructuras metálicas, así como las de hormigón prefabricado (RC6), los daños esperados varían entre nulos y leves.

En la Figura 6-22 se presenta un mapa de las instalaciones evaluadas según rangos del grado de daño medio. Se observa que los daños están relacionados tanto con la peligrosidad sísmica de la región, como con las propiedades estructurales de los edificios. Los daños más altos se esperan en los centros de la Comarca de Val d’Aran y de la Provincia de Girona. Los centros construidos con elementos prefabricados están en su mayoría ubicados en la Provincia de Barcelona. La mayoría de estos centros tienen daños entre nulos y leves. En este grupo, los daños más altos se esperan en las estructuras de muros de hormigón prefabricado.



**Figura 6-22 Mapa de los centros educativos según grado de daño medio Tr 475 años**



## 6.3.2 Pérdidas esperadas

La estimación del grado de daño medio es útil para verificar la seguridad de una instalación expuesta a un escenario sísmico. Como complemento, la estimación de las pérdidas potenciales es útil para priorizar los centros educativos en un programa regional de reducción de la vulnerabilidad. Asimismo, estos resultados son útiles para cuantificar los costos y beneficios de los diferentes niveles de seguridad. En la Figura 6-23 y en la Figura 6-24 se presentan las pérdidas económicas (en millones de euros) estimadas para periodos de retorno de 475 y 975 años respectivamente. En la Figura 6-25 y en la Figura 6-26 se presentan las pérdidas en porcentaje del valor de reposición de las instalaciones.

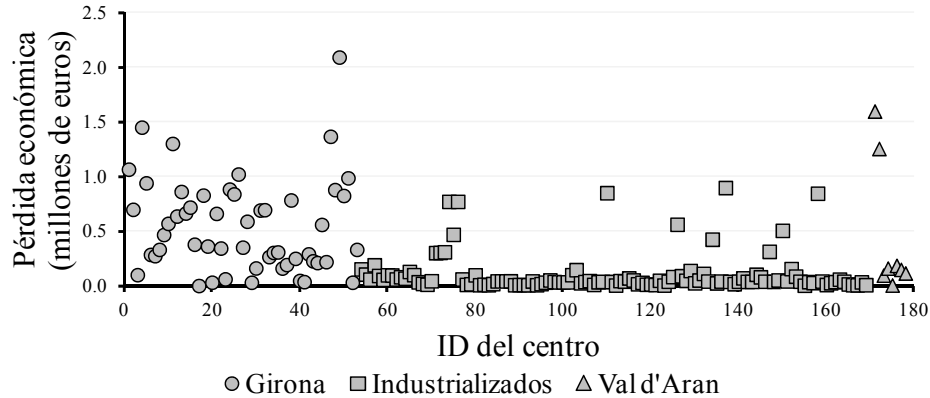


Figura 6-23 Pérdidas económicas de los centros Tr 475(en millones de Euros)

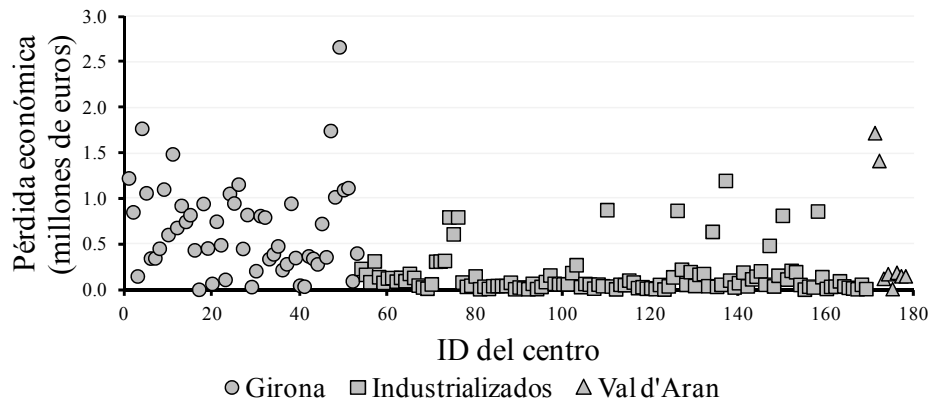


Figura 6-24 Pérdidas económicas de los centros Tr 975(en millones de Euros)

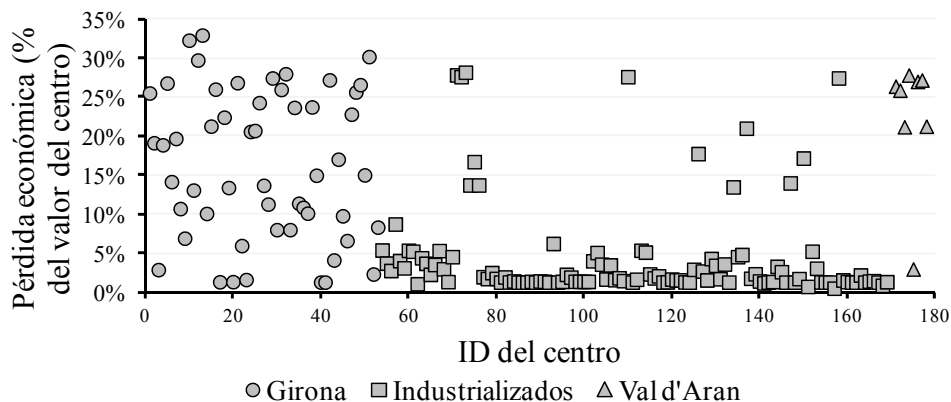


Figura 6-25 Pérdida económica Tr 475 (% del valor del centro educativo)

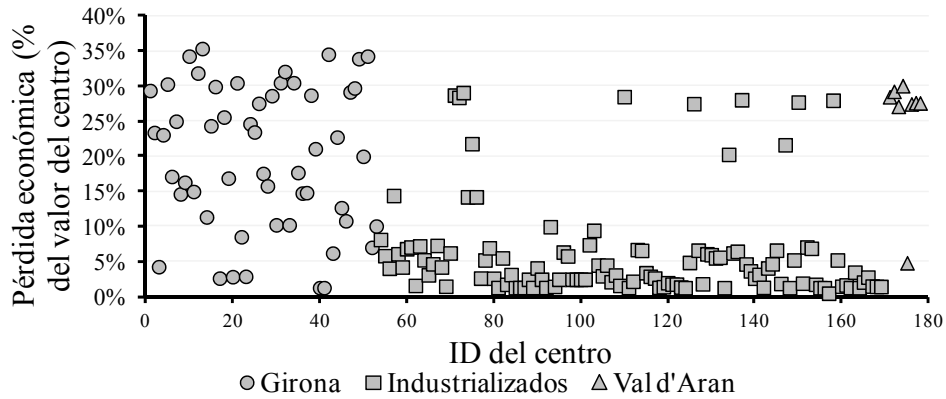


Figura 6-26 Pérdida económica Tr 975 (% del valor del centro educativo)

En la Figura 6-27 se presentan los valores máximo, mínimo y promedio de las pérdidas económicas de los centros educativos. Para los dos periodos de retorno, el valor promedio de pérdida de los centros de Girona se encuentra entre el 15% y el 20%, inferior al 5% para los edificios industrializados y cercano al 25% para los edificios de Val d'Aran. En los centros de Girona, los mayores porcentajes de pérdida son cercanos al 35%. Para centros construidos con sistemas industrializados y los de Val d'Aran, los mayores porcentajes de pérdidas son cercanos al 30%.

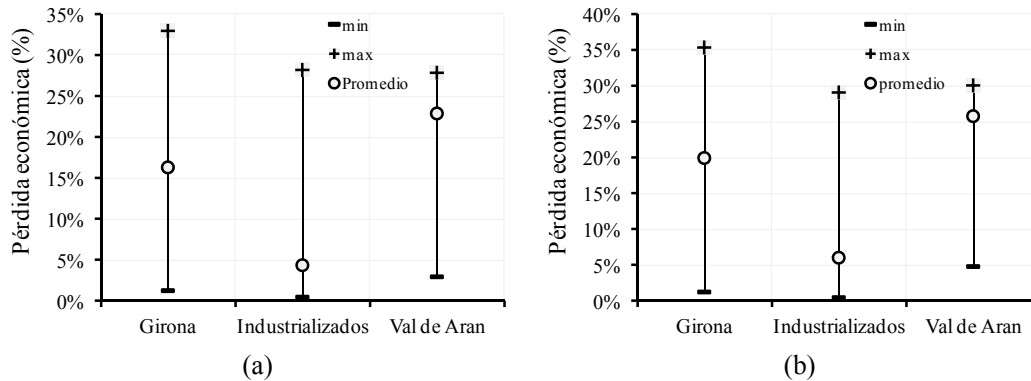


Figura 6-27 Valores máximo, mínimo y promedio para las pérdidas económicas de las instalaciones según grupos y periodos de retorno (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años

### 6.3.3 Evaluación de costos durante la vida útil del proyecto

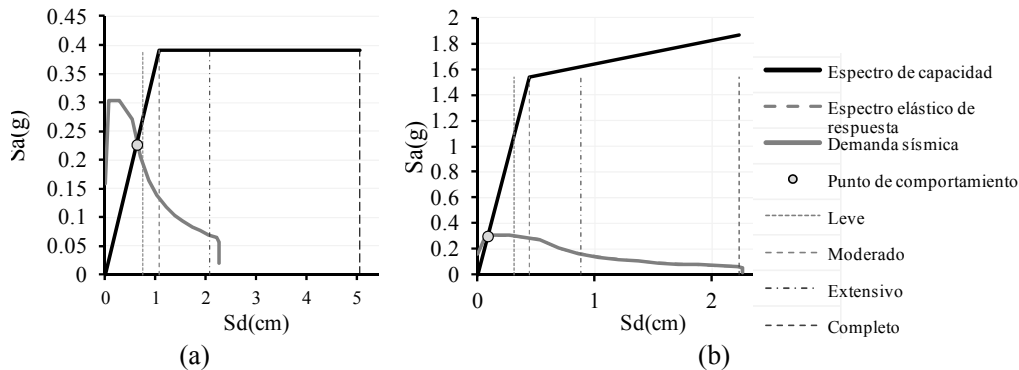
El valor esperado de los costos durante el ciclo de vida del edificio puede ser obtenido siguiendo la Ecuación 6-1 (Ellingwood, 2005)

$$E[C(t)] = \frac{1}{\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}) \sum_{j=1}^4 -C_j (\ln(1 - P[ds > DS_j | Sd_p]) - \ln(1 - P[ds > DS_{j+1} | Sd_p])) \quad (6-1)$$

En donde  $\lambda$  representa la tasa de interés,  $t$  el periodo de vida útil del edificio y  $C_j$  los costos esperados para cada estado de daño (1-leve, 2-moderado, 3-extensivo, 4-completo). Los valores de  $C_j$  fueron adoptados del ATC 13 (1985) y expresan el costo en porcentaje del valor de reposición del edificio.

Como ejemplo, la Figura 6-28 presenta el punto de capacidad por demanda de dos tipologías de edificios: (a) estructuras irregulares de pilares y forjados de hormigón armado con muros de relleno de mampostería (RC3.2L); (b) estructuras regulares de hormigón armado con muros de relleno de mampostería (RC3.1L).

Si se supone que  $\lambda = 5\%$ ,  $t = 50$  años, que los edificios están expuestos a un PGA de 0.09 g y que se encuentran sobre un suelo tipo B. A partir de estos datos es posible estimar las probabilidades de excedencia de cada estado de daño y así los costos de los daños esperados durante la vida útil del proyecto. Tales resultados se encuentran en la Tabla 6–7.



**Figura 6-28 Puntos de comportamiento de (a) estructuras de hormigón armado irregulares, con muros de relleno de mampostería; (b) pórticos de hormigón prefabricado**

**Tabla 6–7 Probabilidades de excedencia de los diferentes estados de daño y costos esperados durante la vida útil**

Probabilidades de excedencia de los estados de daño	Tipologías estructurales		Costo esperado (% del valor de reposición del edificio) para cada estado de daño ( $C_i$ )	
	RC3.2L	RC3.1L	Estado de daño	$C_i$
$P[ds > nulo   sd_p]$	18.5%	100.0%	Nulo	0%
$P[ds > leve   sd_p]$	42.7%	***	Leve	5%
$P[ds > moderado   sd_p]$	29.1%	***	Moderado	25%
$P[ds > extensivo   sd_p]$	9.1%	***	Extensivo	50%
$P[ds > completo   sd_p]$	0.5%	***	Completo	100%
$E[C(t)]$ (como fracción del valor de reposición)	19.1%	***		

\*\*\* Indica valores cercanos a cero

Los resultados del análisis de costos durante el ciclo de vida permiten identificar los beneficios del uso de tipologías menos vulnerables ante la peligrosidad sísmica, tal como se presenta en la tabla anterior. Estos resultados, complementados con los costos de construcción y de mantenimiento, dan soporte a la construcción de determinadas tipologías de edificios para la infraestructura escolar, siguiendo orientaciones de eficiencia económica, así como de seguridad de la infraestructura y de los alumnos.

## 6.4 Resumen y discusión

En este Capítulo se ha presentado un análisis simplificado de la seguridad de un conjunto de centros educativos en Cataluña. Para este fin, se ha revisado la evolución de la arquitectura escolar en Cataluña durante el siglo XX, con el fin de identificar a nivel general, las técnicas constructivas, la tipología de edificios, su distribución en el territorio, así como las dimensiones y capacidad de los centros educativos de acuerdo a los reglamentos vigentes para la construcción de esta infraestructura.

En este contexto, se han seleccionado un conjunto de edificios sobre los cuales se han identificado las principales propiedades estructurales con el fin de realizar una evaluación de su seguridad sísmica. Dicho conjunto está compuesto por tres subgrupos: 1) instalaciones de las capitales de comarca de la Provincia de Girona, 2) escuelas de los municipios de la Comarca de Val d'Aran y 3) un grupo de centros educativos construidos con sistemas industrializados.

Para este fin, se realizaron inspecciones visuales rápidas en los centros de Val d'Aran. Para los edificios restantes, se revisó la información disponible en planos arquitectónicos y estructurales, memorias de cálculo y fotos, entre otros documentos. A partir de estos datos, los centros de enseñanza se clasificaron en tipologías estructurales empleando los formularios de evaluación de la vulnerabilidad de centros educativos, elaborados por la Universidad Politécnica de Cataluña en conjunto con el Instituto Geológico de Cataluña.

Una vez clasificados los edificios, se les asignaron los espectros de capacidad y curvas de fragilidad correspondientes de acuerdo a las matrices de tipologías de los proyectos RISK UE, para edificios de mampostería y hormigón armado y HAZUS para edificios metálicos. Para los sistemas de hormigón prefabricado se revisaron curvas de capacidad desarrolladas por Biondini et al. (2008), Biondini et al. (2010) y Wilson et al. (2008).

El análisis de seguridad se desarrolla para escenarios definidos por sismos con periodos de retorno de 475 y 975 años. El comportamiento sísmico de los edificios se estimó empleando el método simplificado basado en espectros de capacidad. La seguridad de las instalaciones se analiza en base a los niveles de comportamiento sugeridos por el Comité VISION 2000.

Del total de centros analizados, para un periodo de retorno de 975 años, todos los centros educativos cumplen con el requisito de seguridad de la vida. Por otro lado, para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 80% de los edificios tienen un grado de daño menor que 1 (daños entre nulos y leves); alrededor del 10% tienen daños que varían entre 1.6 y 2 (daños entre leves y moderados). Muy pocos (menos del 5%) tienen daños mayores al estado moderado. Al considerar los niveles de seguridad sugeridos por el comité VISION 2000, se observa que los últimos edificios (el 5%) no cumplen con el nivel de comportamiento operacional. Los edificios restantes tienen daños esperados inferiores al estado de daño moderado y, por lo tanto, cumplen tal requisito.

Al revisar los resultados del grado de daño medio esperado según tipologías estructurales, se observa que los centros construidos con sistemas industrializados de pórticos de hormigón armado, así como las estructuras regulares de pilares y forjados de hormigón armado y las estructuras metálicas, tienen un mejor comportamiento que los edificios de mampostería no reforzada y que los edificios de pilares y forjados de hormigón armado irregulares.

Los mayores daños se encuentran en los edificios de Val d'Aran y de Girona, de acuerdo a la peligrosidad sísmica y a la fragilidad de las instalaciones. En Girona, cerca del 60% de las instalaciones tendrían daños entre nulos y leves (el grado de daño es menor a menor a 1). Cerca del 35% tendrían daños que varían entre leves y moderados (el grado de daño varía entre 1.2 y 2). El 5% de los edificios tendrían un grado de daño mayor a 2 y no cumplen con el requisito de nivel operacional. Los centros industrializados en su mayoría se encuentran ubicados en la Provincia de Barcelona. La mayoría (más del 80%) de estos centros tendrían un daño entre nulo y leve.

Como complemento al análisis de seguridad, se han estimado también los porcentajes de pérdida económica respecto al valor de reposición de las instalaciones, considerando eventos de periodo de retorno de 475 años y 975 años. Respectivamente, dichos porcentajes son entre el 15% y 20% para los centros de Girona; alrededor del 5% para los centros construidos con sistemas industrializados y de entre el 20% y 25% para los edificios de Val d'Aran.

En el marco del Plan Especial de Emergencias SÍSMICAS de CATALUÑA (SISMICAT), los resultados de este estudio deben ser considerados como una evaluación preliminar, útil para asignar prioridades para el estudio detallado de la vulnerabilidad de los edificios, así como para la reducción de su vulnerabilidad. Dado el alcance de este estudio, el comportamiento sísmico de los edificios construidos con sistemas industrializados se ha caracterizado a través de curvas de capacidad propuestas por diferentes autores en la literatura científica. Por esta razón, se recomienda el desarrollo de análisis estructurales detallados y específicos para dichas tipologías, con el fin de identificar apropiadamente la vulnerabilidad de los centros educativos, considerando las técnicas de construcción locales, lo cual mejoraría la confiabilidad del análisis.

A pesar del alcance del análisis, se debe recalcar que las pérdidas potenciales de los edificios pueden representar costos de oportunidad considerables para el sector educativo. En este sentido, se considera necesario discutir los estándares de seguridad establecidos para estas instalaciones en la Norma de Construcción Sismoresistente Española. Asimismo, se sugiere incluir en la planificación de la construcción de la infraestructura educativa y en las guías de construcción de nuevos centros educativos, la seguridad de los alumnos, así como los valores esperados de las pérdidas frente al peligro sísmico.

### **Agradecimientos**

Se agradece la participación y colaboración en la inspección de centros escolares por parte de María Teresa Mínguez Arquitecta del Departament d'Ensenyament, de Josep Oriol, Arquitecto del servicio territorial del Departament d'Ensenyament de Girona y de Silvia Hermosilla de la Direcció General de Protecció Civil.



## 7 Evaluación de la seguridad de los hospitales públicos de Cataluña

### 7.1 Introducción

En Cataluña, el 97.9% de la población se encuentra asignada a un Área Básica de Salud (Departament de Salut, Generalitat de Catalunya 2011). La tasa de mortalidad estandarizada ha disminuido constantemente desde 1996, pasando de 7.641 a 5.97 muertes por cada mil habitantes en el 2008 (Departament de Sanitat i Seguretat Social 2001; 2011). Para el año 2010, la tasa de urgencias hospitalarias, entendida como el número de personas que acuden a estos servicios por año y por cada 1000 habitantes fue de 442.1. Este valor se ha mantenido en los últimos años. Para este mismo año, la tasa estandarizada de hospitalización fue de 122 pacientes por cada mil habitantes. El gasto per cápita en salud de la Generalitat, en el año 2009, se acercó a 1440 €. En términos del PIB, este gasto supone alrededor del 5.4% (Departament de Salut, Generalitat de Catalunya 2011).

Dada la importancia de los servicios hospitalarios y la cuantía de las inversiones realizadas en los hospitales y nuevas tecnologías para la atención de la salud de la población, es relevante evaluar su seguridad ante pérdidas potenciales por eventos sísmicos. De los hallazgos de la comisión europea, la pobreza y la falta de salud, así como la salud y el desarrollo están correlacionados tanto en países en vía de desarrollo como en los desarrollados. De esta manera, la inversión en la protección de la salud no sólo mejora la calidad de vida de los habitantes, sino que promueve condiciones favorables para el crecimiento económico y la competitividad (Flessa 2007). Por lo tanto, garantizar la seguridad de la infraestructura sanitaria ante cualquier potencial de pérdida comporta unos beneficios que van más allá de la reducción de las pérdidas económicas esperadas.

En el Plan Especial de Emergencias SÍSMICAS en CATaluña (Chavez et al. 1999, Susagna et al. 2006), se realizó una evaluación de la seguridad de los hospitales de la región, estimando los daños potenciales en términos de las intensidades macrosísmicas. La operatividad de las instalaciones se calificó de acuerdo a la matriz de probabilidad de daño. Por otro lado, Safina (2003) y Pujades et al. (2007) presentan una evaluación de la respuesta del conjunto de hospitales de Cataluña ante diferentes eventos sísmicos. Estos análisis combinan la estimación de daños en los hospitales con la estimación del número de heridos y su distribución geográfica, para determinar así la capacidad del sistema para atender los heridos. Los heridos se obtienen empleando tasas globales de afectación como las sugeridas en el ATC 13 (ATC 1985).

El objetivo de este capítulo es realizar una evaluación de la seguridad sísmica de los hospitales públicos de Cataluña, siguiendo un método simplificado basado en espectros de capacidad, de acuerdo a los procedimientos presentados en el Capítulo 4. Bajo este enfoque, es posible evaluar el comportamiento, el daño esperado y la seguridad sísmica de los edificios. A su vez, se estiman índices de funcionalidad y de la pérdida económica que son de utilidad para priorizar las instalaciones de acuerdo a los costos de los daños esperados.

### 7.1.1 Organización territorial del sistema sanitario de Cataluña

En 1985 se constituye la Xarxa de Hospitals Públics de Catalunya (XHUP) con 64 hospitales, de los cuales sólo 20 eran gestionados por la Generalitat de Catalunya a través de l'Institut Català de la Salut (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2003). El sistema sanitario de Cataluña se organiza territorialmente en Regiones Sanitarias (RS), Gobiernos territoriales de la Salud (GTS) y Áreas Básicas de Salud (ABS). Las ABS abarcan barrios o distritos en ambientes urbanos y municipios en zonas rurales. Estas unidades administran los servicios de atención primaria en el área de cobertura determinada por las condiciones de geográficas, sociales y epidemiológicas (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2008).

De los 946 municipios de Cataluña, 889 corresponden a una sola ABS. Los 57 restantes están distribuidos en dos clases: (i) 31 ciudades en las cuales la circunscripción municipal está dividida en diversas ABS y 26 municipios que tienen porciones de su circunscripción en ABS que no corresponden a la organización municipal. Los GTS representan la agrupación de varias áreas básicas de salud y tienen como fin desarrollar y coordinar las actividades de promoción de salud, prevención de enfermedades, salud pública y asistencia sociosanitaria primaria y especializada. Algunos GTS son equivalentes a las comarcas mientras que otros son de nivel infracomarcal o supracomarcal o bien engloban municipios de más de una comarca. Por último, las regiones sanitarias se organizan por sectores sanitarios y están dotadas de recursos de atención primaria y especializada (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2008).

Los hospitales de la región se clasifican en 3 niveles de atención: generales básicos (Nivel A) que responden a patologías que no requieren grados de especialización elevados; hospitales de referencia (Nivel B) que disponen de algunos recursos de alta tecnología y prácticas especializadas; por último, los hospitales de alta tecnología (Nivel C), en los que se encuentran supraespecialidades y nuevas tecnologías de diagnóstico y terapia.

La Figura 7-1 presenta las regiones sanitarias y la distribución territorial de los hospitales de la red pública de Cataluña, el número de camas y el nivel de atención. A este nivel se observa la concentración de instalaciones en las regiones Barcelona y Catalunya Central.

**Tabla 7-1 Numero de hospitales y camas según nivel de atención de los hospitales**

Nivel de atención	Camas hospitalarias		Hospitales	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
General básico	4491	26%	33	52%
Referencia	7528	44%	23	36%
Alta tecnología	5143	30%	8	13%
Total	17162	100%	64	100%



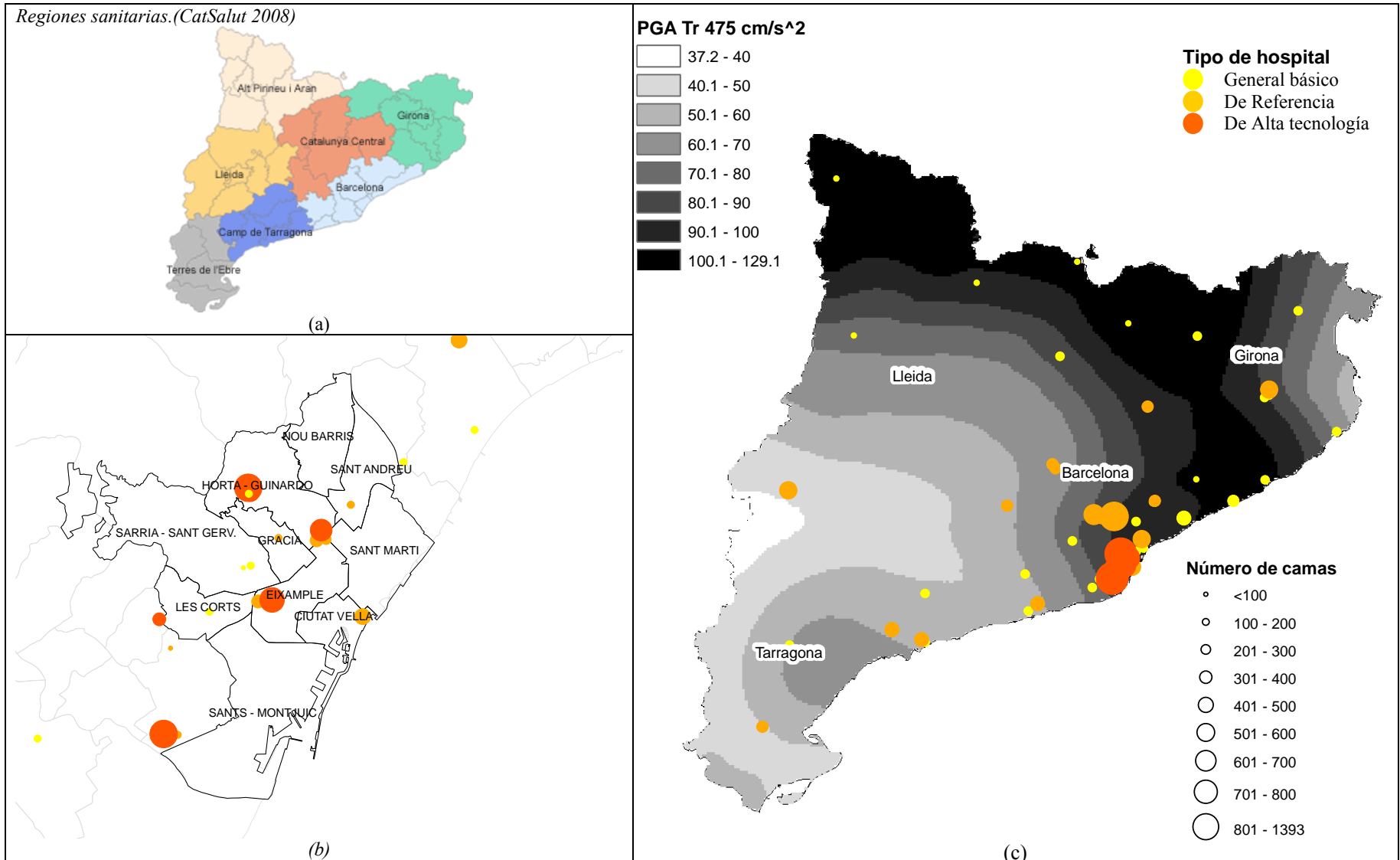
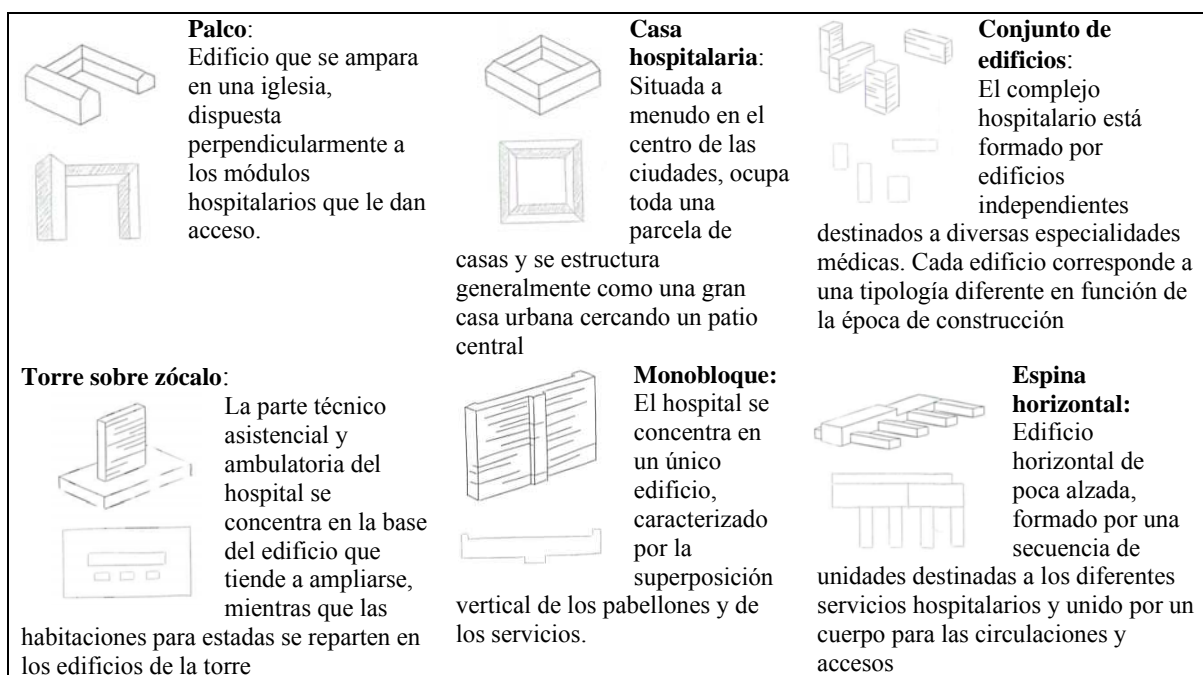


Figura 7-1 Regiones sanitarias y distribución de la red de hospitales públicos de Cataluña.

## 7.2 Descripción de las propiedades arquitectónicas y estructurales de los hospitales

### 7.2.1 Características arquitectónicas de la infraestructura hospitalaria

En general, la infraestructura sanitaria de Cataluña es heterogénea. Su construcción ha estado asociada a diferentes periodos, de acuerdo al crecimiento de la población, a las políticas en gestión de salud y a los avances de la medicina científica. En la Figura 7-2 se presentan esquemas de las tipologías arquitectónicas de los hospitales de Cataluña.



**Figura 7-2 Tipologías arquitectónicas de hospitales**

*Adoptado de Generalitat de Catalunya, Departament de Salut (2003)*

Los primeros equipamientos sanitarios corresponden a los hospitales de beneficencia del siglo XX, de carácter religioso y civil. Corresponden al modelo de casa hospitalaria, el hospital clásico en cuadrícula o en palco. Se trata de edificios que hoy se consideran históricos, como el hospital de San Antoni Abat en Vilanova i la Geltrú, o el Hospital de San Joan de Reus (ver Figura 7-5). Durante las primeras décadas del siglo XX se realizan centros de pabellones, diseñados para atender y aislar las enfermedades infecciosas. Ejemplo de este tipo es el Hospital de Sant Pau (ver Figura 7-4) (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2003).



(a) Hospital San Joan de Reus

(b) Hospital Comarcal San Antoni Abat

**Figura 7-3 Tipos de hospitales construidos antes de 1900 (a) Hospital San Joan de Reus; (b) Hospital Comarcal San Antoni Abat**



**Figura 7-4 Hospital de Sant Pau**

Entre 1950 y 1980, se construyen complejos hospitalarios y hospitales provinciales para solucionar la falta de instalaciones sanitarias. Son edificios monobloque (un edificio único con la superposición vertical de servicios con circulaciones verticales) o de torre con zócalo (Figura 7-5). Son hospitales con una superficie construida entre 20000 y 90000 metros cuadrados, con camas que oscilan entre 200 y 800. A este grupo pertenecen los hospitales de Vall d'Ebron en 1955, Girona (1956) Lleida (1956), Tarragona (1967), Bellvitge (1972) y Tortosa (1973). A final de los años setenta se proyectaron otros centros para la seguridad social siguiendo el ejemplo de hospitales provinciales. Entre estos se encuentran el Hospital de Terrassa, El Hospital General de Vic y el Germans Trias i Pujol. Dichos centros se terminaron de construir hacia el principio de los años ochenta (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2003).



(a) Hospital de Vall d'Hebron

(b) Hospital Universitario de Girona Dr. Josep Trueta

**Figura 7-5 Hospitales de tipo monobloque construidos entre 1950 y 1980 (a) Hospital de Vall d'Hebron; (b) Hospital Universitario de Girona Dr Josep Trueta**

En 1981 se realizó una evaluación de la calidad de los centros con fines de acreditación. Este proceso provocó transformaciones estructurales y funcionales en numerosos centros, que requerían inversiones considerables. Los centros que no contaron con recursos suficientes para cumplir los estándares tuvieron que renunciar a su actividad como hospitales de enfermos agudos y dedicarse a la atención de enfermedades crónicas o cerrarse. A partir de 1983 se prioriza la idea del hospital comarcal; el Espitau de Vielha y el de Mora d'Ebre son ejemplos de este tipo (Figura 7-6). Estos hospitales tienen una capacidad que oscila entre 30 y 300 camas, con volúmenes que varían entre 4000 y 46000 m<sup>2</sup> de superficie. Son instalaciones con una disposición horizontal; el programa funcional se desarrolla en los niveles bajos del edificio, reservando las plantas superiores para las unidades de hospitalización. El número de plantas sobre rasante oscila entre 3 y 6 (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2003).



(a) Espitau de Vielha



(b) Hospital Comarcal Mora d'Ebre

**Figura 7-6 Ejemplos de hospitales comarcales**

### 7.2.2 Tipologías estructurales de los edificios

En este estudio, la clasificación de los edificios de los hospitales en tipologías estructurales se basó en las descripciones del sistema estructural, número de plantas y periodo de construcción, disponibles en Safina (2003), así como en la descripción de las características estructurales y arquitectónicas de las instalaciones de salud en Cataluña (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2003; 2010). Así, los hospitales se describieron en términos de un conjunto de tipologías estructurales, sobre las cuales se determinaron porcentajes de participación a partir de la información disponible. En la Tabla 7-2 se presenta el listado de tipologías consideradas para el estudio de los hospitales.

**Tabla 7-2 Tipologías estructurales consideradas**

Tipologías estructurales	Descripción
M1.2	Muros de carga de mampostería de piedra tallada
M3.1	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera
M3.3	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería
M3.4	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado
RC 2	Muros de hormigón armado
RC3.2	Estructuras irregulares de hormigón armado con tabiquería de mampostería
RC4	Sistemas duales con muros y pórticos de hormigón armado
RC6	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón
S1	Estructuras metálicas resistentes al momento
S3	Estructuras metálicas con tabiquería de mampostería no reforzada

*Nota: Para cada tipología se consideran los casos de edificios altos (H) de altura mediana (M) y bajos (L).*

En la Tabla 7-3 presenta el listado de los hospitales, el número de camas, el nivel de atención y las tipologías estructurales consideradas para cada uno. En el Anexo E se presenta la base de datos correspondiente a los hospitales incluidos en este estudio.

**Tabla 7-3 Listado de hospitales con las tipologías estructurales asignadas, nivel de atención y número de camas**

No	Nombre centro	Tipologías estructurales			Nivel del hospital	Número de camas
1	Pius Hospital de Valls	RC3.2M			A	120
2	Hospital Comarcal Móra d'Ebre	RC3.2L			A	106
3	Hospital Tortosa Verge de la Cinta	RC3.2M			B	202
4	H. Univ. De Tarragona Joan XXIII	S3H			B	355
5	Hospital de Sant Pau i Santa Tecla	M3.4H			A	170
6	H. Universitari Sant Joan de Reus	M3.4M			B	314
7	Espitau Val d'Aran	RC3.2M			A	31
8	Hospital Comarcal del Pallars	RC3.2M			A	60
9	Fundació Sant Hospital	RC3.2M			A	80
10	Quinta de Salut L'Aliança	RC3.2H			A	132
11	Hospital de Santa Maria	M3.1L	RC3.2M		A	125
12	H. Univ. Arnau de Vilanova de Lleida	M3.3H	RC3.2M		B	434
13	Hospital Comarcal de la Selva	RC4M			A	120
14	Hospital de Puigcerdà	M3.4M			A	31
15	Hospital de Palamós	RC3.2M			A	96
16	Hospital Sant Jaume d'Olot	RC3.2M			A	82
17	Hospital Provincial Santa Caterina	RC3.2L			A	149
18	Clínica Girona, S. A	M3.4H	RC3.2H		A	131
19	H. Univ. De Girona Dr. Josep Trueta	RC3.2H			B	423
20	Hospital de Figueres	M3.3L	RC3.2L		A	101
21	Hospital de Campdevànol	M3.4L	RC3.2L		A	64
22	Hospital de Mataró	RC3.2L	S1L	RC6L	A	330
23	Institut Català d'Oncologia	RC3.2H			B	126
24	Hospital Comarcal de l'Alt Penedès	RC2H			A	110
25	Fundació Sanitària d'Igualada F.P	RC3.2M	RC3.2H		B	273
26	H. Materno-Infantil Vall d'Hebron	RC3.2H	S3L		C	466
27	Hospital General de Manresa	M3.3H	RC3.2H		B	224
28	Hospital de Viladecans	M3.3M	RC3.2M	S1L	A	116
29	Hospital General de Vic	RC3.2H			B	225
30	Corporació Sanitària Parc Tauli	RC3.2H	RC3.2M		B	587
31	Hospital de Terrassa	RC3.2H	RC3.2L		B	548
32	H. Universitari Germans Trias i Pujol	RC3.2H	RC3.2M		B	485
33	Fundació H. Comarcal Sant Antoni Abat	M1.2M	RC3.2L		A	34
34	Hospital Mútua de Terrassa	M3.4M	RC3.2H		B	548
35	Hospital de l'Esperit Sant	RC3.2M	RC4M		A	203
36	Hospital Residència Sant Camil	RC4M			B	179
37	Hospital de St.Celoni, Fund. Privada	M3.4L			A	60
38	Hospital de Sant Boi	S3M			A	127
39	Fundació Privada Hospital de Mollet	RC3.2M			A	167
40	Fundació Hospital de Sant Joan de Déu (Martorel)	RC3.2M			A	110
41	C. Hospitalari-Unit. Coronària Manresa	RC3.2M			B	290
42	Hospital Universitari de Bellvitge Princesps d'Espanya	RC3.2H	RC3.2L	RC4L	C	960
43	Consorci Hospital de la Creu Roja	RC3.2L	RC2M		B	259
44	Policlínica del Vallés, S.A	RC3.2M			A	115
45	Hospital General de Granollers	M3.4L	RC3.2M		B	348
46	Hospital de Sant Joan de Déu (Llobregat)	RC3.2H	RC3.2L		C	369
47	Hospital de Sant Jaume	RC3.2M			A	166
48	Hospital de Sant Bernabé	RC3.2M			A	141
49	H. de Trauma-Rehabilit. Vall d'Hebron	RC3.2M			C	355
50	Hospital General Vall d'Hebron	RC3.2H			C	762
51	Institut Guttmann	RC3.2L	RC2L	S3M	B	95
52	Hospital Casa de Maternitat	M3.3M			A	138
53	Hospital Sant Rafael	RC3.2M	RC3.2L		A	200
54	Fundació Puigvert, I.U.N.A	RC3.2M	RC3.2L		C	175
55	Hospital de l'Esperança	RC3.2H	RC3.2M		B	174
56	Hospital Dos de Maig	M3.1M			B	246
57	Hospital Clínic Provincial Barna	M3.3H	RC3.2H		C	922
58	Clínica Quirúrgica Adrià	M3.3M			A	74
59	Clínica Plató, Fundació Privada	M3.3H			A	198
60	Hospital del Mar	M3.4L	RC3.2H		B	458
61	Fund. Gest. San.Hosp.Sta. Creu i St. Pau	M3.3L	M3.3M	RC2M	C	777
62	Hospital Universitari Sagrat Cor	RC3.2H	S3M		B	379
63	Hospital Central - L'Aliança	M3.3H	M3.3M	RC3.2H	B	409
64	Hospital Municipal de Badalona, S.A	RC3.2M			A	150

Nota: A: Hospital general básico, B: Hospital de referencia, C Hospital de alta tecnología.

En la Figura 7-7 se presenta el porcentaje de edificios según tipologías estructurales. Los edificios más comunes (cerca del 60%) son de pilares y forjados de hormigón armado con muros de relleno irregulares de mampostería no reforzada (RC3.2). A su vez, los edificios de muros de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería (M3.3) y los muros de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado (M3.4) representan en conjunto cerca del 20% de los edificios. El porcentaje restante se distribuye entre las demás tipologías.

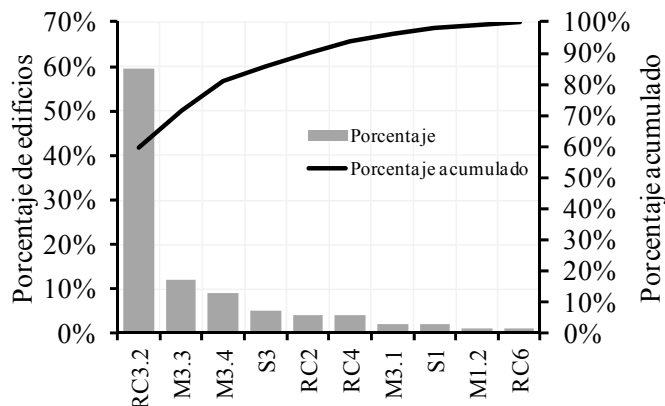


Figura 7-7 Porcentaje de edificios según tipologías estructurales

Los periodos de construcción de los edificios se obtuvieron a partir de los datos disponibles en Safina (2003), así como en el sistema de información de equipamientos de la Generalitat de Catalunya<sup>28</sup>. En cuanto a la distribución de edificios según periodos de construcción, se observa que cerca del 50% de los edificios fueron construidos antes de 1962 (ver Figura 7-8). Por lo tanto, estos edificios posiblemente no fueron diseñados ni construidos considerando requisitos de sismoresistencia. En la Figura 7-9 se presenta el porcentaje de camas también según los periodos de construcción de los hospitales. En esta Figura se observa que la proporción de camas en edificios, supuestamente sin diseño sismoresistente, también es cercana al 50%.

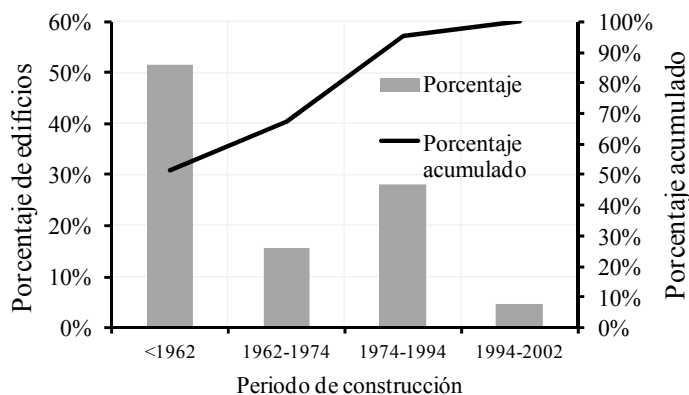
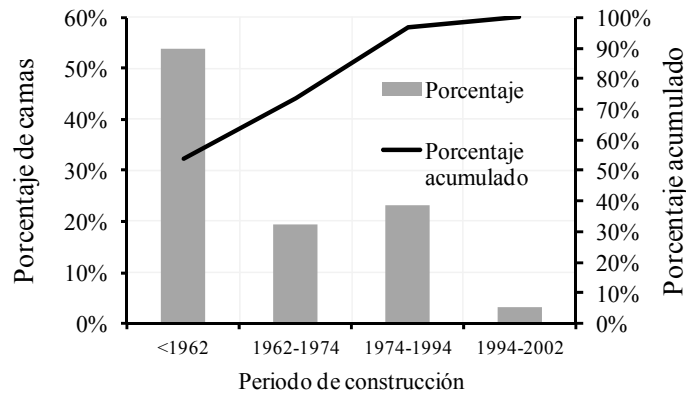


Figura 7-8 Porcentaje de edificio según periodo de construcción

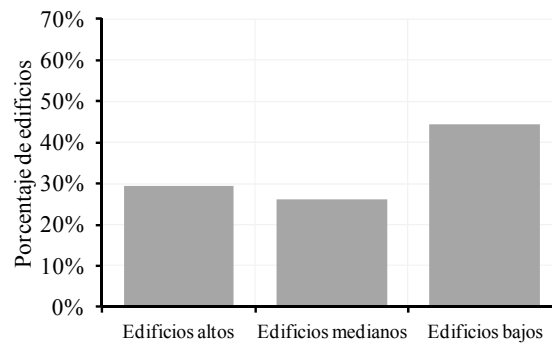
<sup>28</sup> Ver: Equipaments [En línea]. Disponible en: <http://www20.gencat.cat/portal/site/Equipaments> [Última consulta 19/11/2012].





**Figura 7-9 Porcentaje de camas según periodo de construcción**

Respecto a la distribución de edificios según rangos de altura, en la Figura 7-10 se observa que cerca del 45% son edificios bajos; cerca del 25% de los edificios son de mediana altura y el 30% corresponde a edificios altos.



**Figura 7-10 Porcentaje de edificios según rangos de altura**

### 7.3 Evaluación del daño y de la seguridad sísmica de los hospitales públicos de Cataluña

#### 7.3.1 Estimación del daño y evaluación seguridad estructural

El grado de daño medio de los edificios se estima usando el método simplificado de espectros de capacidad descrito en el Capítulo 4. Los edificios se clasifican en tipologías estructurales tal como se presentó en la Tabla 7-3. Para estas tipologías se adoptan los espectros de capacidad sugeridos en el proyecto RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003) y HAZUS (FEMA/NIBS 2003) entre otras fuentes (ver Tabla 7-4).

En cuanto a la demanda sísmica, se adaptan las formas espectrales sugeridas en el Eurocódigo 8 a los espectros de amenaza uniforme desarrollados por GEOTER (2008), para los periodos de retorno de 475 y 975 años. A su vez, para considerar los efectos de sitio, se utiliza la clasificación y caracterización de la respuesta sísmica de los diferentes tipos de suelo obtenida en un estudio de mesozonación elaborado para Cataluña (IGC 2011). Así, al comparar los espectros de demanda y de capacidad, se determina el punto de comportamiento de los edificios. Una vez conocido el desplazamiento en el punto de comportamiento, es posible estimar la probabilidad de exceder un determinado estado de daño haciendo uso de las curvas de fragilidad sugeridas en el proyecto RISK UE, así como en los manuales de HAZUS (FEMA/NIBS 2003).

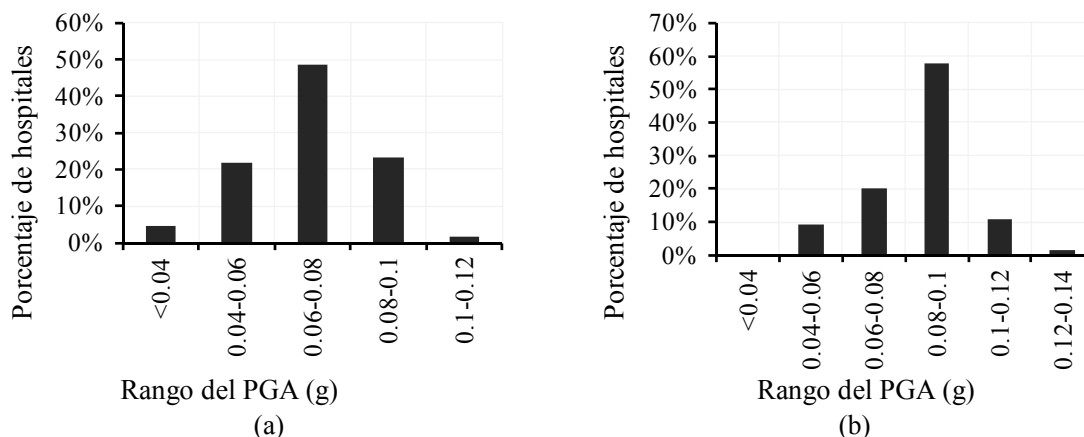
**Tabla 7-4 Referencias empleadas para definir los parámetros de los espectros de capacidad de los edificios**

Tipología	Referencia
M1.2	Giovinazzi (2005)
M3.1	
M3.3	Bonett (2003)
M3.4	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Università degli Studi di Genova (UNIGE); edificios sin diseño sismoresistente (pre code)
RC2	RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski (2003) Aristotle University of Thessaloniki (AUTH) edificios de nivel bajo de diseño sismoresistente (Low code)
RC3.2	Moreno (2006)
RC4	HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003)
RC6	Biondini et al. (2008) y Biondini et al. (2010)
S1	
S3	HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003)
S4	

Respecto a la evaluación del comportamiento y del daño esperado en los edificios caracterizados mediante tipologías estructurales adoptadas de HAZUS (FEMA/NIBS 2003), se señalan los siguientes aspectos:

- i) El desplazamiento en el punto de comportamiento del edificio se calcula a partir del cruce entre el espectro de capacidad de la tipología con el espectro de demanda correspondiente a la ubicación del edificio, siguiendo un procedimiento simplificado, denominado “aproximación de igual desplazamiento” (ATC 40 1996), que se describe en el Capítulo 4.
- ii) Para evaluar la probabilidad de excedencia de cada estado de daño, se emplean las curvas de fragilidad propuestas en el manual de HAZUS (FEMA/NIBS 2003). De esta manera, los valores medios y las desviaciones típicas que definen las curvas de fragilidad para cada estado de daño corresponden a los valores propuestos en el manual de HAZUS. Es importante resaltar que en estos casos, los umbrales de desplazamiento de cada estado de daño no se obtienen a partir de los desplazamientos espectrales de los puntos de cedencia y resistencia última del espectro de capacidad del edificio, tal como se presenta en la Tabla 4-6 (ver apartado 4.3.3), sino que dependen de valores de la deriva del edificio (como porcentaje de la altura del edificio) asociados a los diferentes estados de daño.

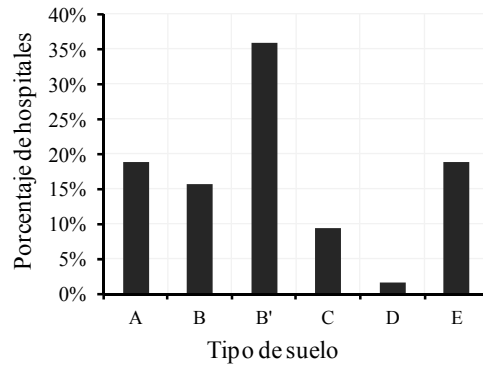
En cuanto a la acción sísmica, en la Figura 7-11 se presenta el porcentaje de hospitales según el PGA (en roca firme) al que se encuentran expuestos para periodos de retorno de 475 y 975 años. Se observa que para periodos de retorno de 475, cerca del 25% de los hospitales están expuestos a un PGA menor a 0.06 g. Cerca del 50% se encuentran expuestos a un PGA entre 0.06 g y 0.8 g y el porcentaje restante está expuesto a un PGA entre 0.8 g y 0.12 g. Para periodos de 975 años, cerca del 30% está expuesto a un PGA menor a 0.08 g. Cerca del 60% están expuestos a un PGA entre 0.08 g y 0.1 g. Alrededor del 10% están expuestos a un PGA entre 0.1 g y 0.12 g.



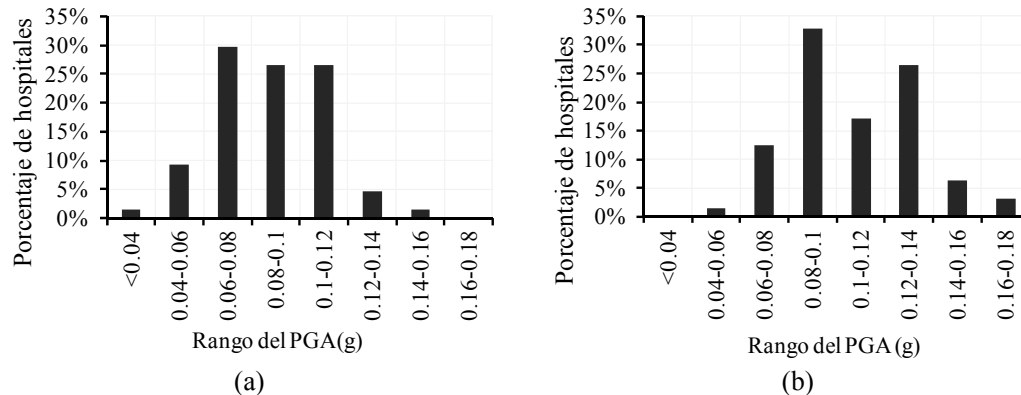
**Figura 7-11 Porcentajes de instalaciones según rangos del PGA; (a) Tr 475 años; (b) 975 años**



Para identificar los tipos de suelo, en la Figura 7-12 se presenta el porcentaje de hospitales según tipos de suelo. Menos del 20% se encuentra en roca firme (suelo tipo A), Un 15% en suelo tipo B; el 35% en suelo tipo B'. Cerca del 10% en suelo tipo C; un 20% en suelo tipo E. Una proporción baja de hospitales (menor al 2%) está ubicado en suelo tipo D. En la Figura 7-13 se presenta el porcentaje de hospitales por rangos del PGA considerando los tipos de suelo, para periodos de retorno de 475 años y 975 años.



**Figura 7-12 Porcentaje de edificios según tipos de suelo**



**Figura 7-13 Porcentaje de instalaciones según rangos de PGA con efectos de suelo**

En la Figura 7-13 se observa que al considerar los efectos de suelo, para eventos de periodo de retorno de 475 años, cerca del 42% de los edificios están expuestos a un PGA menor que 0.08g. Alrededor del 50% de los edificios están expuestos a un PGA entre 0.08 g y 0.12 g. Cerca del 7% de los edificios están expuestos a un PGA entre 0.12 g y 0.16 g. Para periodos de retorno de 975 años, cerca del 15% de los edificios están expuestos a un PGA menor que 0.08 g. Cerca del 50% están expuestos a una aceleración entre 0.08 g y 0.12 g. El porcentaje restante (35%) está expuesto a un PGA entre 0.14 g y 0.18 g

Respecto al daño esperado, la Tabla 7-5 y la Tabla 7-6 presentan el número y porcentaje de hospitales y camas según rangos del grado de daño medio normalizado para los escenarios de 475 y 975 años. Se observa que cerca del 16% de los hospitales tienen un daño mayor a 2 para un escenario de periodo de retorno de 475 años y por lo tanto, se considera que no cumplen con el nivel de seguridad Operacional propuesto por el Comité VISION 2000 (SEAOC 2000). Cerca del 45% de los edificios tienen un daño esperado que varía entre leve y moderado y para el porcentaje restante el daño varía entre nulos y leve (39%).

**Tabla 7-5 Porcentaje de hospitales y camas según rangos del grado de daño medio Tr 475 años**

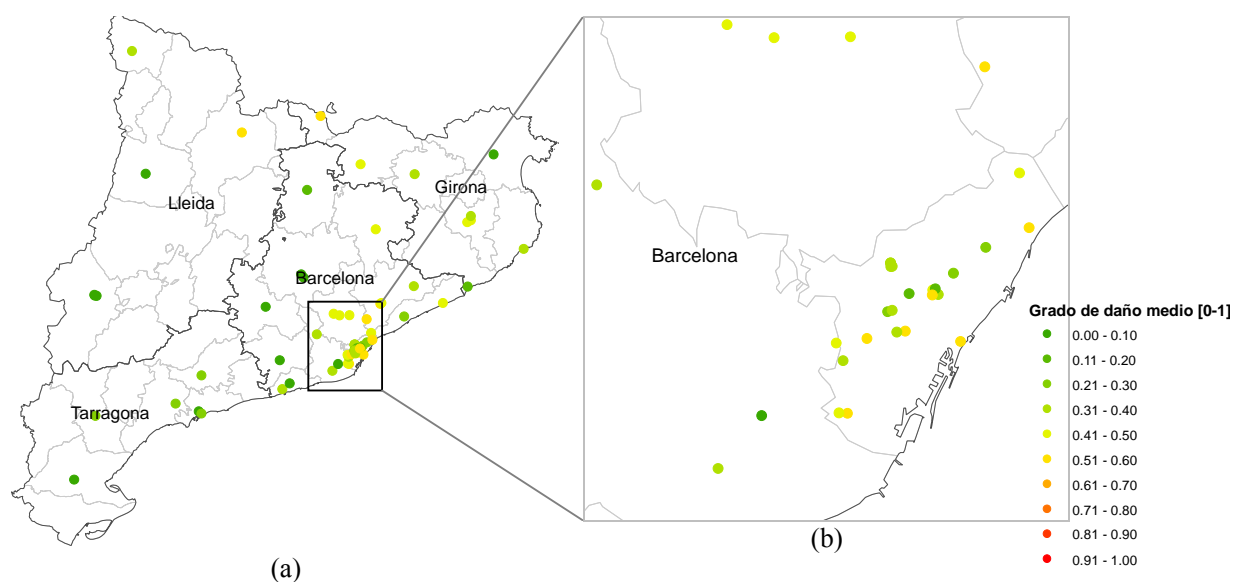
Grado de daño medio	Grado de daño medio normalizado	Número de hospitales	Porcentaje de hospitales	Número de camas	Porcentaje de camas
≤ 0.4	≤ 0.1	13	20%	2992	17%
0.4-0.8	0.11-0.2	4	6%	1092	6%
0.8-1.2	0.21-0.3	8	13%	1457	8%
1.2-1.6	0.31-0.4	16	25%	4471	26%
1.6-2.0	0.41-0.5	13	20%	4849	28%
2.0-2.4	0.51-0.6	10	16%	2301	13%
	Total	64	100	17162	100

Para escenarios de periodo de retorno de 975 años se estima que ningún hospital tenga un daño esperado mayor a 2.8 y por lo tanto, se considera que todos los hospitales cumplen con el requisito de seguridad de la vida propuesto por el comité VISION 2000 (SEAOC 1005). Cerca del 44% de los hospitales tienen un grado de daño medio que varía entre moderado y extensivo (entre 2.0 y 2.8). Cerca del 31% de los hospitales tienen daños entre leves y moderados y el 25% entre nulos y leves.

**Tabla 7-6 Porcentaje de hospitales y camas según rangos del grado de daño medio Tr 975 años**

Grado de daño medio	Grado de daño medio normalizado	Número de hospitales	Porcentaje de hospitales	Número de camas	Porcentaje de camas
≤ 0.4	≤ 0.1	7	11%	1525	8.9%
0.4-0.8	0.11-0.2	6	9%	1467	8.5%
0.8-1.2	0.21-0.3	3	5%	950	5.5%
1.2-1.6	0.31-0.4	9	14%	1599	9.3%
1.6-2.0	0.41-0.5	11	17%	2171	12.7%
2.0-2.4	0.51-0.6	18	28%	6464	37.7%
2.4-2.8	0.51-0.6	10	16%	2986	17.4%
	Total	64	100	17162	100

En la Figura 7-14 y en la Figura 7-15 se presenta un mapa de los hospitales según el grado de daño medio estimado para escenarios de periodo de retorno de 475 y 975 años. Se observa los valores del grado de daño medio esperado son más altos en los hospitales situados en las regiones del norte de Cataluña y Girona, en donde la peligrosidad sísmica también es mayor (ver Figura 7-1). También son relevantes los daños esperados en algunos hospitales de Barcelona; estos resultados reflejan que la estimación de daños no sólo depende de la acción sísmica, sino que también influye la fragilidad de los edificios.



**Figura 7-14 Grado de daño medio (normalizado) Tr 475 años**

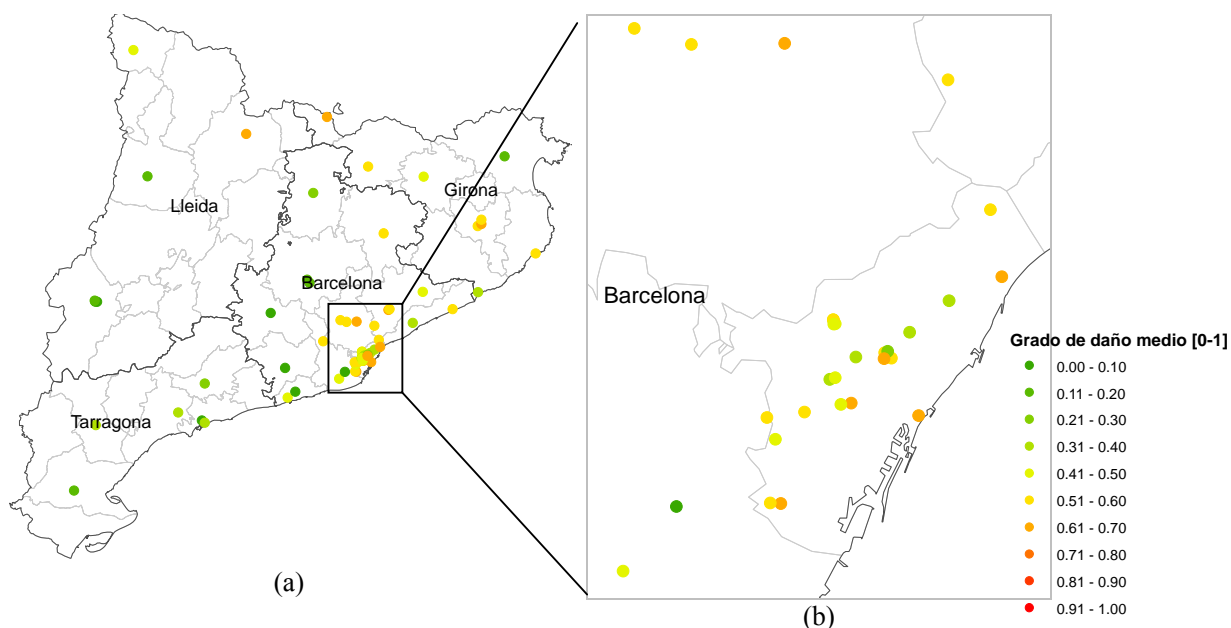


Figura 7-15 Grado de daño medio (normalizado) Tr 975 años

### 7.3.2 Índices de pérdida económica y de funcionalidad

En la Tabla 7-7 y en la En la Figura 7-16 se presentan el número y porcentaje de hospitales según índices de pérdida económica. En la Tabla 7-7 se observa cómo para periodos de retorno de 475 años, cerca del 76% de los hospitales tienen un índice de pérdida económica menor al 30% del coste de reposición. Las demás instalaciones tienen un índice de pérdida económica que varía entre el 30% y el 50%. Para periodos de retorno de 975 años, 52% de los hospitales tienen un índice de pérdida menor al 30% del coste de reposición del edificio. Los restantes tienen un índice de pérdida que varía entre el 30% y el 60%. En la Figura 7-17 se presentan mapas del índice de pérdida económica para los dos periodos de retorno considerados.

Tabla 7-7 Número y porcentaje de hospitales según rangos del Índice de pérdida económica

Índice de pérdida económica	Tr 475 años		Tr 975	
	Número de hospitales	Porcentaje de hospitales	Número de hospitales	Porcentaje de hospitales
<10%	8	13%	5	8%
10% - 20%	12	19%	10	16%
20%- 30%	28	44%	18	28%
30% -40%	15	23%	18	28%
40% - 50%	1	2%	11	17%
50% - 60%	0	0%	2	3%
60% - 70%	0	0%	0	0%
70% - 80%	0	0%	0	0%
80% - 90%	0	0%	0	0%
>90%	0	0%	0	0%
Índice de pérdida económica promedio		0.23		0.29

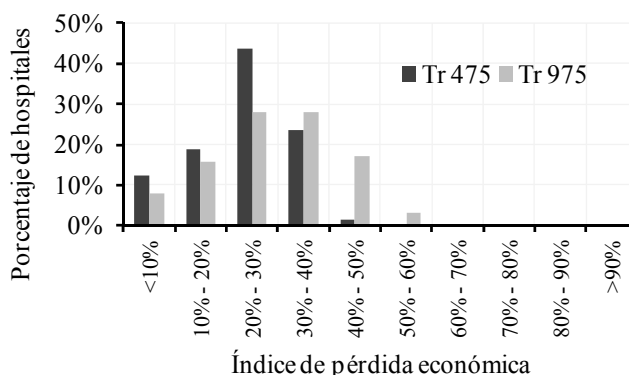


Figura 7-16 Porcentaje de hospitales según rangos del Índice de pérdida económica

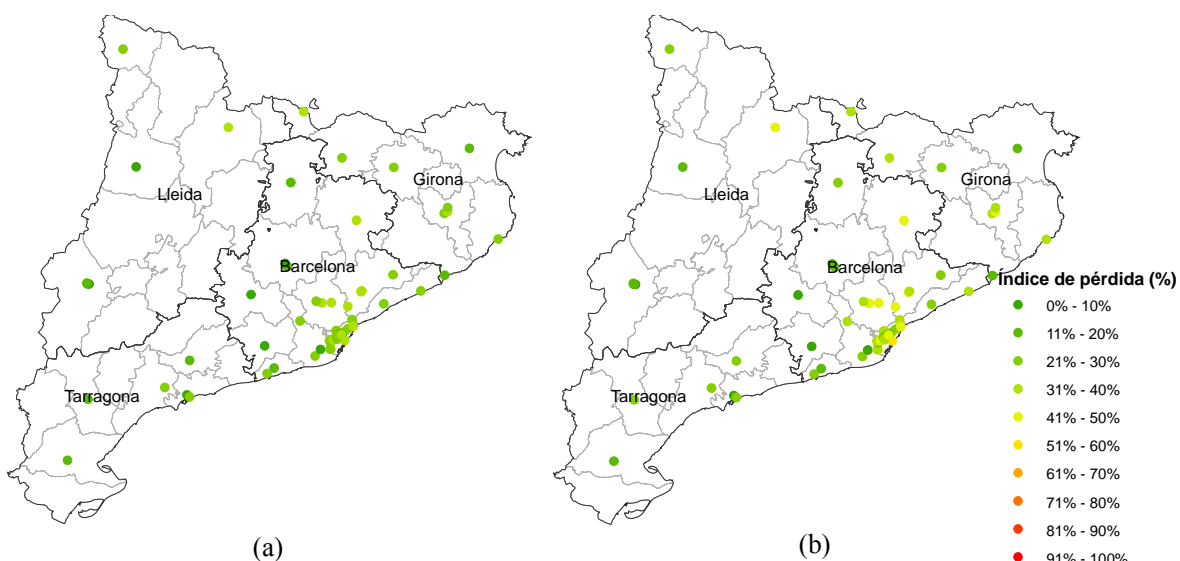


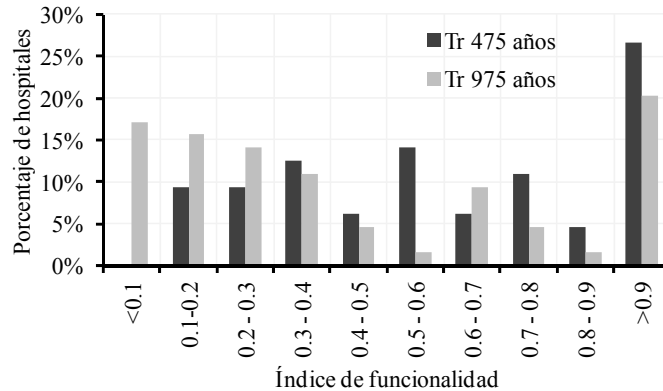
Figura 7-17 Índice de pérdida económica (% del valor del edificio) (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años

Por otro lado, en la Tabla 7-8 y en la Figura 7-18 se presentan los porcentajes de hospitales según rangos de valores del índice de funcionalidad. Se estima que, para escenarios de periodos de retorno de 475 años, cerca del 18% de los hospitales tendrían un índice de funcionalidad menor a 0.3 (bajo). Un 19% tendrían un índice de funcionalidad que varía entre 0.3 y 0.5 (incipiente). Un 20% tendría un índice de funcionalidad entre 0.5 y 0.7 (apreciable). Un 16% tendría un índice entre 0.7 y 0.9 (notable). Por último, un 27% tendrían un índice de funcionalidad mayor a 0.9 (alto).

Tabla 7-8 Número y porcentaje de hospitales según rangos del Índice de funcionalidad

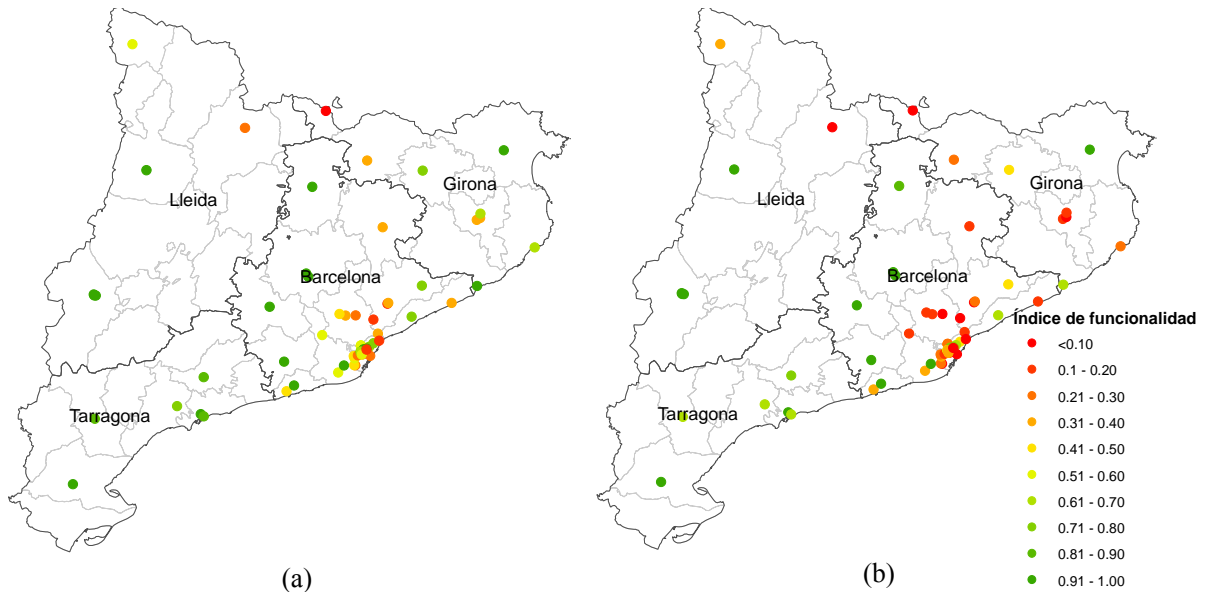
Índice de funcionalidad	Tr 475 años		Tr 975	
	Número de hospitales	Porcentaje de hospitales	Número de hospitales	Porcentaje de hospitales
<0.1	0	0%	11	17%
0.1 - 0.2	6	9%	10	16%
0.2 - 0.3	6	9%	9	14%
0.3 - 0.4	8	13%	7	11%
0.4 - 0.5	4	6%	3	5%
0.5 - 0.6	9	14%	1	2%
0.6 - 0.7	4	6%	6	9%
0.7 - 0.8	7	11%	3	5%
0.8 - 0.9	3	5%	1	2%
>0.9	17	27%	13	20%
Promedio		0.61		0.45

Para escenarios de periodos de retorno de 975 años, un 47% de los hospitales tendrían un índice menor a 0.3 (bajo). Un 16% tendrían un índice entre 0.3 y 0.5 (incipiente). Un 11% tendrían un índice entre 0.5 y 0.7 (apreciable). Un 7% un índice entre 0.7 y 0.9 (notable). Por último, un 20% tendría un índice mayor a 0.9 (alto).



**Figura 7-18 Porcentaje de hospitales según el índice de funcionalidad**

En la Figura 7-19 se presenta un mapa del índice de funcionalidad para los dos periodos de retorno considerados. Se observa que los hospitales con mayores daños estimados corresponden a los hospitales con menores índices de funcionalidad.



**Figura 7-19 Índice de funcionalidad de los hospitales (a) Tr 475 años; (b) Tr 975 años**

Como complemento a los resultados del grado de daño medio, al índice de pérdida y al índice de funcionalidad, en el Anexo F se presenta una metodología para evaluar un Índice de Vulnerabilidad de Hospitales que incluye estimaciones de la fragilidad estructural, no estructural, la capacidad para la respuesta a emergencias y la vulnerabilidad socioeconómica de la población. A su vez, se presenta un ejemplo de aplicación a los hospitales públicos de Cataluña.

Por último, en la Tabla 7-9 se presentan los resultados del grado de daño medio (normalizado entre 0 y 1) el índice de pérdida económica (como porcentaje del valor de reposición del edificio) y el índice de funcionalidad estimado para cada uno de los hospitales para los periodos de retorno de 475 y 975 años. Esta Tabla es útil para identificar las instalaciones con mayores daños esperados y así priorizar tanto estudios más detallados de la vulnerabilidad de los edificios, así como también acciones orientadas a la reducción de su fragilidad.

**Tabla 7-9 Resumen de resultados del Grado de daño medio, índice de pérdida económica y del índice de funcionalidad para cada hospital y para cada periodo de retorno**

ID	Institución	Grado de daño normalizado [0-1]		Índice de pérdida económica (%)		Índice de funcionalidad	
		475	975	475	975	475	975
14	Hospital de Puigcerdà	0.56	0.6	36%	40%	0.13	0.09
64	Hospital Municipal de Badalona, S.A	0.56	0.63	38%	46%	0.14	0.06
57	Hospital Clínic Provincial Barna	0.55	0.64	40%	54%	0.16	0.05
44	Policlínica del Vallès, S.A	0.54	0.6	36%	42%	0.17	0.09
63	Hospital Central - L'Aliança	0.54	0.61	39%	48%	0.17	0.08
39	Fundació Privada Hospital de Mollet	0.53	0.6	35%	42%	0.19	0.09
52	Hospital Casa de Maternitat	0.52	0.59	35%	41%	0.22	0.11
60	Hospital del Mar	0.52	0.62	37%	51%	0.21	0.07
9	Fundació Sant Hospital	0.51	0.62	34%	45%	0.23	0.07
23	Institut Català d'Oncologia	0.51	0.64	35%	50%	0.23	0.06
54	Fundació Puigvert, I.U.N.A	0.5	0.58	32%	38%	0.26	0.12
30	Corporació Sanitària Parc Tauli	0.49	0.6	33%	45%	0.26	0.09
21	Hospital de Campdevàno	0.47	0.52	29%	31%	0.31	0.22
31	Hospital de Terrassa	0.47	0.59	31%	42%	0.32	0.1
17	Hospital Provincial Santa Caterina	0.46	0.55	28%	32%	0.34	0.16
18	Clínica Girona, S. A	0.46	0.61	30%	45%	0.34	0.07
29	Hospital General de Vic	0.45	0.57	31%	42%	0.35	0.12
45	Hospital General de Granollers	0.45	0.51	31%	35%	0.37	0.22
47	Hospital de Sant Jaume	0.45	0.56	30%	38%	0.35	0.14
32	H. Universitari Germans Trias i Pujol	0.44	0.53	30%	37%	0.39	0.18
34	Hospital Mútua de Terrassa	0.43	0.56	28%	38%	0.42	0.14
42	Hospital Universitari de Bellvitge Prínceps d'Espanya	0.42	0.51	30%	39%	0.44	0.23
33	Fundació H. Comarcal Sant Antoni Abat	0.4	0.46	20%	26%	0.49	0.34
46	Hospital de Sant Joan de Déu (Llobregat)	0.4	0.51	26%	33%	0.49	0.22
7	Espitau Val d'Aran	0.39	0.45	26%	30%	0.52	0.36
40	Fundació Hospital de Sant Joan de Déu (Martorel)	0.39	0.54	27%	36%	0.51	0.18
43	Consorci Hospital de la Creu Roja	0.39	0.47	24%	26%	0.52	0.31
53	Hospital Sant Rafael	0.39	0.48	26%	31%	0.53	0.28
56	Hospital Dos de Maig	0.39	0.5	17%	26%	0.51	0.24
28	Hospital de Viladecans	0.37	0.45	25%	29%	0.58	0.36
49	H. de Trauma-Rehabilit. Vall d'Hebron	0.37	0.48	25%	31%	0.58	0.3
50	Hospital General Vall d'Hebron	0.37	0.51	26%	35%	0.58	0.23
62	Hospital Universitari Sagrat Cor	0.37	0.46	27%	38%	0.58	0.33
59	Clínica Plató, Fundació Privada	0.35	0.44	25%	29%	0.61	0.37
15	Hospital de Palamós	0.34	0.5	24%	33%	0.65	0.24
26	H. Materno-Infantil Vall d'Hebron	0.34	0.47	24%	33%	0.66	0.32
16	Hospital Sant Jaume d'Olot	0.32	0.41	23%	27%	0.71	0.47
19	H. Univ. De Girona Dr. Josep Trueta	0.32	0.52	23%	37%	0.68	0.2
37	Hospital de Sant Celoni	0.31	0.4	22%	26%	0.72	0.49
22	Hospital de Mataró	0.3	0.33	20%	22%	0.74	0.68
51	Institut Guttmann	0.3	0.36	22%	24%	0.74	0.6
35	Hospital de l'Esperit Sant	0.29	0.4	22%	25%	0.76	0.5
58	Clínica Quirúrgica Adrià	0.29	0.39	23%	27%	0.77	0.53
6	H. Universitari Sant Joan de Reus	0.28	0.36	21%	24%	0.79	0.61
5	Hospital de Sant Pau i Santa Tecla	0.25	0.32	21%	23%	0.83	0.68
2	Hospital Comarcal Móra d'Ebre	0.24	0.34	20%	23%	0.86	0.64
1	Pius Hospital de Valls	0.22	0.29	20%	22%	0.88	0.77
61	Fund. Gest. San.Hosp.Sta. Creu i St. Pau	0.19	0.28	17%	20%	0.92	0.79
55	Hospital de l'Esperança	0.18	0.31	18%	23%	0.94	0.72
13	Hospital Comarcal de Blanes	0.16	0.33	18%	17%	0.95	0.66
48	Hospital de Sant Bernabé	0.16	0.26	18%	21%	0.96	0.83
20	Hospital de Figueres	0.09	0.17	10%	13%	0.99	0.95
3	Hospital Tortosa Verge de la Cinta	0.07	0.16	13%	18%	1	0.96
27	Centre Hospitalari	0.07	0.17	11%	16%	1	0.95
8	Hospital Comarcal del Pallars	0.06	0.17	9%	18%	1	0.95
12	H. Univ. Arnau de Vilanova de Lleida	0.05	0.13	11%	17%	1	0.97
36	Hospital Residència Sant Camil	0.03	0.07	13%	15%	1	1
38	Hospital de Sant Boi	0.02	0.03	4%	6%	1	1
41	C. Hospitalari-Unit. Coronària Manresa	0.02	0.11	6%	15%	1	1
4	H. Univ. De Tarragona Joan XXIII	0.01	0.02	4%	5%	1	1
11	Hospital de Santa Maria	0.01	0.06	6%	13%	1	1
24	Hospital Comarcal de l'Alt Penedès	0.01	0.02	6%	9%	1	1
25	Fundació Sanitària d'Igualada F.P	0.01	0.06	3%	10%	1	1
10	Clínica de Ponent	0	0	1%	2%	1	1

## 7.4 Resumen y discusión

En este Capítulo se ha presentado una evaluación de la seguridad sísmica de un conjunto de hospitales públicos de Cataluña. El análisis se ha desarrollado para escenarios definidos por sismos con periodos de retorno de 475 y 975 años y considerando los niveles de comportamiento propuestos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995). Para este fin los hospitales se clasificaron en tipologías estructurales de acuerdo a la información disponible en Safina (2003), así como en informes del Departament de Salut (Generalitat de Catalunya. Departament de Salut 2003). Para estas tipologías se adoptan los espectros de capacidad propuestos en el proyecto RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003), HAZUS (FEMA/NIBS 2003) para edificios de estructura metálica y Biondini et al. (2008) y Biondini et al. (2010) para el caso de edificios construidos con sistemas industrializados.

De los datos disponibles se encontró que cerca del 60% de los edificios son de pilares y forjados de hormigón armado con muros de relleno irregulares de mampostería no reforzada (RC3.2). Alrededor del 20% de los edificios son de muros de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería (M3.3) y/o de muros de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado (M3.4). El 20% restante corresponde a estructuras metálicas y estructuras de muros de hormigón armado, entre otras tipologías. En cuanto a la distribución de edificios según periodos de construcción, se observa que cerca del 50% de los hospitales fueron construidos antes de 1962 (ver Figura 7 8). Por lo tanto, estos edificios posiblemente no fueron diseñados ni construidos considerando requisitos de sismoresistencia.

En cuanto a la acción sísmica (considerando efectos de suelo), para eventos de periodo de retorno de 475 años, cerca del 42% de los hospitales están expuestos a un PGA menor que 0.08 g. Alrededor del 50% de los hospitales están expuestos a un PGA entre 0.08 g y 0.12 g. Cerca del 7% de los hospitales están expuestos a un PGA entre 0.12 g y 0.16 g. Para periodos de retorno de 975 años, cerca del 15% de los hospitales están expuestos a un PGA menor que 0.08 g. Cerca del 50% están expuestos a una aceleración entre 0.08 g y 0.12 g. El porcentaje restante (35%) está expuesto a un PGA entre 0.14 g y 0.18 g.

En este análisis, el grado de daño medio de los edificios se ha estimado usando un método simplificado basado en espectros de capacidad. De los resultados, se concluye que cerca del 16% de los hospitales tienen un daño mayor a 2 para un escenario de periodo de retorno de 475 años y por lo tanto, se considera que no cumplen con el nivel de seguridad Operacional propuesto por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995). Cerca del 45% de los hospitales tienen un daño esperado que varía entre leve y moderado. El 39% de los hospitales tienen un grado de daño esperado que varía entre nulo y leve (39%).

Para escenarios de periodo de retorno de 975 años se estima que ningún hospital tenga un daño esperado mayor a 2.8 y por lo tanto, se concluye que todos si cumplen con el requisito de seguridad de la vida propuesto por el comité VISION 2000 (SEAOC 1995). Cerca del 44% de los hospitales tienen un grado de daño medio esperado que varía entre moderado y extensivo. Cerca del 31% de los hospitales tienen daños entre leves y moderados y el 25% restante entre nulos y leves.

Como complemento a la evaluación de la seguridad de los hospitales, se realizaron estimaciones de índices de pérdida económica así como de índices de la funcionalidad de las instalaciones, considerando los periodos de retorno arriba indicados. De los resultados de este análisis se encuentra que para escenarios de periodos de retorno de 475 años, la mayoría de los hospitales (cerca del 76%) tienen un índice de pérdida económica menor al 30% del coste de reposición. Las demás instalaciones tienen un índice de pérdida económica que varía entre el 30% y el 50%. Para escenarios de periodo de retorno de 975 años, cerca del 52% de los hospitales tienen un índice de pérdida menor al 30%. Los restantes tienen un índice de pérdida que varía entre el 30% y el 60%.

Por otro lado, se estima que para escenarios de periodos de retorno de 475 años, cerca del 18% de los hospitales tendrían un índice de funcionalidad menor a 0.3 (bajo). Un 19% tendrían un índice de funcionalidad que varía entre 0.3 y 0.5 (incipiente). Un 20% tendría un índice de funcionalidad entre 0.5 y 0.7 (apreciable). Un 16% tendría un índice entre 0.7 y 0.9 (notable). Por último, un 27% tendrían un índice de funcionalidad mayor a 0.9 (alto)

Para escenarios de periodos de retorno de 975 años, un 47% de los hospitales tendrían un índice menor a 0.3 (bajo). Un 16% tendrían un índice entre 0.3 y 0.5 (incipiente). Un 11% tendrían un índice entre 0.5 y 0.7 (apreciable). Un 7% un índice entre 0.7 y 0.9 (notable). Por último, un 20% tendría un índice mayor a 0.9 (alto).

Los resultados obtenidos en este análisis permiten establecer prioridades entre los hospitales estudiados de acuerdo a los daños estimados, el índice de funcionalidad y el índice de pérdida económica. Estos datos son relevantes para el desarrollo tanto de medidas de prevención de riesgos, como para la organización para la respuesta a emergencias en la región.

Dada la importancia de los hospitales en el bienestar de la comunidad, así como su valor económico, es relevante que en la gestión de esta infraestructura se consideren los costos asociados a su pérdida por eventos sísmicos. Al respecto, los resultados presentados en este Capítulo permiten dimensionar los daños en la infraestructura, así como establecer órdenes de magnitud de las pérdidas económicas potenciales. No obstante, se señala que es deseable el desarrollo de estudios más detallados, en los cuales se pueda modelar con mayor precisión las propiedades estructurales de los edificios y así aumentar la confiabilidad del estudio. Para este fin, es necesario tener acceso a los hospitales con el fin de desarrollar inspecciones de las instalaciones. Asimismo, es preciso consultar planos arquitectónicos, estructurales, memorias de construcción, entre otras fuentes de información, que sean de utilidad tanto para clasificar los edificios como para estudiar su vulnerabilidad sísmica.

Por otro lado, se resalta que la vulnerabilidad sísmica de los hospitales no sólo depende del comportamiento de los elementos estructurales. También influyen el comportamiento de los elementos no estructurales, así como la capacidad del personal y de las instituciones en caso de emergencia. En este sentido, es recomendable que el análisis de la seguridad y riesgo sísmico de los centros de salud se desarrolle bajo un enfoque multidisciplinario, en el cual participen responsables de los servicios sanitarios. Al respecto, en el Anexo F se presenta una metodología para evaluar un Índice de Vulnerabilidad de Hospitales en el cual se consideran estos aspectos en conjunto y por lo tanto, se considera como un punto de partida para una evaluación más amplia de la seguridad de los hospitales.



## 8 Metodología para la evaluación del beneficio-costos de la mitigación del riesgo sísmico en edificios esenciales

### 8.1 Introducción

La decisión sobre cuánta protección se requiere para un bien expuesto a algún peligro está relacionada con las pérdidas que pueden derivarse del peligro y de la capacidad y/o voluntad del propietario para asumir dichas pérdidas.

Respecto al peligro sísmico, Schulze et al. (1982) presentan un método para evaluar los beneficios y los costos de la aplicación de los códigos sismoresistentes, evaluando la voluntad de pago de los individuos por edificios más seguros. Para esto, se plantea un modelo de decisión con dos estados probables: sin evento, o con evento, para los cuales se describen los posibles resultados del individuo: sin daños y sin aumentos en la tasa de mortalidad, o con pérdidas  $L$  y aumentos en la tasa de mortalidad  $R$ , respectivamente.

Bajo el supuesto que los códigos sismoresistentes reducen tanto las pérdidas económicas  $L$  como el riesgo de muerte  $R$ , se adoptan las funciones  $R(c)$  y  $L(c)$ , en donde  $c$  representa el nivel de exigencia de los códigos sismoresistentes, de tal manera que entre mayores valores  $c$  (entre más exigentes sean los códigos), las pérdidas esperadas son menores ( $R'(c)$  y  $L'(c) < 0$ ). Al maximizar los resultados esperados para el individuo respecto al índice  $c$ , se encuentra que el nivel de seguridad óptimo es aquel en el cual los costos de adquirir una unidad adicional de seguridad, equivalgan a los beneficios de obtener una reducción en el riesgo de muerte y en las pérdidas económicas.

En este análisis, la definición de las funciones  $R(c)$  y  $L(c)$  influye en la valoración de los beneficios y costos, y por lo tanto, en las decisiones sobre la seguridad de los edificios. Para establecer estas relaciones es necesario modelar la peligrosidad sísmica, el comportamiento de los edificios y las pérdidas esperadas. Según el nivel de resolución que se desee del estudio, pueden realizarse análisis que consideren eventos de determinado periodo de retorno, o bien un conjunto de eventos potencialmente dañinos dada la peligrosidad de la zona. En cuanto a los edificios, pueden desarrollarse modelos estructurales para edificios específicos, o curvas de fragilidad o de vulnerabilidad representativas para una tipología estructural.

Una vez establecida la relación entre las propiedades estructurales de los edificios y las pérdidas esperadas ante la peligrosidad, el nivel óptimo de seguridad se encuentra minimizando los costos de construcción y de pérdida, sujetos a restricciones del comportamiento de la estructura.

Liu y Neghabat (1972) presentan un modelo para determinar la intensidad macrosísmica para la que debe diseñarse una estructura para encontrar un diseño óptimo considerando los costos (construcción más daños estructurales esperados) durante la vida útil del proyecto. Wen (2001) realiza un análisis similar considerando, para un periodo de retorno específico, espectros de amenaza uniforme. Los costos se asocian al daño de la estructura y contenidos, costos de reubicación, pérdidas indirectas, heridos y fallecidos. En Liu et al. (2004), la optimización además de considerar los costos de la vida útil, considera los costos iniciales de la construcción y el grado de complejidad del diseño.

En estos análisis, al igual que en los criterios de seguridad del comité VISION 2000 (SEAOC 1995), el comportamiento de los edificios se define en términos de la deriva. Para determinar el daño, se consideran diferentes estados de daño o de comportamiento, descritos por rangos de deriva sugeridos en estándares de diseño. A su vez, para cada nivel de comportamiento y para cada tipo de costo, se asignan valores específicos de pérdida.

En los trabajos arriba mencionados, los diseños óptimos se establecen para un determinado nivel de seguridad, asociados a eventos de una determinada probabilidad de ocurrencia. Takahashi et al. (2004) amplían el alcance de la evaluación de pérdidas (durante la vida útil del proyecto), considerando todos los eventos probables que pueden afectar a los edificios. Para esto, se simula el proceso de ruptura, la propagación y atenuación de las ondas sísmicas, la amplificación de suelos, la respuesta dinámica estructural y la generación de los costos de daños en la estructura, contenidos y pérdidas de beneficios de producción. Esta metodología se aplica considerando una sola fuente sísmica para definir, por ejemplo y en este trabajo de Takahashi et al. (2004), la efectividad de la inclusión de amortiguadores en un edificio de pórticos de acero.

Así, en éste último enfoque se evalúan alternativas específicas para la reducción de la vulnerabilidad de un edificio particular, por lo tanto, el detalle del estudio y la información requerida es considerable. Goda y Hong (2006) presentan un método más general para el diseño óptimo de edificios, simplificando el modelo de la respuesta estructural. En esta metodología se desea maximizar la diferencia entre los beneficios y costos durante la vida útil de un edificio expuesto al peligro sísmico. A partir de la identificación y caracterización de las fuentes sísmicas que potencialmente pueden afectar a los edificios, se generan eventos utilizando relaciones de recurrencia de magnitudes. Luego, para cada evento y usando leyes de atenuación propias del lugar, se calcula la aceleración espectral según el periodo estructural y ubicación del edificio. En este estudio se suponen costos para los daños de la estructura y de los contenidos, reubicación, pérdidas indirectas, heridos y fallecidos. Estos costos varían según los estados de daño esperados en el edificio.

En consecuencia, el objetivo de los modelos de optimización es identificar un conjunto de propiedades estructurales que reduzca los costos esperados o maximice los beneficios. Si se considera que el diseño óptimo implica que los costos de la seguridad sean iguales a la reducción esperada de pérdidas, entonces una razón de beneficio-costo será igual a 1. De esta manera, se observa que los análisis de beneficio-costo son casos específicos de los procedimientos de optimización, en los cuales se comparan dos alternativas de diseño para evaluar cuál de éstas es más favorable.

El documento FEMA 255 (1994) presenta un manual para la evaluación de relaciones de beneficio-costo para edificios gubernamentales. Por un lado, los costos de la rehabilitación se adoptan de proyectos ya ejecutados. Por otro, se sugiere que los beneficios se calculen en forma probabilista ya que dependen de las estimaciones del comportamiento del edificio en futuros terremotos, el momento en el que éstos ocurren y su severidad. Los beneficios se expresan en términos de la reducción de daños en el edificio y contenidos, reducción de ingresos, costos de reubicación, pérdida de servicios gubernamentales y heridos. Como complemento, en el documento FEMA 256 (1994) se incluye información del valor de los servicios públicos, las tasas de descuento y alternativas para evaluar los costos de la vida humana.

Ya que los análisis de beneficio-costo son útiles para tomar decisiones respecto a la seguridad de las instalaciones, es necesario considerar que tales instalaciones están potencialmente expuestas, a lo largo de su vida útil, a todos los posibles movimientos de suelo, dada su ubicación y las características de sismicidad de su locación (Hadjian 2002; Takahashi et al. 2004; Goda y Hong 2006). Bajo estas consideraciones, Smyth et al. (2004) y Smyth et al. (2004 b), presentan un análisis de beneficio-costo del reforzamiento de edificios residenciales y de centros educativos, respectivamente. El valor esperado de las pérdidas es estimado usando curvas de fragilidad basadas en el PGA. Así, para una ventana de tiempo, se desarrolla un análisis de costos durante la vida útil de las instalaciones, considerando las pérdidas potenciales asociadas a todos los posibles eventos a los que se encuentra expuesta la estructura.

Un trabajo similar es desarrollado por Kappos & Dimitrakopoulos (2008). En este análisis se evalúa la viabilidad económica del reforzamiento sísmico de un conjunto heterogéneo de edificios usando razones de beneficio-costo, así como análisis de costos durante la vida útil del proyecto. Los costos incluidos en el estudio son el daño de los edificios, las pérdidas por rentas, los costos de reubicación, la pérdida de contenidos, la interrupción del negocio y vidas humanas. El daño de los edificios es evaluado usando curvas de fragilidad basadas en la intensidad macrosísmica.

Además de cuantificar los beneficios y costos, se debe reconocer que la decisión sobre la reducción de la vulnerabilidad sísmica también es sensible al momento en el que se realiza tal intervención, considerando la vida útil del proyecto. En este sentido, Nuti y Vanzi (2006) presentan un modelo para evaluar la viabilidad económica del reforzamiento sísmico en términos de los beneficios obtenidos durante la vida útil (restante) de la instalación. El comportamiento estructural de los edificios se modela con curvas de fragilidad para los estados actual y reforzado. Por otro lado, se emplean leyes de recurrencia de terremotos para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de determinada magnitud. Con estos datos se desarrolla un análisis de confiabilidad para estimar la tasa de excedencia de estados límites de la estructura en cada caso. Con base en estos parámetros se evalúa si la intervención estructural es conveniente o no.

En la industria de seguros, los enfoques probabilistas son los más utilizados para la valoración de pérdidas y tienen como objetivo estimar la pérdida promedio anual en los edificios. En este contexto, (Grossi 2005) propone un análisis de beneficio-costos en el cual los beneficios de la mitigación se calculan como el valor presente de la reducción de la pérdida anual esperada. Estos modelos son considerados como los más apropiados para evaluar las estrategias de mitigación, ya que muestran las ventajas de la reducción de riesgos en términos de las primas que deben pagarse para cubrir tales riesgos. Extensiones de estos modelos han sido desarrolladas por Mora et al. (2009) y han sido aplicadas para valorar los casos de reducción de riesgos en hospitales y centros educativos de Bogotá.

A partir de las anteriores experiencias, se propone un análisis de beneficio-costos cuyo objetivo es evaluar la viabilidad del reforzamiento sísmico de un conjunto de edificios esenciales. Los beneficios se consideran como la reducción del valor presente de la pérdida anual esperada. La estimación de las pérdidas se realiza para un conjunto de eventos probables. En cuanto al comportamiento de los edificios, éstos se clasifican en tipologías estructurales para los cuales se definen curvas de pérdida a partir de su espectro de capacidad.

En el caso de los edificios y sistemas esenciales, la decisión sobre la reducción del riesgo sísmico requiere una adecuada medición de los beneficios asociados a su funcionamiento. Para esto, es necesario considerar, además de las pérdidas económicas, la producción de sus servicios y sus efectos en el bienestar y calidad de vida de las comunidades que atienden. De esta manera, las variables de decisión corresponden a las pérdidas directas, a la afectación de sus ocupantes, a la pérdida de funcionalidad y de producción de servicios.

A través de esta metodología se considera que se pueden establecer priorizaciones y evaluaciones preliminares de los beneficios que pueden obtenerse en la mitigación de un conjunto de edificios esenciales. En las siguientes secciones se presentan detalles de esta metodología.

## **8.2 Metodología propuesta para la evaluación de beneficio-costos**

La metodología para la evaluación de beneficio-costos sigue la estructura de modelos de catástrofe (Grossi y Kuhnreuter 2000; Cardona et al. 2010). En estos modelos se consideran diferentes etapas o módulos en los cuales se evalúa la peligrosidad de la zona de interés, se identifican las propiedades (valor, ubicación y tipo estructural) de la infraestructura expuesta a la peligrosidad, se modela su vulnerabilidad y se estiman las pérdidas potenciales. A partir de estos resultados y de la estimación de los costos asociados al reforzamiento, se llega a una relación de beneficio-costos. En la Figura 8-1 se presenta un esquema de esta metodología.

Para la estimación de pérdidas se adopta un enfoque probabilista en el cual, para un conjunto de eventos potenciales, caracterizados por su magnitud y frecuencia de ocurrencia, se calculan diferentes variables de decisión como las pérdidas económicas, efectos sobre la población y pérdidas en servicios y funcionalidad. De esta manera, se obtienen tasas de excedencia de pérdida para cada variable de decisión. El procedimiento para el análisis de pérdidas y de beneficio-costos se resume en los siguientes pasos:

*Módulo de peligrosidad sísmica*

- i) Identificación de las principales fuentes sísmicas y definición de su sismicidad
- ii) Generación de un conjunto aleatorio de eventos
- iii) Atenuación del movimiento del suelo

*Módulo de exposición*

- iv) Ubicación y valor de los edificios
- v) Identificación de tipologías estructurales

*Módulo de vulnerabilidad*

- vi) Definición del valor esperado de la pérdida económica
- vii) Evaluación de la distribución de la probabilidad de la pérdida
- viii) Relación entre el daño de los edificios y los efectos en los ocupantes
- ix) Relación entre el daño en los edificios y la reducción en la funcionalidad y producción de servicios

*Módulo de riesgo*

- x) Evaluación de la curva de excedencia de pérdidas en el caso actual y reforzado
- xi) Evaluación del valor presente de la pérdida anual esperada en el caso reforzado

*Módulo de beneficio-costos*

- xii) Estimación de los costos de mitigación
- xiii) Evaluación de los beneficios de la mitigación: diferencia del valor presente entre las primas en el caso actual y reforzado
- xiv) Comparación entre los beneficios y costos de la mitigación

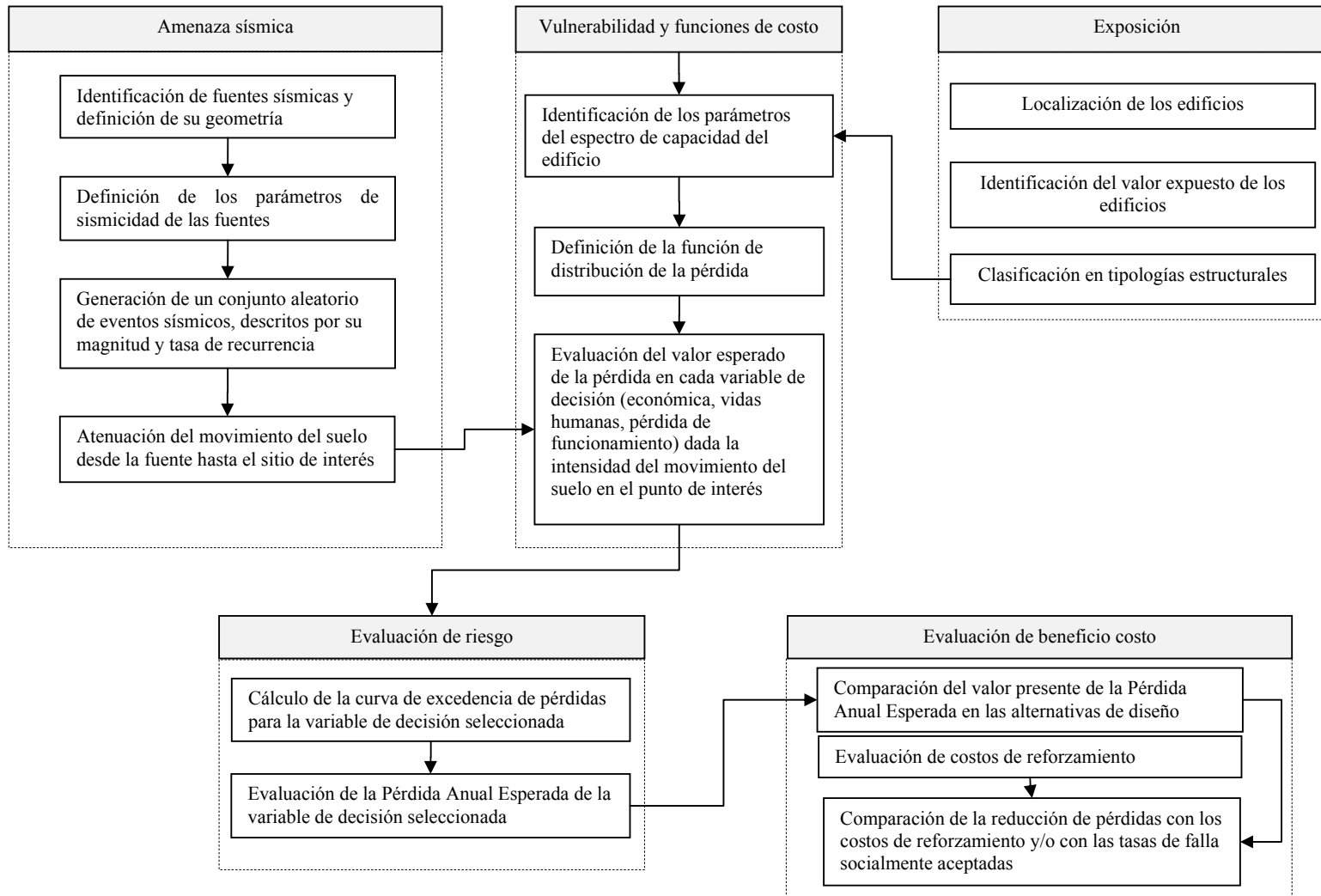


Figura 8-1 Metodología propuesta para la evaluación del beneficio-costos de la mitigación del riesgo sísmico en edificios

### 8.3 Módulo de peligrosidad sísmica

Este modulo permite el cálculo de la aceleración, para diferentes periodos de respuesta estructural, en roca firme, para un conjunto de eventos probables en la zona de análisis. Este módulo comprende: i) la identificación de las principales fuentes sísmicas, la definición de su sismicidad; ii) la generación de un conjunto de eventos aleatorios consistente con la distribución regional de la ubicación, frecuencia y magnitud de los terremotos y iii) la evaluación de la aceleración espectral en un sitio de interés. Para este procedimiento es útil el software CRISIS 2007 Version 7.2<sup>29</sup>.

#### 8.3.1 Identificación de las principales fuentes sísmicas y definición de su sismicidad

Para el análisis de la amenaza sísmica, así como para la generación de un conjunto de eventos sísmicos aleatorios, es necesario determinar las fuentes sísmicas que pueden suponer peligro potencial en la región de análisis.

Los modelos de sismicidad se pueden dividir en zonificados y no zonificados, en función de si se descompone la región de análisis en zonas sismogénicas de geometría bien definida, caracterizadas por parámetros que describen la frecuencia, la profundidad y las magnitudes de los terremotos que pueden generar. En este estudio se hace uso de modelos zonificados.

Las zonas sismogénicas pueden ser, o bien entidades físicas reconocibles (como fallas tectónicas), o bien zonas amplias en las que la sismicidad se considera distribuida uniformemente. La inclusión de zonas tipo falla en los estudios de amenaza requiere un buen conocimiento de la geometría de la falla (tanto en superficie como en profundidad) y de su capacidad de generar terremotos (Climent et al. 2008).

En contraste, la adopción de zonas cuya sismicidad se supone uniformemente distribuida no requiere mayor conocimiento sobre las fuentes. Su geometría puede definirse a partir de los datos de un catálogo sísmico, completo y homogéneo<sup>30</sup>, que incluya todos los terremotos que potencialmente puedan afectar la región de análisis, e incorporando información geofísica o geológica complementaria (Climent et al. 2008). Este enfoque resulta más apropiado en el contexto de regiones de moderada actividad sísmica, en las cuales no se tenga un conocimiento detallado de los parámetros que caracterizan la sismicidad de las fallas (Secanell et al. 2008).

En un modelo zonificado, la sismicidad de cada zona se caracteriza por una ley de recurrencia que expresa la relación entre la magnitud  $m$  de los terremotos y su frecuencia. La distribución de probabilidades de la magnitud de los sismos puede obtenerse de la Ley de Magnitudes de Richter, la cual plantea que en una zona de la corteza terrestre y durante un periodo de tiempo dado, la ocurrencia de sismos puede ajustarse por medio del siguiente modelo que define la peligrosidad o tasas de excedencia de terremotos de determinada magnitud:

$$\text{Log}_{10}(N_m) = a - bm \quad [8-1]$$

Donde  $N_m$  es el número de sismos con magnitud mayor o igual a  $m$  y  $a$  y  $b$  son constantes. En su forma exponencial, esta expresión resulta en:

---

<sup>29</sup> Este software está disponible en el siguiente vínculo:

[http://www.ecapra.org/capra\\_wiki/es\\_wiki/index.php?title=CRISIS\\_2007](http://www.ecapra.org/capra_wiki/es_wiki/index.php?title=CRISIS_2007). Última consulta [13/02/2012]

<sup>30</sup> De acuerdo con Climent et al. (2008), un catálogo sísmico es homogéneo si usa el mismo parámetro para definir el tamaño de todos los terremotos. Por otro lado, un catálogo sísmico se considera completo en un determinado rango de magnitudes si contiene todos los sismos de ese rango que presumiblemente han ocurrido en la zona de influencia

$$N_m = e^{\alpha - \beta m} \quad [8-2]$$

Donde  $\alpha=2.3a$  y  $\beta=2.3b$ , siendo  $2.3=\log_e 10$  (Comité AIS-300,1996).

Usando los resultados de la Ecuación [8-2], la Ecuación [8-3] presenta la probabilidad de que un evento tenga una magnitud menor a una magnitud dada  $M$ , considerando que en la zona sismogénica se presentan eventos en un rango de magnitudes mínima  $M_0$  y máxima  $M_u$

$$P(M < m | M_0 \leq m \leq M_u) = \frac{N_{M_0} - N_m}{N_{M_0} - N_{M_u}} \quad [8-3]$$

Así, la actividad de cada fuente sísmica puede determinarse calculando la tasa de excedencia de las magnitudes  $\lambda(m) = P(M > m)$  como  $1 - P(M < m | M_0 \leq m \leq M_u)$ , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\lambda(m) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad M_0 \leq m \leq M_u \quad [8-4]$$

En donde  $\lambda_0$  es la tasa de excedencia de la magnitud  $M_0$ ,  $\beta$  es la pendiente de la curva de recurrencia y  $M_u$  es la máxima magnitud de la fuente (Comité AIS-300,1996).

De esta manera, para la caracterización de la sismicidad de las fuentes se requiere definir:

- i) La recurrencia de magnitudes: se identifica mediante el parámetro  $\beta$  que representa la pendiente promedio de la curva de recurrencia de magnitudes (curva de número de eventos con magnitud mayor que  $M$ , versus magnitud sísmica  $M$ ; ver ecuaciones 8-1 y 8-2).
- ii) Magnitud máxima para la zona sismotectónica  $M_u$ : Corresponde a la máxima magnitud que se supone que puede ocurrir en cada una de las zonas. Normalmente, este parámetro se determina por un análisis de los indicios geológicos de la región, de acuerdo al valor máximo probable de la longitud de ruptura de cada fuente, o en ausencia de datos de carácter geológico, mediante un aumento arbitrario de la magnitud máxima observada en cada zona fuente (GEOTER 2008).
- iii) La tasa de recurrencia para el umbral de magnitud  $M_0$ : corresponde al promedio de terremotos por año con magnitud mayor que un umbral dado. En la práctica, el umbral de magnitudes  $M_0$  suele considerarse entre 3 y 4 dado que se consideran las magnitudes mínimas a partir de las cuales se pueden producir daños.
- iv) La profundidad de los sismos de las diferentes zonas sismogénicas: corresponden a la profundidad media donde se suponen que se producen los terremotos en cada zona. Esta profundidad se determina a partir de criterios geológicos y con la determinación de las profundidades por parte de los servicios geológicos responsables de las redes sísmicas (GEOTER 2008).

### 8.3.2 Generación de un conjunto aleatorio de eventos

En este paso se genera un conjunto de eventos aleatorios que es consistente con la distribución regional, con la frecuencia y con la magnitud de los terremotos que pueden ocurrir en las fuentes sísmicas. Para generar dicho conjunto, cada fuente se divide en subzonas a través de un procedimiento de división recursiva de su geometría. Para cada subzona, los parámetros de sismicidad ( $\lambda_0$  y  $\beta$ ) se asignan de acuerdo a la proporción entre el área (o longitud en el caso de fallas lineales) de la subzona y el área (o longitud en el caso de fallas lineales) de la fuente. Finalmente, para cada subzona se generan terremotos cuya magnitud varía entre los límites  $[M_0, M_u]$ , a los cuales se asigna una tasa de excedencia siguiendo el modelo de recurrencia de magnitudes presentado en el paso anterior.

### 8.3.3 Atenuación del movimiento del suelo

Una vez generados los terremotos, es necesario evaluar la intensidad del movimiento del suelo para cada sitio de interés. Esto requiere, al nivel de roca firme, la predicción de valores para el movimiento del suelo en el sitio de interés, dada la ocurrencia de un terremoto de determinada magnitud en la fuente  $i$ . En principio se efectúa el cálculo a nivel de roca firme, aunque se pueden tener en cuenta los tipos de suelo.

Para este fin se adoptan leyes de atenuación. Estas leyes relacionan la magnitud, la distancia entre el sitio de interés y la fuente y la intensidad del movimiento para diferentes periodos estructurales. Usualmente, la distancia se especifica a través de la distancia hipocentral.<sup>31</sup> Se considera que las intensidades del movimiento de suelo relevantes para el análisis de vulnerabilidad de las estructuras son los valores de aceleración espectral (con un 5% de amortiguamiento crítico). Dichos valores son aproximadamente proporcionales a las fuerzas laterales de inercia inducidas durante terremotos. Dada la naturaleza aleatoria de los movimientos sísmicos, la intensidad de su movimiento se considera una variable aleatoria con una distribución lognormal. Normalmente, las leyes de atenuación contienen también los parámetros de esta distribución estadística.

Una vez definidas las fuentes sismogénicas y las leyes de atenuación, usando el software CRISIS 2007 Version 7.2 es posible generar un conjunto (aleatorio) de eventos descritos por su magnitud y tasa de recurrencia. Para cada uno de los terremotos generados y para cada periodo de respuesta estructural, se calculan las aceleraciones espectrales en la zona de análisis. Estos resultados se organizan en un archivo tipo “.ame”.

## 8.4 Módulo de exposición

En este modulo se organiza la información de los elementos expuestos a la amenaza sísmica en cuanto a su ubicación, su valor (del edificio y contenidos, número de ocupantes, producción de servicios) y su tipología estructural.

### 8.4.1 Ubicación y valor de los edificios

La ubicación hace referencia a las coordenadas del edificio. Esta información es necesaria para estimar los valores de intensidad del movimiento del suelo para un terremoto que ocurra en una fuente determinada. Por otro lado, esta información es útil para identificar la demanda de servicios de la instalación dada la población de las cercanías, como en los casos, por ejemplo, de las instalaciones de salud y de los centros educativos.

Tal como se presentó en el Capítulo 3, el valor de los edificios y sistemas esenciales hace referencia a los costos de reposición, a las pérdidas que puedan generar dado su falla (por el número de ocupantes, o la falta de funcionamiento en situaciones de emergencia o por el potencial de generar otro desastre), y a la producción de servicios de atención a la comunidad.

En cuanto a los costos de reposición, estos hacen referencia al valor del edificio y de los contenidos. Estos valores suelen obtenerse o bien, de consultas a responsables de las instalaciones, o bien de estimaciones a partir del área construida, del uso de la instalación o de información disponible en bases de datos catastrales o de inventarios de las instalaciones y de los equipamientos.

En cuanto a la producción de servicios, se propone un modelo simplificado utilizando una función de producción  $y = F(K, L)$ . En dicha función, la producción se basa en los valores de capital  $K$  y trabajo  $L$ .

---

<sup>31</sup> La distancia hipocentral se define como  $d(r, h) = \sqrt{r^2 + h^2}$

Dónde  $r$ , corresponde a la distancia mas corta entre la proyección en superficie de la zona de ruptura y el punto de calculo de la aceleración. A su vez,  $h$  corresponde a la profundidad focal.



Suelen especificarse funciones de producción del tipo Cobb-Douglas (Auster et al. 1969), que tienen la forma:

$$F(K, L) = K^\alpha L^\beta \quad [8-5]$$

Es posible obtener los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de esta función a través de una regresión lineal. Para esto, es necesario aplicar logaritmos y luego realizar la regresión considerando la información de la variable de producción (como salud, educación) con los valores de capital (por ejemplo m<sup>2</sup> construidos, número de camas) y el personal que trabaja para la producción de tales servicios (número de médicos, profesores).

En cuanto al potencial de generar fallos, en este trabajo sólo se considera la afectación a los ocupantes, razón por la cual se registran los datos de población en los edificios. Este valor es de especial interés en el caso centros educativos, en los cuales la seguridad de la vida de los alumnos debe ser protegida. La evaluación de nuevos desastres, por efectos inducidos, tales como explosiones, derrames de sustancias peligrosas, o eventos similares inducidos por el fallo de la instalación, queda fuera del alcance de este estudio.

#### 8.4.2 Tipología estructural

La clasificación de los edificios en tipologías estructurales representa una simplificación del análisis aplicable para estudios regionales, evaluaciones preliminares o estudios que abarquen un conjunto amplio de edificios. En HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003), así como en el proyecto RISK-UE, se encuentran tipologías estructurales según el material de construcción, el sistema resistente a cargas y la altura de los edificios. Cada tipología se caracteriza por un espectro de capacidad en formato bilineal. Esta información es útil para definir las curvas de fragilidad o de vulnerabilidad de los edificios.

Para clasificar los edificios es deseable realizar inspecciones visuales rápidas que permitan verificar las características estructurales de los edificios. Para este procedimiento son de utilidad los Formularios de evaluación de la vulnerabilidad de edificios esenciales, los cuales se encuentran en el Anexo A.

Además de las inspecciones de los edificios, es recomendable consultar estudios sobre la evolución de las técnicas de construcción, o de las características arquitectónicas de los edificios en la zona de interés. Esto permite asignar tipologías estructurales según el uso de la instalación, la fecha de construcción o la ubicación de los edificios.

Finalmente, la información recolectada en el módulo de exposición se resume en un archivo de formato “.shp”. Este formato habilita el uso de Sistemas de Información Geográfica tanto para la visualización como para el análisis de los datos. En estos archivos se presenta, para cada elemento expuesto, sus coordenadas, su valor económico, el número de ocupantes, el valor de la producción de servicios y su tipología estructural.

### 8.5 Módulo de vulnerabilidad y de curvas de pérdida esperada

En este módulo se desarrollan curvas de pérdida que relacionan el valor esperado de la pérdida y su desviación estándar, con la respuesta de la estructura dada la intensidad del movimiento del suelo. Además de la pérdida económica, se presentan otras relaciones entre el daño esperado en los edificios y los efectos en la población, así como la pérdida de funcionalidad y la reducción en la producción de servicios.

8.5.1 Valor esperado de la pérdida económica

De acuerdo con el informe del ATC 13 y con la metodología de HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003), la pérdida se expresa en términos de la razón de daño medio, la cual corresponde a la relación entre los costos de reparación y el valor de reposición del edificio. Para definir la relación entre la pérdida económica y la respuesta de la estructura ante la intensidad del movimiento del suelo se adopta el siguiente procedimiento:

- i) Cada tipología estructural incluida en el módulo de exposición se caracteriza por un espectro de capacidad. Dicho espectro se presenta en forma simplificada, adoptando una curva bilineal descrita por los puntos de fluencia y capacidad última del edificio. A partir de esta información, se deben seleccionar los valores de referencia de la pérdida esperada en el edificio para los puntos de fluencia ( $S_{d_y}, S_{a_y}$ ) y resistencia última ( $S_{d_u}, S_{a_u}$ ) del edificio (ver Tabla 8-1).

**Tabla 8-1 Valores de pérdida asociados a los puntos del espectro de capacidad bilineal**

Punto	Índice de pérdida (%)
Punto de fluencia ( $S_{d_y}$ )	5-10
Punto de capacidad última ( $S_{d_u}$ )	80-100

- ii) A partir de los valores establecidos en el paso anterior, definir el valor esperado de la pérdida, la desviación estándar y la distribución de probabilidad de las pérdidas dada la intensidad del movimiento del suelo. En este estudio se adopta el desplazamiento espectral como referencia para la evaluación del daño de los edificios.

Para un desplazamiento espectral dado  $\gamma_i$ , Miranda (1999) y Ordaz (2000) sugieren que el valor esperado de la pérdida  $\beta$ , es decir  $E(\beta|\gamma_i)$ , puede obtenerse usando la siguiente expresión:

$$E(\beta | \gamma_i) = \left( 1 - \exp \left[ \ln(1 - \beta_0) \left( \frac{\gamma_i}{\gamma_0} \right)^\epsilon \right] \right) \quad [8-6]$$

En donde  $\beta_0$  representa el valor esperado de la pérdida asociado al desplazamiento espectral  $\gamma_0$ .  $\beta_0$  usualmente toma valores de 5%.  $\gamma_0$  es el desplazamiento espectral en el punto de fluencia ( $S_{d_y}$ ) de la estructura, de acuerdo al espectro de capacidad. Por otro lado,  $\epsilon$  es un factor usado para ajustar la curva a los niveles de pérdida asignados a los puntos de fluencia y de capacidad última descritos en la Tabla 8-1.

Puesto que en el modulo de amenaza, la acción sísmica se expresa en términos de la aceleración espectral, es necesario convertir estos valores en los correspondientes desplazamientos espectrales. Para este fin, se sigue la expresión sugerida por Miranda et al. (1999), de acuerdo a la siguiente relación:

$$\gamma_i = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \frac{T_e^2}{4\pi^2} Sa(T_e) \quad [8-7]$$

En donde  $T_e$  es el periodo de la tipología estructural;  $Sa(T_e)$  es la aceleración espectral al periodo  $T_e$ ;  $\beta_1$  es la razón entre el desplazamiento lateral máximo en el techo del edificio y el desplazamiento espectral, considerando un modelo elástico;  $\beta_2$  es la razón entre el máximo de deriva de entrepiso y la deriva global de la estructura, la cual es definida como el desplazamiento lateral máximo en el techo, dividido por la altura del edificio.  $\beta_3$  corresponde a la razón entre el desplazamiento lateral máximo tomando en cuenta un modelo inelástico, así como el desplazamiento máximo del modelo elástico.

### 8.5.2 Distribución de probabilidad y desviación estándar de la pérdida económica

En este estudio, se considera que la pérdida sigue una distribución de probabilidad tipo Beta (ver Ecuación [8-8]). Los parámetros  $a$  y  $b$  de la distribución pueden calcularse del valor esperado de la pérdida, dado un desplazamiento espectral específico (ver ecuación [8-6]) y el coeficiente de variación de la pérdida  $C^2(\beta)$ , a partir de las expresiones [8-9], [8-10] y [8-11]

$$P_{\beta|\gamma_i}(\beta) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \beta^{a-1} (1-\beta)^{b-1} \quad [8-8]$$

$$a = \frac{1 - E(\beta | \gamma_i) - E(\beta | \gamma_i) C^2(\beta)}{C^2(\beta)} \quad [8-9]$$

$$b = a \left[ \frac{1 - E(\beta | \gamma_i)}{E(\beta | \gamma_i)} \right] \quad [8-10]$$

En donde  $C^2(\beta)$  puede calcularse de acuerdo a la expresión:

$$C^2(\beta) = \frac{\sigma_{\beta}^2(\beta | \gamma_i)}{E(\beta | \gamma_i)} \quad [8-11]$$

$\sigma_{\beta}^2(\beta | \gamma_i)$  es la varianza de la pérdida dada una aceleración espectral. Para estimar este parámetro, se ha adoptado la distribución de daño del estudio ATC 13, siguiendo las ecuaciones [8-12], [8-13] y [8-14]

$$\sigma_{\beta}^2(\beta | \gamma_i) = Q(E(\beta | \gamma_i))^{r-1} (1 - E(\beta | \gamma_i))^{s-1} \quad [8-12]$$

$$Q = \frac{V_{max}}{D_0^{r-1} (1 - D_0)^{s-1}} \quad [8-13]$$

$$s = \frac{r-1}{D_0} - r + 2 \quad [8-14]$$

En donde  $V_{max}$  es la máxima varianza de la pérdida;  $D_0$  es el valor de la pérdida en la cual la varianza es máxima y  $r$  es un factor que se supone igual a 3. En Graf & Lee (2009), la desviación estándar máxima se supone como 0.15 al 50% del factor de daño. A partir de estos resultados, en este trabajo  $V_{max}$  se supone como 0.0625, que representa una desviación estándar de 0.25;  $D_0$  se fija también al 50% .

Una vez establecidos el valor esperado de la pérdida y su varianza, es posible estimar la distribución de probabilidad de la pérdida, dado un desplazamiento espectral. Como ejemplo de este procedimiento, en la Figura 8-2 se presenta el espectro de capacidad para la Tipología M3.3H y en la Figura 8-3 se presenta la curva de pérdida.

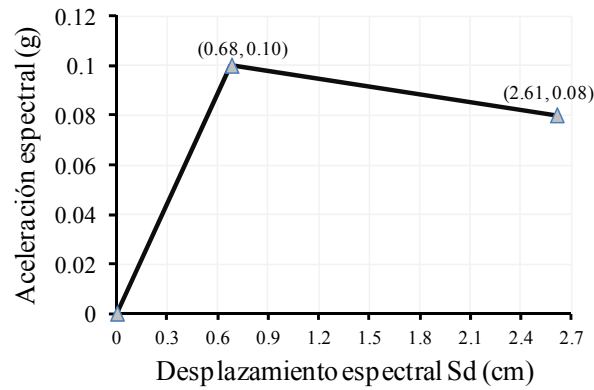


Figura 8-2 Espectro de capacidad en formato bilineal para la tipología M3-3H

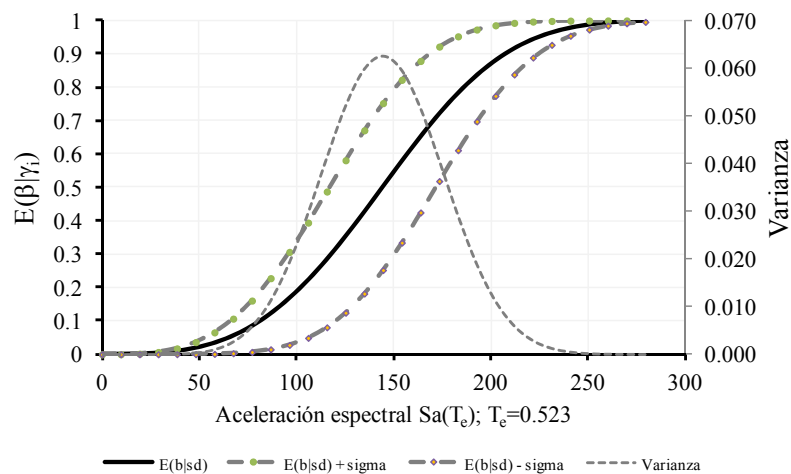


Figura 8-3 Curva de pérdida para la tipología M3-3H

### 8.5.3 Relaciones entre curvas de fragilidad y curvas de pérdida

Tal como se presentó en el Capítulo 4, las curvas de fragilidad expresan la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño de acuerdo al desplazamiento de la estructura en el punto de comportamiento  $Sd_p$ . A partir de la relación entre las curvas de fragilidad, es posible obtener la probabilidad de que la estructura se encuentre un determinado estado de daño, lo cual es de interés para el análisis de seguridad y verificación del comportamiento de los edificios.

No obstante, para calcular las pérdidas económicas usando funciones de fragilidad, es necesario añadir costos monetarios a cada estado de daño. Para este fin, en el Capítulo 4 se presentaron, para cada estado de daño (nulo, leve, moderado, extensivo y completo), rangos de valores posibles del costo de la pérdida económica como porcentaje del valor de reposición del edificio. Estos rangos se definieron a través de funciones de pertenencia. Para el cálculo del índice de pérdida económica, dado el desplazamiento espectral del edificio en el punto de capacidad por demanda, se calcula el centroide de la envolvente de dichas funciones de pertenencia, normalizadas por las correspondientes probabilidades de daño.

En forma similar, Ordaz (comunicación personal, Junio 2008) establece un conjunto de valores posibles del valor de la pérdida económica para cada estado de daño, definiendo el valor esperado para cada uno  $E(L_i)$  y estimando la desviación estándar a partir de la Ecuación [8-16]. De estos dos ejemplos se observa

que es posible obtener curvas de pérdida a partir de curvas de fragilidad si se suponen valores posibles del índice de daño para cada estado de daño.

$$E(L | Sd_p) = \sum_{i=1}^N P(ds = DS_i | Sd_p) E(L_i) \quad [8-15]$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (E(L_i) - E(L | Sd_p))^2 P(ds = DS_i | Sd_p)} \quad [8-16]$$

En donde  $N$  representa el número de estados de daño (no nulos), 4 en este caso, para los estados leve, moderado, extensivo y completo. Ordaz (comunicación personal, Junio 2008) también presenta una metodología para obtener matrices de probabilidad, así como las probabilidades de excedencia de cada estado de daño, a partir de las curvas de pérdida.

Para este fin, se definen nuevamente rangos de valores del índice de pérdida para cada estado de daño,  $E[L_i]$ . A diferencia de los estados de daño, que corresponden a estados discretos, el índice de pérdida es una variable continua que puede tomar valores entre 0 y 1. De esta manera, se requiere asociar cantidades (probabilidades) de los estados de daño, a todos los valores posibles del índice de pérdida. Esto puede hacerse definiendo los estados de daño con un rango de valores posibles de pérdida. Dichos rangos pueden definirse, para cada estado de daño  $j$ , por un límite inferior,  $L_{j_{inf}}$  un límite superior  $L_{j_{sup}}$  y un valor de marca de clase, o de máxima pertenencia,  $L_{j_m}$  tal como se mencionó en el Capítulo 4.

Una vez definidos estos límites es posible calcular, para un determinado punto de la curva de pérdida, la probabilidad de cada estado de daño dado el valor esperado de la pérdida y la desviación estándar, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- i) Estimar los parámetros  $a$  y  $b$  a partir del valor esperado de la pérdida y su correspondiente desviación estándar. Dichos valores se encuentran especificados para cada valor de pérdida en la curva de pérdida, de acuerdo a las Ecuaciones [8-9] y [8-10]
- ii) Para cada estado de daño  $j$ , usando los parámetros  $a$  y  $b$  del paso anterior, calcular la probabilidad de daño mediante la siguiente expresión:

$$P(ds = DS_j | Sd_p) = F(a, b, L_{j_{inf}}) - F(a, b, L_{j_{sup}}) \quad [8-17]$$

En donde  $F(\cdot)$  representa la función de distribución acumulativa Beta, definida por los parámetros  $a, b$  y  $L_{j_{inf}}$  y  $L_{j_{sup}}$ , que representan los límites inferiores y superiores, respectivamente.

- iii) Por último, la probabilidad de excedencia de cada estado de daño  $P(ds > DS_i | Sd_p)$  se determina como

$$P(ds \geq DS_k | Sd_p) = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} P(ds = DS_i | Sd_p) \quad [8-18]$$

A través de estos ejercicios se observa que las curvas de pérdida contienen toda la información necesaria para hacer estimaciones de pérdidas económicas. Si éste es el propósito del estudio, las curvas de pérdida constituyen un medio completo y directo para lograrlo.

Por otro lado, las curvas de fragilidad son útiles para propósitos de estimar probabilidades de encontrarse en cierto estado de daño, tal como ocurre en los métodos de diseño por comportamiento y evaluaciones de seguridad. Para la estimación de pérdidas económicas, se requiere adicionar relaciones cuantitativas entre estado de daño y pérdida económica.

#### 8.5.4 Relación entre el daño del edificio y efectos sobre sus ocupantes

Varias propuestas han sido desarrolladas para estimar el número de heridos en eventos sísmicos. Estas metodologías se basan en datos observados en terremotos, considerando los daños en los edificios y la fatalidad de los eventos. En Cagnan et al. (2009) se presenta una comparación de los enfoques empleados para la estimación de heridos en diferentes proyectos HAZUS MH (FEMA/NIBS 2003), KOERI (2002), RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003), LESSLOSS (Spence 2007), SELENA (Molina et al. 2009), entre otros, así como de los factores empleados para distribuir los heridos según su severidad.

En este trabajo se adopta la metodología sugerida por Coburn y Spence (1992), en la cual la proporción de heridos se evalúa a partir de la probabilidad de colapso de la estructura  $P_{colapso}$  y un conjunto de factores  $M_i$  (ver Ecuación [8-19]). Estos factores establecen la razón entre los ocupantes que habitan el edificio, los que quedan atrapados y los que resultan afectados

$$H_i = P_{colapso} M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot \begin{cases} M_{4.1}; \text{Heridos leves} \\ M_{4.2}; \text{Heridos moderados} \\ M_{4.3}; \text{Heridos graves} \\ (M_{4.4} + M_5(1 - M_{4.4})); \text{Fallecidos} \end{cases} \quad [8-19]$$

Donde  $H_i$  es el número de heridos para el grado de severidad  $i$ , (leves, moderados, graves y fallecidos).  $M_1$  es la población que ocupa los edificios,  $M_2$  es el porcentaje de ocupación y  $M_3$  el porcentaje de ocupantes atrapados.  $M_{4i}$  presenta el porcentaje de las personas que pueden resultar con heridas leves, moderadas, graves o fallecer directamente por el terremoto. Por último,  $M_5$  representa la mortalidad post terremoto.

El procedimiento para obtener el valor esperado del número de heridos según su gravedad es el siguiente:

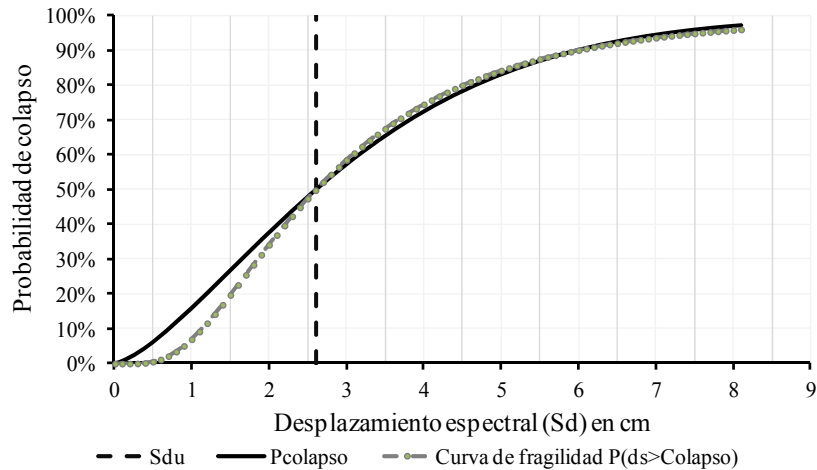
- i) Establecer la probabilidad de colapso de la estructura. Si se hace uso de las curvas de pérdida es necesario aplicar los siguientes pasos: definir los rangos del índice de pérdida para cada estado de daño; estimar los parámetros  $a$  y  $b$  de la función de distribución de la pérdida; por último, obtener la curva de fragilidad para el estado de daño de colapso, tal como se presentó en las relaciones entre las curvas de vulnerabilidad y fragilidad.

Para simplificar el procedimiento, se sugiere adoptar la siguiente expresión para calcular la probabilidad de colapso:

$$P_{colapso} = 1 - \left( 0.5 \left( \frac{Sd}{Sd_u} \right)^{C1} \right) \quad [8-20]$$

Donde  $Sd$  corresponde al desplazamiento espectral estimado para la ubicación de la estructura según su periodo estructural,  $Sd_u$  es el desplazamiento espectral último del edificio, obtenido del espectro de capacidad de la tipología y  $C1$  es una constante que permite ajustar la curvatura de la función. Para obtener el valor de esta constante, se compararon las probabilidades de colapso obtenidas a través de la Ecuación [8-20], con las probabilidades de colapso obtenidas a través de las curvas de fragilidad descritas en el Capítulo 4. Al comparar los resultados entre varias tipologías estructurales, se observó que el valor de  $C1$  que mejor ajusta estas expresiones es 1.45.

En la Figura 8-4 se presentan los cálculos de la probabilidad de colapso para un edificio de muros de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería (M3-3 H). La línea negra continua representa la probabilidad de colapso obtenida con la Ecuación [8-20]. La línea punteada gris presenta la probabilidad de colapso obtenida con las curvas de fragilidad considerando  $\overline{Sd} = Sd_u = 2.61$  y  $\beta = 0.65$ .



**Figura 8-4 Probabilidad de colapso de los edificios según su desplazamiento**

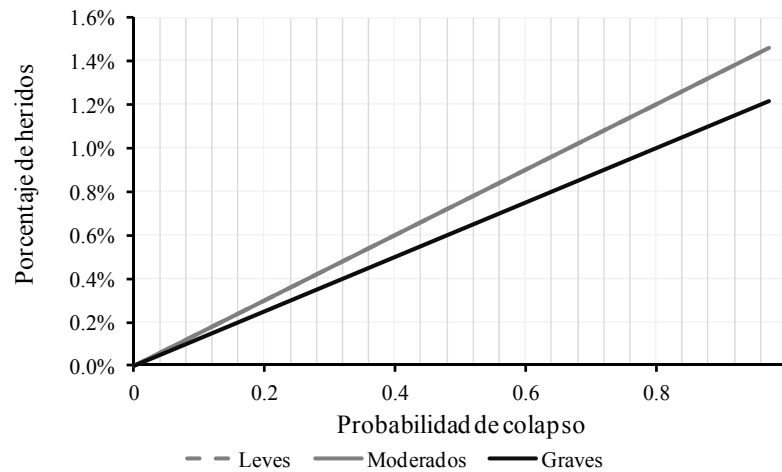
De su comparación se observa que la Ecuación [8-20] representa en forma razonable la probabilidad de colapso. Asimismo, se resalta que esta simplificación guarda el criterio de las curvas de fragilidad, para las cuales se encuentra una probabilidad de excedencia del 50% para el valor medio del desplazamiento en cada estado de daño. En este caso, corresponde al desplazamiento espectral último  $S_{du}$ , tal como se observa en la Figura.

- ii) Estimar la proporción de los heridos de acuerdo a la probabilidad de colapso y a factores que relacionan la posibilidad de verse atrapado y herido según la tipología estructural del edificio. En la Tabla 8-2 se presentan los factores de atrapamiento y afectación de la población para edificios según su material de construcción. Estos valores se adoptaron del manual del proyecto RISK UE. Para los valores de  $M_5$  se utilizaron los valores correspondientes a comunidades capaces de organizarse para actividades de rescate. Como ejemplo, en la Figura 8-5 y en la Figura 8-6 se presenta, para la tipología M3-3H, el porcentaje de heridos según nivel de severidad, probabilidad de colapso y desplazamiento espectral, asumiendo que la ocupación del edificio es del 100%.

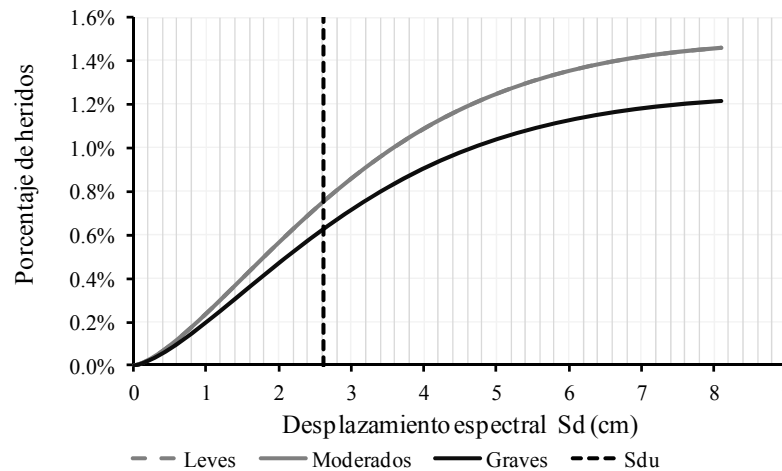
**Tabla 8-2 Ejemplos de factores de atrapamiento y afectación para edificios según materiales de construcción**

Tipo de edificio	M4					M5
	M3	Leves	Moderados	Graves	Fallecidos directos	
Mampostería	5%	30%	30%	25%	15%	60%
Hormigón armado	30%	10%	40%	10%	40%	90%
Acero	5%	50%	30%	10%	10%	50%

Valores adoptados del manual del proyecto RISK UE (Vacareanu et al. 2004), Lantada (2007) y ERN(2010).



**Figura 8-5** Porcentaje de heridos según severidad y probabilidad de colapso



**Figura 8-6** Porcentaje de heridos según tipo de heridos para el desplazamiento espectral del edificio

En la Figura 8-5 y en la Figura 8-6 se resalta que el porcentaje de heridos leves es igual al de heridos moderados, de acuerdo con los porcentajes de afectación presentados en la Tabla 8-2. A su vez, se señala que el porcentaje máximo (esperado) de heridos leves y moderados es cercano a 1.4% y a 1.2% para heridos graves. Estos valores ocurren cuando la probabilidad del estado de colapso es igual a 1. Cuando el desplazamiento espectral del edificio es igual al umbral del estado de colapso ( $S_{du}$ ) estos valores son del orden de 0.8% y 0.6%, respectivamente.

### 8.5.5 Relación entre el daño del edificio y la reducción en la funcionalidad y la producción de servicios

Para estimar la pérdida de funcionalidad de las instalaciones, se utiliza una relación entre el daño esperado en el edificio y los niveles de comportamiento sugeridos en los documentos FEMA 273 (1997) y FEMA 356 (2000), tal como se presentó en el Capítulo 4. El procedimiento para obtener la pérdida de funcionalidad es el siguiente:

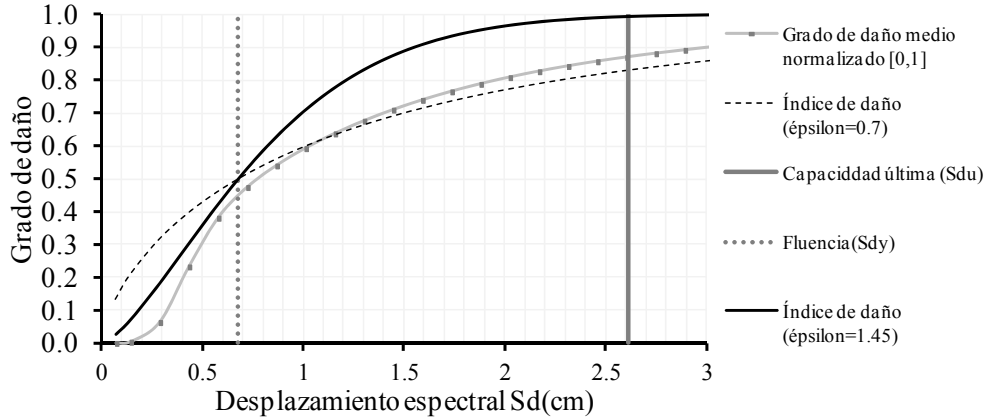
- i) Estimar el daño en el edificio. Para obtener el grado de daño del edificio, dada la aceleración espectral esperada en su ubicación, se emplea el formato de las curvas de pérdida, asignando diferentes valores para el índice de daño en los puntos de fluencia y de capacidad última (ver Tabla 8-3).



**Tabla 8-3 Valores de pérdida asociados a los puntos del espectro de capacidad bilineal**

Punto	Índice de daño (%)
Punto de fluencia ( $S_{d_y}$ )	50
Punto de capacidad última ( $S_{d_u}$ )	100

En la Figura 8-7 se presenta el índice de daño esperado en el edificio, adoptando la Ecuación [8-6] a los valores de la Tabla 8-3 y utilizando diferentes valores para el exponente épsilon ( $\epsilon$ ). Éstos índices se comparan con el grado de daño medio obtenido evaluando las curvas de fragilidad (y las matrices de probabilidad de daño) para los estados leve, moderado, extensivo y completo.



**Figura 8-7 Índice de daño del edificio. Tipología M3-3H**

De la Figura 8-7 se observa que el índice de daño, obtenido al adoptar la Ecuación [8-6] (línea negra continua), se puede ajustar a los valores específicos para los puntos de fluencia y capacidad última. Esto permite que sea comparable con otras escalas de daño, como las sugeridas por Rossetto y Elnashai (2003). Ahora, si se desea que el índice de daño sea similar al grado de daño medio obtenido a través de la evaluación de las curvas de fragilidad y de las matrices de probabilidad de daño, es posible encontrar valores para el exponente  $\epsilon$  que se aproximen a estos resultados (línea negra a trazos).

ii) Una vez obtenido el daño en el edificio, es posible estimar la pérdida de funcionalidad de acuerdo a la metodología presentada en el Capítulo 4 (ver apartado 4.4.3). Por comodidad, la expresión se repite en la Ecuación [8-21].

$$L_f(ED) = \begin{cases} 1 - 0.5ED & \text{si } ED \leq 0.2 \\ \exp(\text{LOG}(0.5)) \cdot \left(\frac{ED}{CI}\right)^{C2} & \text{Si } ED \leq 0.7 \\ 0 & \text{si } ED > 0.7 \end{cases} \quad [8.21]$$

En donde  $L_f(ED)$  corresponde a la funcionalidad esperada del edificio después del evento,  $ED$  al daño esperado del edificio y  $CI$  y  $C2$  a constantes definidas en 0.3 y 3 respectivamente. Por último, para estimar las pérdidas en producción de servicios se emplean las funciones de producción presentadas en el modulo de exposición (ver apartado 8.4). La producción de servicios luego del desastre  $y_d$  se evalúa bajo el supuesto que los daños en la instalación reducen en la misma proporción la infraestructura (el capital,  $K$ ) y los trabajadores  $L$ . Así, la producción post desastre se modela como  $y_d = F(K^*, L^*)$  en donde:

$$\begin{aligned} K^* &= K_i \times (1 - ED) \\ L^* &= L_i \times (1 - ED) \end{aligned} \quad [8-22]$$

$K_i, L_i$ , corresponden a los valores de capital y trabajo antes del desastre (en condiciones de normalidad). ED representa el valor esperado del daño en las instalaciones. Así, la reducción en la producción  $\Delta y$  se puede evaluar a partir de la diferencia entre el estado normal y el estado post evento:

$$\Delta y = y_i - y_d = F(K_i, L_i) - F(K^*, L^*) \quad [8-23]$$

Sobre esta evaluación se debe resaltar que es un intento de cuantificar la pérdida de servicios que produce un edificio o sistema por los cuales se considera esencial. A través de este modelo se desea observar cómo los daños por un evento sísmico pueden afectar la infraestructura y así repercutir en la reducción de servicios a la comunidad, tales como la salud o la educación. Este enfoque puede discutirse en cuanto a la capacidad del modelo para representar la producción de servicios, así como las variables elegidas para describirlo. No obstante, su simplicidad se considera apropiada para los objetivos trazados en este estudio.

## 8.6 Módulo de riesgo

Para el conjunto de elementos expuestos y para cada escenario incluido en el módulo de amenaza, las pérdidas (económicas) esperadas se estiman usando las curvas de pérdida asociadas a cada tipología estructural. Ya que cada escenario del modulo de amenaza tiene asignado una frecuencia anual de ocurrencia, es posible estimar una relación entre las pérdidas y su frecuencia anual de ocurrencia.

Esta información se resume en la Curva de Excedencia de Pérdidas. Dicha curva especifica las frecuencias (también conocidas como tasas de excedencia), usualmente anuales, de los eventos que pueden exceder valores específicos de pérdida. También, al nivel de cada valor expuesto, es posible obtener la Pérdida Anual Esperada (PAE) la cual representa, en promedio anual, el valor de las pérdidas probables.

Este procedimiento puede extenderse para otras variables de decisión como el número de heridos, o la pérdida de funcionamiento y producción de servicios. Cada una de estas variables puede obtenerse relacionando el daño del edificio con tasas de afectación a los ocupantes o reducción de la funcionalidad y de la producción de servicios, tal como se presentó en el módulo de exposición y de vulnerabilidad y de pérdida. De esta manera, también es posible obtener tasas de excedencia para el número de heridos, o de pérdidas en la producción de servicios.

### 8.6.1 Curva de excedencia de pérdidas

La tasa de excedencia de pérdidas puede obtenerse siguiendo la expresión:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{\text{eventos}} P(P > p | i) F_A(i) \quad [8-24]$$

En donde  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$  de la variable de decisión dada.  $F(A)$  es la frecuencia anual del evento  $i$ .  $P(P > p | i)$  es la probabilidad de que la pérdida sea mayor a un valor dado  $p$ , dada la ocurrencia del evento  $i$ . La tasa de excedencia de pérdidas se obtiene de la suma de todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $v(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida.

La pérdida  $p$  que se expresa en la ecuación [8-24] es la suma de todas las pérdidas que pueden ocurrir en todos los elementos expuestos. Es importante notar que  $p$  es un valor incierto. Por esta razón, se propone tratarlo como una variable aleatoria. Así, es necesario adoptar funciones de distribución de probabilidad que expresen la pérdida dada la ocurrencia de un evento peligroso  $i$ , tal como se describe en el apartado 8.5.

El procedimiento para estimar la Ecuación [8-24] se presenta a continuación. Estos pasos se adoptan de la metodología de la Circular S-10.4.1.1 Secretaría de Hacienda y Crédito Público de los Estados Unidos Mexicanos.

- i) Para un escenario dado, calcular la distribución de probabilidad de las pérdidas para cada elemento expuesto, siguiendo las ecuaciones [8-8], [8,9] y [8,10].
- ii) Estimar la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas para todos los elementos expuestos  $P_s$ . Para definir esta distribución, se considera que la media y la varianza de la suma de las pérdidas  $\beta_s$ , sean iguales a las siguientes dos cantidades, respectivamente (ver Ecuaciones [8-25] y [8-26]):

$$E(\beta_s) = \frac{E(P_s)}{M_s} \quad [8-25]$$

$$Var(\beta_s) = \frac{Var(P_s)}{M_s^2} \quad [8-26]$$

En donde  $M_s$  corresponde a la suma de los valores de reposición (valores expuestos) y  $E(P_s)$  corresponde a la suma de las pérdidas individuales, tal como se presenta en la siguiente expresión:

$$E(P_s) = \sum_{j=1}^N M_j E(\beta_j) \quad [8-27]$$

En cuanto a la varianza de la suma de las pérdidas, ésta puede estimarse siguiendo la relación:

$$VAR(P_s) = \sum_{j=1}^N M_j^2 VAR(\beta_j) + 2 \sum_{j=1}^N \sum_{k=j+1}^N M_j M_k \rho_{jk} \sqrt{VAR(\beta_j) VAR(\beta_k)} \quad [8-28]$$

En donde  $\rho_{jk}$  es el coeficiente de correlación entre las pérdidas de los elementos  $j, k$ ;  $N$  es el número de valores expuestos y  $M$  es el valor de cada valor expuesto.

Sobre la anterior expresión, se resalta la dificultad que representa encontrar el coeficiente de correlación de las pérdidas  $\rho_{jk}$ . En principio, este coeficiente debería depender al menos de la separación geográfica entre los elementos expuestos. De hacerse así, el cálculo de la varianza sería numéricamente muy largo, sin ventajas apreciables de precisión. En la Circular de seguros se sugiere un valor de 0.2 independientemente del tipo estructural y localización de los elementos (Circular S-10.4.1.1).

Bajo esta simplificación de la varianza, suponiendo un valor constante ( $\rho=0.2$ ), la expresión [8-28] puede adoptar la siguiente forma:

$$VAR(P_s) = (1 - \rho)V_s + \rho S_s^2 \quad [8-29]$$

En dónde

$$V_s = \sum_{j=1}^N M_j^2 VAR(\beta_j) \quad [8-30]$$

$$S_s = \sum_{j=1}^N M_j \sqrt{VAR(\beta_j)} \quad [8-31]$$

- iii) Estimar la probabilidad de que la pérdida total exceda un cierto valor  $p$

iv) Multiplicar la probabilidad estimada en el paso anterior por la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ . Este procedimiento debe realizarse para cada evento  $i$  incluido en el módulo de amenaza.

### 8.6.2 Pérdida anual esperada

El área bajo la Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP) es conocida como la Pérdida Anual Esperada (PAE). Así, la PAE representa el valor esperado (anual) de la pérdida el cual, en un esquema simple de seguro, corresponde a la prima actuarialmente justa. Este valor puede obtenerse a través de la integración de la  $v(p)$  o a partir de la siguiente expresión:

$$PAE = \sum_{i=1}^{\text{eventos}} E(P | i) F_A(i) \quad [8-32]$$

Para el cálculo de estas métricas de riesgo se puede hacer uso del software ERN-CAPRA GIS<sup>32</sup>, el cuál es una plataforma de código abierto, financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo, el Banco Mundial y la Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres.

## 8.7 Módulo de beneficio-costo

El objetivo de este módulo es comparar la reducción de las pérdidas esperadas con los costos de reforzamiento, suponiendo una intervención estructural hipotética de los edificios. Esta comparación permite evaluar la viabilidad financiera de la reducción de la vulnerabilidad sísmica de las instalaciones. El procedimiento que se lleva a cabo en este módulo es similar al enfoque presentado en Grossi (2005), en el cuál se define las alternativas (estado actual y reforzado); se determinan los costos de mitigación; se evalúan los beneficios y finalmente se comparan frente a los costos estimados.

Como simplificación al enfoque probabilista de evaluación de beneficio-costo propuesto en Mora et al. (2009), la relación de beneficio-costo  $BC$  se plantea como la diferencia entre el valor presente de las pérdidas en el estado actual  $L_U$  y el reforzado  $L_R$ , divididas por los costos de reforzamiento  $C_R$ , tal como se presenta en la siguiente expresión:

$$BC = \frac{L_U - L_R}{C_R} \quad [8-33]$$

En donde,  $L_U$  es el valor presente de la pérdida asociada a todos los posibles eventos en el caso no reforzado.  $L_R$  es el valor presente de la pérdida asociada a todos los posibles eventos para el caso reforzado. Por último,  $C_R$  representa los costos de reforzamiento.

El valor presente de las pérdidas, en los estados actual y reforzado, se estima siguiendo la ecuación:

$$L = \sum_{i=1}^{\alpha} \beta_i e^{-\tau \cdot t_i} \quad [8-34]$$

En donde  $\tau$  es la tasa de interés (anual) y  $t_i$  es el periodo de ocurrencia de la pérdida  $\beta_i$ . De esta expresión, es importante resaltar que la secuencia de los eventos y los valores de las pérdidas son desconocidos (no se conoce ni  $t_i$  ni  $\beta_i$ ). Considerando que la pérdida anual esperada corresponde a un valor a perpetuidad, el valor esperado de  $L$  puede ser calculado de acuerdo a la siguiente Ecuación:

<sup>32</sup> Este software se encuentra disponible en la página web: <http://www.ecapra.org/capra-gis> [última consulta 24/10/2012]

$$E[L] = \frac{E[\beta]}{\tau} \quad [8-35]$$

En donde  $E[\beta]$  representa la PAE estimada en el módulo de riesgo (ver apartado 8.6.2).

### 8.7.1 Costos de reforzamiento

Los costos de reforzamiento están relacionados con la intervención estructural adoptada para garantizar un nivel determinado de seguridad. Por esta razón, estos dependen del sistema estructural y del nivel de diseño sísmoresistente. En los documentos FEMA 156 (FEMA 1994) y FEMA 157 (FEMA 1995), se sugieren costos típicos de la rehabilitación sísmica. A partir de la evaluación estadística de costos de aproximadamente 2000 proyectos de rehabilitación sísmica incluidos en el informe FEMA 156, una aplicación de internet, llamada *Seismic Rehabilitation Cost Estimator*<sup>33</sup>, permite estimar los costos de rehabilitación usando información básica o detallada de los edificios.

En el primer caso, los datos relevantes son el periodo de construcción, el sistema estructural, la zona de amenaza sísmica y el nivel de comportamiento de la rehabilitación. Estos datos se expresan en dólares por área construida (pie cuadrado). Estos datos corresponden a las técnicas constructivas y niveles de seguridad exigidos en Estados Unidos. A su vez, dichos niveles de seguridad estarán relacionados con la amenaza sísmica. No obstante, establecen valores de referencia para realizar estudios generales sobre conjuntos de edificios clasificados en tipologías estructurales.

Para estudios a nivel nacional y supranacional, en los que se considere un conjunto heterogéneo de edificios, es recomendable realizar una estimación apropiada de los costos de reforzamiento a partir de experiencias locales, ya sea considerando porcentajes promedio del valor de la obra como porcentaje del valor de reposición del edificio, o precios por metro cuadrado, según tipología estructural.

### 8.7.2 Tasa de descuento

La tasa de descuento se utiliza para convertir a valor presente, los costos de las pérdidas probables que puedan ocurrir en periodos futuros, durante la vida útil del proyecto. Esta tasa es relevante en la toma de decisiones para la rehabilitación sísmica de edificios. Mientras la tasa disminuye, los futuros beneficios se incrementan y de esta manera crece la relación de beneficio-costos. En el caso de Thessaloniki (Grecia), Kappos y Dimitrakopoulos (2008) utilizan una tasa de descuento de 4% para el análisis de viabilidad del reforzamiento sísmico de edificios, siguiendo un análisis de costos durante la vida útil del proyecto. Por otro lado, el modelo de beneficio-costos para la evaluación de la rehabilitación sísmica de edificios federales (FEMA 256) sugiere valores para la tasa de descuento que varían entre 3% y 6%. Estos valores son útiles como referencia para las aplicaciones que se presentan en el capítulo siguiente, respecto a la reducción del riesgo sísmico en escuelas de Latinoamérica (Capítulo 9).

### 8.7.3 Evaluación de beneficio-costos considerando múltiples variables de decisión

Tal como se mencionó en el módulo de exposición, el valor de los edificios esenciales se asocia a su valor económico, a las pérdidas que puedan generar dada su falla (por el número de ocupantes, o la falta de funcionamiento en situaciones de emergencia o por el potencial de generar otro desastre), y a la producción de servicios de atención a la comunidad. Cada una de estas características puede ser considerada una variable de decisión sobre la seguridad de estas instalaciones. Para la cuantificación de las pérdidas asociadas a cada variable, es posible adoptar el procedimiento presentado en el módulo de

<sup>33</sup> Para mayor información consultar: FEMA-Seismic Rehabilitation Cost Estimator. [En línea]. Disponible en: <http://www.fema.gov/srce/> [Última consulta 09/02/2012]

riesgo para obtener tasas anuales de excedencia del número de heridos o de pérdidas en la producción de servicios.

Ya que sobre estas variables no se considera apropiado asignar un valor económico, los beneficios de los reforzamientos estructurales no pueden compararse frente a sus costos estimados. Como alternativa, se plantea definir valores de referencia para las tasas de excedencia de heridos y de pérdida de funcionamiento, según el contexto del análisis, tal como se sugiere en Ang y Lee (2001). Estos valores corresponderán a los niveles de riesgo aceptable para tales variables de decisión.

Esta evaluación complementa el análisis de beneficio-costos. Al identificar otros beneficios y requisitos de seguridad adicionales a la reducción de las pérdidas económicas, se enriquece el análisis y así las decisiones que puedan colaborar a la reducción de la vulnerabilidad de los edificios y de sistemas esenciales.

## **8.8 Comentarios al análisis de beneficio-costos**

Hasta el momento, se ha presentado el análisis de beneficio-costos como una herramienta para decidir si las alternativas de reducción de riesgos son económicamente posibles o no. A pesar de su utilidad, Hansson (2007) resalta los problemas de su aplicación en cuanto a la formulación del análisis, lo cual determina cuáles son las alternativas de decisión que se incluyen en el estudio; la caracterización de las alternativas, lo cual hace referencia a los métodos para estimar las consecuencias de cada alternativa; y por último a los mecanismos empleados para valorar las consecuencias. A continuación se presentan detalles de estos problemas y se revisan frente a la metodología que se propone en este capítulo sobre el análisis de beneficio-costos de reducción del riesgo sísmico en edificios y sistemas esenciales.

### *8.8.1 Formulación del análisis*

En el análisis de beneficio-costos, una alternativa no se evalúa por sí misma, sino en comparación con otras, o al menos, en comparación con la selección de ninguna alternativa (como reforzar o no reforzar los edificios). Por esta razón, el análisis de beneficio-costos implica la valoración de qué puede pasar de acuerdo a las opciones elegidas (Hansson, 2007).

En el caso de los servicios y sistemas esenciales que prestan servicios a la comunidad, es responsabilidad del estado velar por su seguridad y por los servicios que prestan. De esta manera, en el análisis de beneficios y costos respecto a su seguridad sísmica, es de interés incluir los efectos directos e indirectos que pueda tener la interrupción de sus servicios. De otra manera, puede ocurrir que sólo desde la perspectiva financiera, la reducción de la vulnerabilidad de los edificios no sea viable, pero que al incluir otras variables como la salud, la educación, o el valor cultural, los resultados y decisiones sean diferentes.

Asimismo, la decisión que se tome depende de las alternativas a considerar. Al respecto, se señala que un par de alternativas pueden ser rehabilitar sísmicamente los edificios, o dejarlos en el estado actual. No obstante, otra opción puede ser demoler un conjunto de instalaciones (por ejemplo, las más antiguas), reemplazándolas por otras menos vulnerables y realizar reforzamientos sísmicos a un conjunto más pequeño. Estas alternativas pueden generar diferentes decisiones según las perspectivas y los costos asociados.

Por otro lado, las alternativas incluidas en los análisis de beneficio-costos hacen referencia a un contexto en el cual se toman decisiones. Individuos a nivel local, regional, nacional, pueden tener diferentes perspectivas del problema y por lo tanto, presentar y valorar diferentes alternativas (Hanson, 2007).

En cuanto a las variables de decisión, es deseable que un análisis de beneficio-costos sea lo más completo posible, una buena sinopsis, que cubra todas las decisiones posibles respecto a las alternativas consideradas. Si es posible llevar a cabo un procedimiento de optimización que cubra todos los aspectos, entonces se deberá buscar que las decisiones sean tomadas de acuerdo a este tipo de análisis.

Sin embargo, tales problemas no siempre funcionan debido a la dificultad para procesar la información necesaria con eficiencia y a las limitaciones de comprensión cuando se enfrentan problemas de gran complejidad. En este sentido, se resaltan las dificultades de los procesos de toma de decisiones en los cuales se subdividen los criterios de elección, como por ejemplo, en el caso de la seguridad sísmica de los hospitales, en el cual intervienen los beneficios de la reducción de pérdidas económicas, de la reducción del número de heridos sin atención médica y de la reducción en los impactos a la atención de la salud. Para estos casos, pueden ser preferibles las decisiones que se tomen a través de votaciones o del común acuerdo entre diferentes agentes y/o personas responsables. Estas limitaciones hacen que sea necesario ajustar los análisis de beneficio-costo a perspectivas limitadas (Hanson, 2007).

### *8.8.2 Caracterización de las opciones*

El resultado de un análisis de beneficio-costo es sensible a cómo se describen y caracterizan las alternativas (Hansson, 2007). En el caso de evaluación de alternativas de reducción de riesgo, se hace referencia a la metodología usada para la estimación de pérdidas, así como a su alcance. En este Capítulo se ha propuesto una metodología probabilista para la evaluación de pérdidas por terremotos. Dicha metodología considera los efectos posibles causados por todos los eventos potencialmente dañinos de acuerdo con un modelo de peligrosidad de la zona. Bajo este enfoque es posible evaluar la reducción en la pérdida esperada de un conjunto de edificios, dada una intervención estructural hipotética. Al establecer, con ciertos supuestos, los costos de tales intervenciones, es posible encontrar un punto óptimo entre el costo del reforzamiento y la ganancia en seguridad.

Dada la dificultad (imposibilidad) para definir con certeza si los edificios van a sufrir un terremoto, cuándo podrá ocurrir, si dicho terremoto puede producir daños, o si con los reforzamientos estructurales se van a reducir efectivamente las pérdidas esperadas, la decisión sobre la reducción de la vulnerabilidad no es sencilla. Además, esta decisión es sensible al valor de la instalación durante su vida útil. Es diferente perder un edificio o sistema expuesto al peligro sísmico justo cuando éste ha sido construido, a perder dicho edificio o sistema cuando su vida útil ya ha finalizado. En el primer caso, la pérdida del edificio no sólo hace referencia a los costos de reposición del edificio, sino también a la pérdida de los beneficios esperados durante la vida útil de la instalación. En el segundo caso, al considerar que ya habría finalizado su vida útil, los beneficios futuros de su funcionamiento pueden considerarse como nulos.

En este sentido, dadas las incertidumbres asociadas al análisis, debe cuestionarse si los resultados del enfoque probabilista son lo suficientemente precisos para usarlos en análisis económicos y de beneficio-costo (Doom 2010). En general, este procedimiento es válido cuando los resultados de los análisis probabilistas pueden ser calibrados con tasas de recurrencia o frecuencias observadas. De esta manera, los resultados del análisis probabilista pueden ser usados en un sentido comparativo más no absoluto para contrastar la seguridad o economía de diferentes alternativas de diseño (Elms 2004).

De acuerdo con FEMA 256 (1994), un modelo estadístico de beneficio-costo no es suficiente para tomar una decisión sobre efectuar o no efectuar la rehabilitación sísmica de un edificio, ya que esta decisión también depende de otros factores y políticas de decisión que quedan fuera del contexto del análisis de beneficio-costo. Por ejemplo, las rehabilitaciones sísmicas son usualmente desarrolladas en combinación con la renovación de los edificios, actualización del sistema eléctrico y mecánico, del sistema de tuberías, entre otros. El análisis de beneficio-costo no puede evaluar proyectos de este tipo.

Por otro lado, las decisiones sobre el reforzamiento de los edificios están restringidas por los presupuestos disponibles, la prioridad asignada a la seguridad sísmica versus otras necesidades. Por esta razón, aunque el modelo pueda determinar en forma comparativa cuáles son los beneficios de las alternativas de rehabilitación, no corresponde a una respuesta absoluta para decidir si realizar o no el reforzamiento sísmico de las instalaciones.

Así, al comunicar que las estimaciones de riesgo representan los resultados de un modelo, que no corresponden a medidas observadas de tasas de falla, se transmite una señal de precaución a los

tomadores de decisiones para la formulación de planes de gestión del riesgo. De esta manera los administradores de riesgos deben observar la imposibilidad de un conocimiento preciso de las consecuencias esperadas, lo cual debe conducir a la formulación de estrategias de gestión ante un conjunto probable de escenarios de pérdida.

Cuando las probabilidades de los eventos son lo suficientemente inciertas, se puede abandonar este parámetro como decisión para sólo considerar el valor de las consecuencias y tomar un enfoque en el cual se minimicen las pérdidas máximas probables (mini-max) sin importar tales probabilidades. Este enfoque es el más conservativo, ya que el tomador de decisiones está dispuesto a gastar hasta el valor de la pérdida para prevenirla. Este enfoque es la base del principio de precaución en el cual se sugiere que cuando las consecuencias son altas y las probabilidades inciertas, se escoja el enfoque más conservativo frente a las pérdidas (Jablonowski 2005).

En la medida en la cual el análisis de beneficio-costos se hace más completo, cubriendo todas las consecuencias (que puedan ser identificadas y medidas en una forma razonablemente uniforme), se incrementa la incertidumbre del análisis. Así, la inhabilidad para predecir con certeza las consecuencias de las alternativas no solo afecta las relaciones de beneficio-costos, sino también la toma de decisiones y la gestión de riesgos.

### *8.8.3 Valoración de beneficios y costos*

Los aspectos más discutidos sobre el análisis de beneficio son en el tratamiento de valores que no se pueden medir en las mismas unidades y la asignación de valores económicos a bienes que no los poseen (Baum, 2010; Hansson, 2007; Anderson, 1988). El análisis de beneficio-costos implica asignar valores monetarios a un listado de beneficios y resumir las ventajas obtenidas (si las hay) en términos del valor presente. El método no es trivial ya que en algunos casos requiere la transformación de consecuencias no medibles en términos económicos como la pérdida esperada de vida. Como resultado, frecuentemente el análisis de beneficio-costos se centra sólo en algunas consecuencias e ignora otras (Aven y Kristensen 2005). Así en problemas de decisión con múltiples dimensiones (social, política, económica) el análisis de beneficio-costos los reduce a una sola, siendo sesgado a aspectos económicos (Hansson, 2007).

No obstante, el problema del análisis no sólo se limita a la valoración de las alternativas en términos económicos, sino a la necesidad de comparar bienes concebidos como incomparables para la toma de decisiones (Hansson, 2007). Un ejemplo de esta situación corresponde a la selección del nivel de seguridad que debe garantizarse a los edificios según su importancia en los códigos de construcción sismoresistente en general, y en la norma española NSCE-02 (2002), en particular.

En este código, a las construcciones catalogadas como monumentos históricos o artísticos, o bien de interés cultural o similar, se les considera dentro de la categoría de edificios de importancia especial, a los cuales se les asigna un factor de importancia que amplifica la demanda sísmica aumentando así los requisitos de su seguridad. En esta categoría también se encuentran hospitales, así como otros edificios cuyo funcionamiento es necesario en situaciones de emergencia. De esta manera, el valor de los bienes culturales se aprecia en la misma manera que los servicios de atención a emergencias. No obstante, los centros educativos no hacen parte de esta categoría. Esto puede llevar a pensar que la seguridad de los alumnos, así como la continuidad de los servicios de educación, no son apreciados en la misma manera (tienen menor valor) que los bienes culturales o los servicios de respuesta a crisis. En estos casos, las ventajas de un análisis de beneficio-costos no son evidentes ya que las decisiones se toman a partir del consenso y discusión entre los comités de expertos, los gestores de riesgo y los representantes de los sectores interesados.

En ocasiones, ante la imposibilidad de medir en términos económicos aspectos como el valor de la vida, suelen establecerse comparaciones con tasas de fatalidad o de accidentalidad observadas en otros contextos, para los cuales se han definido niveles de riesgo aceptable, como el consumo de alcohol, tabaco, el trabajo en actividades peligrosas, o la fatalidad de sistemas de transporte (Ellingwood, 2001, Hansson 2007).



No obstante, debe señalarse que dichas tasas hacen referencia a diferentes contextos, sobre las cuales las decisiones pueden tener diferentes implicaciones. A pesar de la aparente consistencia con otros riesgos, expresados en tasas anuales de falla o de mortalidad, las comparaciones de riesgos de diferentes contextos deben realizarse con cuidado. Los riesgos que son aceptados en un contexto específico, por ejemplo la industria de la construcción o la aviación, pueden no ser aceptables para los ocupantes de los edificios o el público en general. La aceptación del riesgo depende en la medida en la cual voluntariamente se incurre en él. Umbrales para niveles de riesgo aceptable tienden a ser altos para los riesgos que no se observan a corto plazo. Asimismo, cuando las amenazas son desconocidas, crean temores que resultan en aversión al riesgo y, por lo tanto, en tasas de seguridad más altas (Ellingwood 2001).

La mejor alternativa en estos casos es utilizar tasas de accidentalidad, de fatalidad, o de voluntad de pago que pertenezcan al mismo contexto para el cual se realiza el análisis de beneficio-costos. En este caso, haría referencia a cuánto se estaría dispuesto a pagar por la seguridad de la vida de los alumnos (si llega a ser moral o políticamente aceptable), o por el continuo funcionamiento de los servicios de emergencia, o cuál sería la tasa de riesgo aceptable respecto a la pérdida de sus funciones, tal como se considera en Ang y Lee (2001).

Dado que la sociedad tiene la obligación de asegurar que todos los ciudadanos tengan un nivel básico de protección, y considerando la seguridad como un derecho humano que debe respetarse, la destinación de recursos para proveer dicha seguridad no debe estar únicamente fundamentada en argumentos económicos. La reducción de la vulnerabilidad puede considerarse como un asunto de los derechos humanos, lo cual puede tener prioridad sobre un criterio de optimización económica (Sarewitz et al. 2003).

De acuerdo con Saleh(2006), en el diseño de sistemas complejos, en particular aquellos en los cuáles el acceso es limitado para su mantenimiento (como satélites espaciales, o sistemas submarinos), se requieren altos niveles de confiabilidad, llevando a los diseñadores hacia diseños redundantes y costosos. Este aumento en la confiabilidad se deriva de la aversión al riesgo frente a sistemas cuyo valor es elevado. En forma análoga, sobre los edificios esenciales se desean mayores niveles de seguridad para evitar su pérdida, debido a los altos costos que supone su reparación.

Los análisis de riesgo (y de beneficio-costos) entregan recomendaciones sobre cuál es la mejor decisión. Sin embargo, el tomador de decisiones debe estar más allá del análisis. Cuando se enfrentan grandes incertidumbres, ningún procedimiento mecánico puede ser adoptado basado en dicho análisis. Consideraciones éticas y políticas se requieren y éstas están basadas en perspectivas más amplias que los análisis económicos e ingenieriles (Aven y Kristensen 2005).

En cuanto a la definición de los niveles apropiados de seguridad, puede que medidas extras de seguridad no sean defendibles desde la perspectiva de un análisis de beneficio-costos (con un enfoque en pérdidas económicas), pero si pueden ser justificadas desde la perspectiva de la protección contra los riesgos sobre los cuáles no se pueden estimar sus probabilidades de ocurrencia, así como contra modos de falla desconocidos (Doorn 2010).

## **8.9 Resumen y discusión**

En este Capítulo se ha presentado una metodología para el análisis de beneficio-costos de edificios esenciales compuesta por diferentes etapas o módulos. En el módulo de amenaza se genera un conjunto de eventos aleatorios, caracterizados por su magnitud y frecuencia de ocurrencia, de acuerdo a la sismicidad de la región. Para cada evento, en el área de análisis se estiman las aceleraciones espectrales, para diferentes periodos de respuesta estructural, empleando leyes de atenuación.

En el módulo de exposición los edificios se clasifican en tipologías estructurales para las cuales se conocen espectros de capacidad. A su vez, para cada edificio expuesto se describe el valor económico, el número de ocupantes y se presentan alternativas para evaluar la producción de sus servicios. Por otro

lado, en el módulo de vulnerabilidad y de curvas de pérdida esperada se establecen distribuciones de probabilidad de la pérdida económica como función del desplazamiento espectral de la estructura. Asimismo, se establecen relaciones entre la probabilidad de colapso y el número de heridos, y entre el daño esperado y la pérdida de funcionalidad. Dichas relaciones se definen para los edificios en su estado actual, así como en el caso de un hipotético reforzamiento.

Para cada uno de los escenarios generados en el módulo de amenaza, se evalúan los valores esperados de pérdida para cada variable de decisión (pérdida económica, número de heridos, pérdida de funcionalidad) empleando las relaciones desarrolladas en el módulo de vulnerabilidad y de curvas de pérdida esperada. Así, al realizar este procedimiento para todos los elementos expuestos, es posible obtener la probabilidad de excedencia de cada valor de pérdida dada la ocurrencia del evento. Al multiplicar estos valores por la frecuencia anual de ocurrencia de los eventos, y realizar la suma sobre todos los escenarios del análisis, es posible obtener la tasa anual de excedencia de pérdidas de cada variable de decisión. Finalmente, para obtener la pérdida anual esperada (de cada una de las variables de decisión) es necesario integrar la curva de excedencia de pérdidas correspondiente.

El módulo de beneficio-costos permite estimar los costos esperados del reforzamiento de edificios a partir de experiencias en proyectos anteriores. A la vez, se compara el valor presente de la pérdida anual esperada en el estado actual y en el caso de un hipotético reforzamiento. Al comparar la reducción en las pérdidas con los costos de reforzamiento se establece una relación de beneficio-costos.

La metodología propuesta para la estimación de pérdidas se basa en modelos de la industria de seguros y se considera la más apropiada para evaluar la conveniencia del reforzamiento estructural. No obstante, el alcance de esta metodología está limitado a evaluaciones preliminares, útiles para procedimientos de priorización. Dadas las incertidumbres del análisis de pérdidas, los resultados no pueden considerarse como medidas objetivas del riesgo y por lo tanto, los análisis de beneficio-costos son sólo válidos como comparaciones y valoraciones relativas de las ventajas económicas de diferentes alternativas de diseño estructural. Por otro lado, la dificultad para evaluar en conjunto variables de decisión que no se pueden medir en las mismas unidades, tales como las pérdidas económicas y la vida humana, hace que las decisiones sobre la reducción de riesgos deban tomarse en contexto, considerando aspectos de índole social y político.

## **9 Evaluación del beneficio-costo de la mitigación del riesgo sísmico de centros educativos en Latinoamérica**

### **9.1 Introducción**

Los programas de reducción de la vulnerabilidad sísmica requieren información respecto a la tipología de los edificios, su ubicación y sobre sus propiedades estructurales. También es valioso identificar su valor económico, su uso y número de ocupantes. Las técnicas de construcción y las tipologías estructurales se identifican usualmente mediante inspecciones (ver Carreño et al. 2010; IGC 2010). A partir de estos datos, para evaluar el comportamiento sísmico de los edificios más comunes, es necesario desarrollar modelos estructurales detallados, tomando en cuenta sus propiedades estructurales, la peligrosidad sísmica correspondiente a su ubicación y los requerimientos sísmicos locales (ver Faleiro et al. 2008; Mata et al. 2008; Vielma et al. 2010; Vargas et al. 2010; Vargas et al. 2011, Vargas et al. 2012, Avila-Haro et al. 2012, Vargas et al. 2013). Sobre esta base, se pueden definir las alternativas para las posibles intervenciones estructurales (ver López et al. 2007).

Para la gestión de la seguridad y del riesgo sísmico, Barbat et al. (2006), Barbat et al. (2008), Carreño et al. (2007 a), Carreño et al. (2007 b), Lantada et al. (2010) y Lantada et al. (2011) han propuesto procedimientos para desarrollar escenarios útiles para identificar, a la escala urbana, las zonas más críticas respecto a la vulnerabilidad de los edificios expuestos.

Para efectos de priorización, métodos simplificados han sido propuestos para calificar la seguridad de los edificios. En el caso de las escuelas, en Portugal y Estambul se han desarrollado estimaciones de daños empleando índices de vulnerabilidad (Ferreira et al. 2008; Ferreira y Proença 2008). Así mismo, índices de capacidad e índices de deriva de entrepiso han sido considerados en Estambul (Yakut et al. 2008) y en Bogotá (Proyectos y Diseños – P&D 2000). Para buscar un equilibrio entre la complejidad de las estimaciones de daño y la cantidad de los edificios estudiados, Grant et al. (2007) presentan una metodología para priorizar la intervención de centros educativos, considerando índices basados en la aceleración pico del suelo, índices de vulnerabilidad y métodos simplificados basados en mecánica estructural.

A escala supranacional, la evaluación del riesgo sísmico de un portafolio de edificios (como las escuelas) es útil para el desarrollo de políticas de gestión de la seguridad, así como para la percepción y comunicación del riesgo. Obtener información detallada de los edificios y desarrollar modelos detallados de su comportamiento, son actividades que requieren un esfuerzo significativo que no las hacen factibles. Además, a esta escala, la toma de decisiones requiere estimaciones agregadas a nivel nacional o subnacional, útiles para calificar áreas de acuerdo al riesgo sísmico. Por esta razón se consideran métodos simplificados, así como hipótesis sencillas sobre la vulnerabilidad de los edificios.

En este sentido, este Capítulo presenta la aplicación de la metodología presentada en el Capítulo 8 para la estimación del riesgo y del beneficio-costo de la reducción de la vulnerabilidad del área construida en centros educativos en países de Latinoamérica y del Caribe. Los países incluidos en el análisis son: Argentina (ARG), Bolivia (BOL), Chile (CHL), Colombia (COL), Costa Rica (CRI), Ecuador (ECU), El Salvador (SLV), Guatemala (GTM), Honduras (HND), México (MEX), Nicaragua (NIC), Panamá (PAN), Perú (PER) y Venezuela (VEN). Este trabajo incluye: (i) desarrollar una estimación del área construida de las instalaciones educativas y de su vulnerabilidad; ii) estimar la Curva de Excedencia de Pérdidas (CEP) y la Pérdida Anual Esperada (PAE) del conjunto de centros educativos, tanto en el estado actual como en el caso de un hipotético reforzamiento; iii) obtener una relación de beneficio-costo de la mitigación del riesgo.

Los resultados de este estudio fueron incluidos en el *Global Assessment Report* (GAR 2011, ERN-AL 2010), como un caso de estudio de los beneficios de las inversiones en la reducción de vulnerabilidad, considerando que este análisis puede ser útil para guiar programas nacionales de reducción de la vulnerabilidad y riesgo del sector educativo.

## 9.2 Peligrosidad sísmica

Para cada país, se elaboró un modelo de la amenaza sísmica a partir de los datos geológicos y tectónicos disponibles, así como de los catálogos sísmicos y otros estudios previos (ver Tabla 9–1). Estos datos fueron útiles para establecer la geometría de las fuentes sísmicas y sus parámetros de sismicidad. Una vez definidas las fuentes sísmicas, se empleó el software CRISIS 2007 versión 7.2 para generar aleatoriamente un conjunto de eventos de diversa magnitud. En la Tabla 9–1 se presentan el número de eventos generados en cada país. Para cada evento, el valor esperado de la aceleración espectral en un determinado sitio de interés (para el 5% del amortiguamiento crítico) se obtuvo a través de las leyes de atenuación definidas por Gallego (1999). Estas expresiones relacionan la magnitud, la posición relativa entre el punto de interés y la fuente, y la aceleración espectral.

Esta información se resume en un archivo en el cual incluyen múltiples mallas del territorio analizado. Cada malla corresponde a las aceleraciones espectrales, para diferentes periodos de respuesta estructural, calculadas para cada uno de los eventos aleatorios generados. Dichos eventos están caracterizados por su magnitud  $M_w$  y su frecuencia anual de ocurrencia. Como referencia a la peligrosidad sísmica de la región analizada, en la Figura 9-1 se presenta un mapa de aceleración pico del suelo, para un periodo de retorno de 475 años.

**Tabla 9–1 Referencias usadas para la modelización de la peligrosidad sísmica en cada país**

País	Número de escenarios sísmicos	Referencia
Argentina	32712	ERN-AL (2009)
Chile	24564	
Bolivia	43710	
Ecuador	31422	
Mexico	104514	
Peru	50898	
Colombia	55338	Comité AIS-300 (1996)
Costa Rica	18444	Benito et al. (2008) Climent et al. (2008) Escobar et al. (2008) Molina et al. (2008)
El Salvador	21768	
Guatemala	24450	
Honduras	26268	
Nicaragua	26460	
Panama	24342	Estevez & Schubert (1993)
Venezuela	19620	

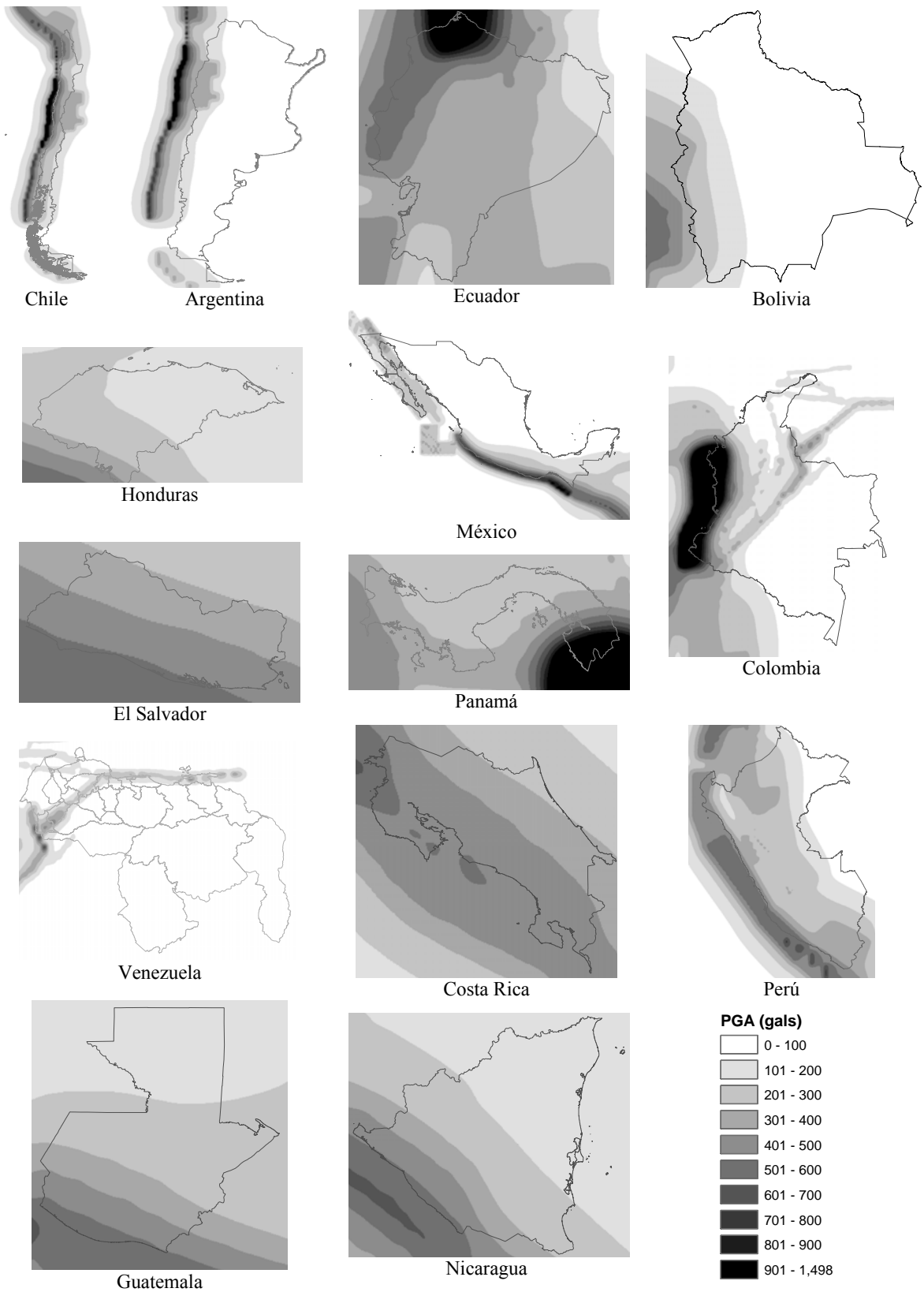


Figura 9-1 Aceleración pico del suelo para un escenario de periodo de retorno de 475 años

### 9.3 Estimación del área y valor de los centros educativos expuestos al peligro sísmico

#### 9.3.1 Estimación del área de los centros educativos

El área construida de los centros educativos se estima a nivel municipal. Procedimientos similares se han propuesto en Goran et al. (2009) para calcular los daños resumiendo los valores expuestos a la escala de ciudades. Para caracterizar el portafolio expuesto, es necesario identificar: i) el área construida; (ii); el valor económico y (iii) las tipologías estructurales representativas. Estas estimaciones se fundamentan en datos de baja resolución o en criterios de experto.

Para identificar el portafolio de edificios expuestos, es posible realizar estimaciones del número de edificios a partir de datos de población, datos de tasas de ocupación promedio de los edificios (personas por edificio), datos catastrales o del análisis de imágenes tomadas con sensores remotos (Dell'Acqua et al. 2012).

A nivel nacional, las tipologías estructurales representativas pueden seleccionarse dependiendo de las clases de edificios y técnicas constructivas, de acuerdo al sistema estructural, las alturas típicas y el periodo de construcción (Bommer et al. 2002; Barbat et al. 2007).

El desarrollo de encuestas e inspecciones de campo para identificar las tipologías estructurales, así como el uso de modelos detallados para definir el comportamiento sísmico de los edificios es deseable, especialmente para tomar decisiones sobre su intervención estructural (López et al. 2007). Dado que el tiempo y el costo requerido para este procedimiento puede ser largo, la opinión de experto puede ser considerada, así como la descripción de las tipologías de los edificios disponibles en bases de datos como, por ejemplo, el proyecto World Housing Encyclopedia-WHE (EERI-IAEE 2012), ver <http://www.world-housing.net/>, o el proyecto PAGER-WHE (Jaiswal et al. 2010).

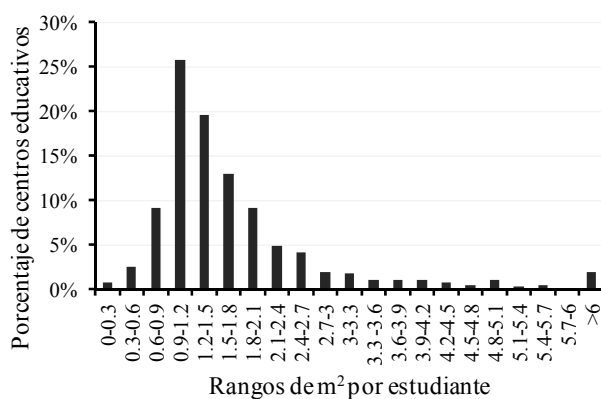
En este estudio se emplearon las proyecciones y censos de población, a nivel municipal, para estimar el área construida total de los centros educativos. Dicha área se consideró como el producto del número de alumnos y un área promedio por alumno. Por otro lado, el área de los centros educativos públicos se consideró como un porcentaje del área total. Estos porcentajes fueron obtenidos del promedio de alumnos matriculados en zonas rurales y urbanas y de los rangos de población en cada municipio (ver Tabla 9–2):

**Tabla 9–2 Rangos de población y porcentajes de centros de educación pública**

	Rangos de población	Educación pública (%)
Alto	> 100,000	50
Medio	20,000 to 100,000	80
Bajo	< 20,000	100

Dado el alcance del estudio y la información disponible, algunas simplificaciones han tenido que ser consideradas para definir un área promedio por alumno a nivel nacional. Estos supuestos están relacionados con indicadores de progreso en la educación de cada país, con la inversión en educación y con información local sobre el número de estudiantes y el área construida de las instalaciones educativas.

De la base de datos de los centros educativos públicos incluidos en el programa de análisis de vulnerabilidad y reducción del riesgo sísmico en Bogotá, se encontró que el área construida por alumno, en la mayoría de las escuelas, se encontraba entre 0.9 y 1.2 m<sup>2</sup> (ver la Figura 9-2). Por otro lado, en el Manual para la estimación de los impactos socioeconómicos de los Desastres Naturales (ECLAC 2003), se sugieren diferentes valores para el área construida por alumno. En el caso de Argentina, por ejemplo, el área construida por alumno es cercana a 6 m<sup>2</sup> (ver Tabla 9–3).



**Figura 9-2 Frecuencias relativas de los rangos de m<sup>2</sup> por alumno.**

Fuente: Secretaría de Educación del Distrito Capital (SED) (2004), Bogotá, Colombia

**Tabla 9-3 Área total y de salones por estudiante**

Área total construida (m <sup>2</sup> por alumno)	Argentina 6	Paraguay 1.2
Área de aulas (m <sup>2</sup> por alumno)	Uruguay y Perú 1.5	Guyana y Haití 0.9

Fuente: ECLAC (2003)

Respecto al progreso del sector educativo a nivel nacional, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO por su sigla en inglés), el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP), el Fondo de Población de Naciones Unidas (UNFPA), el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) y el Banco Mundial, lanzaron en 1990 el movimiento *Education for All-EFA*. En esta iniciativa se establecieron metas y objetivos para el sector educativo. El avance de este programa es monitoreado a través de un indicador denominado *Education for All Development Index-EDI*. Este es un indicador compuesto que evalúa las metas en educación primaria, alfabetismo en adultos, igualdad de género y calidad. Este índice varía entre 0 y 1; siendo 1 la máxima calificación y representa un cumplimiento completo de las metas de educación (UNESCO 2010).

En el caso de Latinoamérica, Argentina, Aruba, Cuba y Uruguay han alcanzado la mayoría de las metas; Chile, México, Saint Lucia, Trinidad y Tobago y Venezuela, están cerca de alcanzar los cuatro objetivos del programa EFA. El índice EDI para estos países varía entre 0.95 y 0.96. Dieciséis países de la región se encuentran en una posición intermedia, cuyo EDI varía entre 0.80 y 0.94. En esta situación se encuentran Bahamas, Barbados, Belize, Bolivia, Brasil, Colombia, República Dominicana, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Panamá, Paraguay, Saint Vicent y las Granadinas y Suriname. Finalmente, sólo Nicaragua, con un EDI justo por debajo de 0.80, es considerado lejos de alcanzar las metas del programa EFA (UNESCO 2010).

Teniendo en cuenta estos datos, se consideró útil el índice *Educational for All Development Indicator – EDI* (UNESCO, 2010) para establecer una relación del área construida por alumno de acuerdo con el progreso en educación para cada país. De esta manera, usando los índices de construcción arriba mencionados y la escala del EDI, fue posible estimar el área construida por estudiante bajo el supuesto que entre mayor valor del EDI, más amplias las instalaciones. Los resultados de la relación entre el EDI y el área por alumno se presentan en la Figura 9-3. Como complemento a la información del índice EDI, en la Figura 9-4 se presenta la inversión pública en educación. En esta Figura, los países incluidos en este análisis se encuentran resaltados.

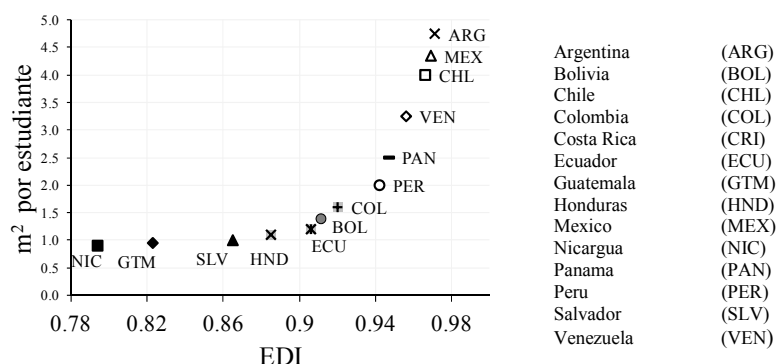


Figura 9-3 Relación entre el EDI y los metros cuadrados por alumno

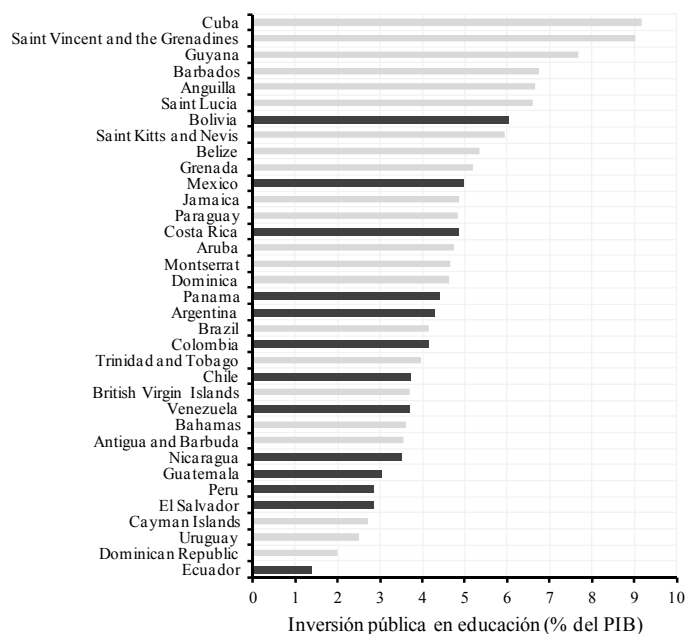
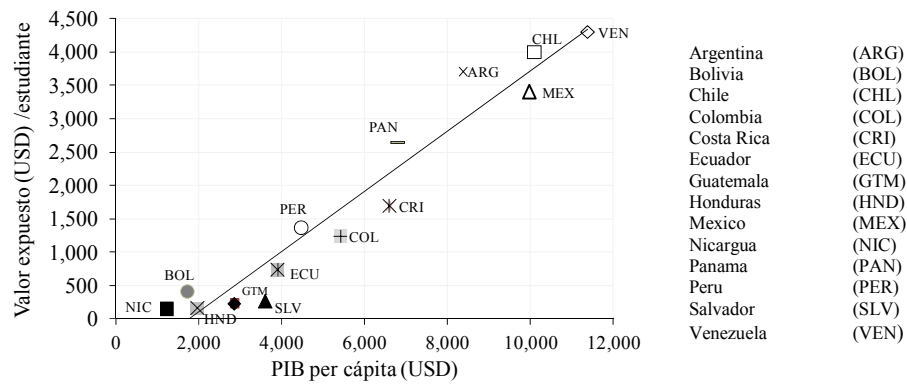


Figura 9-4 Gasto público en educación como porcentaje del PIB

### 9.3.2 Estimación del valor económico de los centros educativos

Para estimar el costo de los edificios, se utilizaron los precios por metro cuadrado disponibles en los institutos nacionales de estadística, así como en los informes de la base de datos del proyecto World Housing Encyclopedia (EERI-IAEE 2012). Debido a las limitaciones de esta información, fue necesario establecer una relación entre el valor expuesto por alumno en términos del PIB per capita. Así, los costos por metro cuadrado fueron ajustados de acuerdo a estos parámetros (ver Figura 9-5).

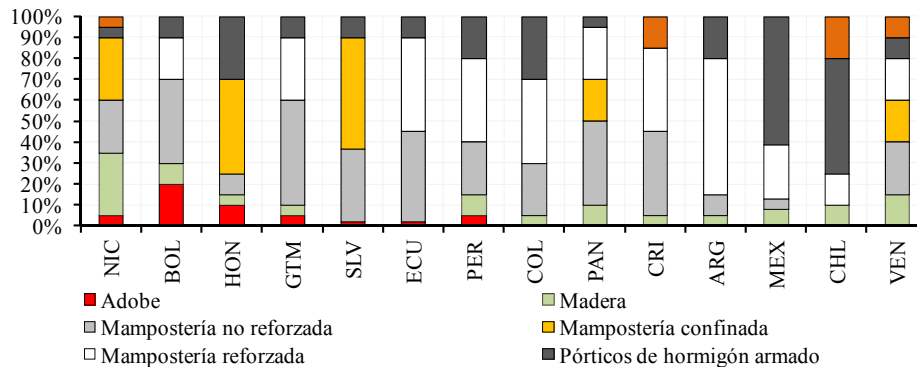




**Figura 9-5 Relación entre el PIB per cápita y el valor expuesto por alumno**

### 9.3.3 Tipologías estructurales

Para cada país, las tipologías estructurales representativas fueron seleccionadas de acuerdo a los datos disponibles en los censos nacionales, respecto a los materiales de construcción y características de los muros, pisos y cubiertas. Adicionalmente, se consideró la información sobre las técnicas de construcción y tipos de sistemas constructivos predominantes de acuerdo a los reportes del proyecto World Housing Encyclopedia. En la Figura 9-6 se presenta la composición del área construida según tipologías estructurales en cada país.



Argentina (ARG); Bolivia (BOL); Chile (CHL); Colombia (COL); Costa Rica (CRI); Ecuador (ECU); Guatemala (GTM); Honduras (HND); México (MEX); Nicaragua (NIC); Panamá (PAN); Perú (PER); Salvador (SLV); Venezuela (VEN)

**Figura 9-6 Composición del área construida según tipologías estructurales en cada país**

Los resultados del módulo de exposición se resumen en archivos compatibles para sistemas de información geográfica (formato “.shp”). Así, para cada país, estos archivos incluyen: i) identificación de los centros educativos, ii) su ubicación, iii) el área construida, iv) el valor económico, v) el número de alumnos y vi) las tipologías estructurales representativas. En la Figura 9-7 se presenta un mapa de la distribución geográfica de los valores expuestos estimados para los centros educativos en el análisis. A su vez, en la Figura 9-8 se presenta el valor expuesto estimado para los centros educativos en cada país. En esta Figura se pueden identificar los siguientes grupos de países según los valores expuestos:

- Entre 100 y 1000 millones de USD: Nicaragua, Honduras, El Salvador, Guatemala y Bolivia
- Entre 1000 y 10000 millones de USD: Panamá, Ecuador, Costa Rica, Chile y Perú
- Entre 10000 y 100000 millones de USD: Colombia, Venezuela, Argentina y México

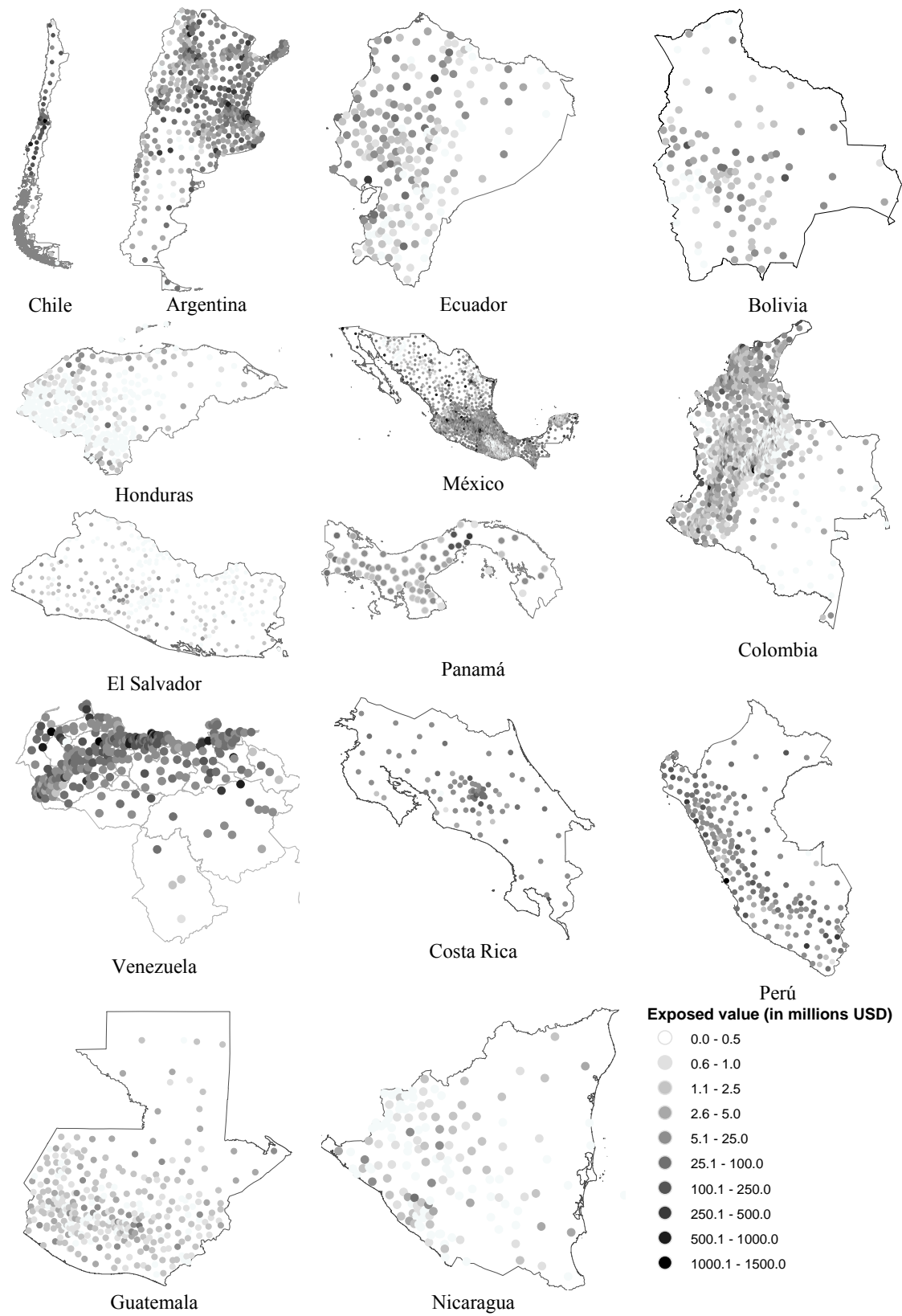
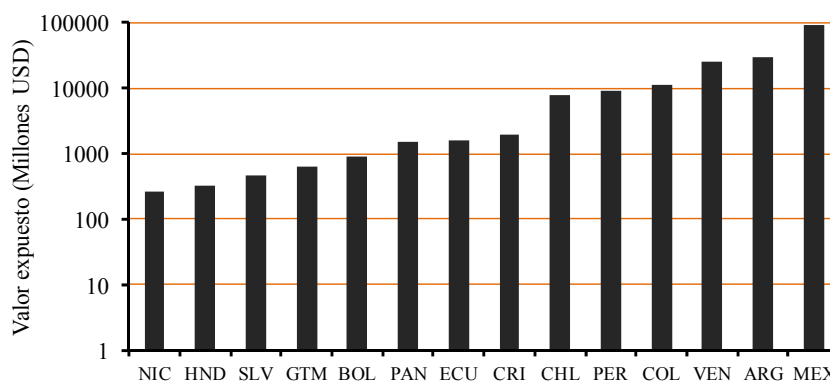


Figura 9-7 Distribución geográfica de los valores expuestos en centros educativos



Argentina (ARG); Bolivia (BOL); Chile (CHL); Colombia (COL); Costa Rica (CRI); Ecuador (ECU); Guatemala (GTM); Honduras (HND); Mexico (MEX); Nicaragua (NIC); Panama (PAN); Peru (PER); Salvador (SLV); Venezuela (VEN)

**Figura 9-8 Valor expuesto en los centros educativos según países**

## 9.4 Vulnerabilidad de las tipologías estructurales representativas de los centros educativos

### 9.4.1 Caracterización de las tipologías estructurales en el estado actual y en un estado reforzado

Entre los países incluidos en el análisis, pueden existir diferentes requerimientos sísmicos para cada tipología estructural, así como diferentes objetivos de seguridad para la infraestructura educativa. Dado el alcance del estudio, no es posible examinar en detalle edificios específicos, ni los métodos de reforzamiento estructural. De esta manera, se consideraron algunos supuestos para definir las curvas de pérdida del conjunto de instalaciones en el estado actual y en el estado reforzado.

Los edificios han sido caracterizados en tipologías estructurales con un nivel de diseño específico (pre código, bajo nivel de diseño, alto nivel de diseño). Las mismas tipologías estructurales fueron consideradas para todos los países incluidos en el análisis. De esta manera, la viabilidad de la reducción del riesgo sísmico de los centros educativos es evaluada suponiendo un conjunto estándar de estructuras, cuyas pérdidas son estimadas para todos los eventos posibles, de acuerdo con el modelo de amenaza sísmica desarrollado para cada país.

Para los edificios de adobe, los parámetros de las curvas de capacidad fueron adoptados de Yamín et al. (2004), Yamín et al. (2007) y Tarque et al., (2010). Para los edificios de mampostería no reforzada<sup>34</sup>, las curvas de capacidad fueron adoptadas de HAZUS MH 2003 (FEMA/NIBS 2003) considerando edificios sin diseño sismoresistente (pre código).

Además de la intervención estructural de las tipologías de adobe y de mampostería no reforzada, es interesante evaluar el costo y beneficios de su reemplazo por nuevos edificios. Para esta alternativa, se ha considerado el uso de edificios de mampostería reforzada para las nuevas instalaciones educativas. Esta alternativa es considerada no sólo como una mejora en la seguridad sísmica, sino como una oportunidad para actualizar la infraestructura escolar.

Los parámetros de los edificios de mampostería confinada fueron adoptados de García-Ruiz et al. (2010). Para edificios de mampostería reforzada con diafragmas de hormigón prefabricado, las curvas de capacidad fueron adoptadas de HAZUS MH 2003 (FEMA/NIBS 2003), considerando un nivel de diseño bajo/alto en el caso actual/reforzado, respectivamente. Este supuesto también ha sido considerado para los

<sup>34</sup> En el Anexo A se presentan descripciones de los sistemas estructurales de muros de mampostería no reforzada, muros de mampostería confinada y muros de mampostería reforzada. Detalles adicionales sobre estas y otras tipologías pueden consultarse en el proyecto World Housing Encyclopedia [En línea]. Disponible en: <http://www.world-housing.net/> [Última consulta 12/11/2012].

pórticos de hormigón armado con muros de relleno de mampostería no reforzada, para los pórticos de hormigón armado prefabricados con muros de cortante, así como para las estructuras de madera.

Las curvas de pérdida fueron generadas de acuerdo a los procedimientos descritos en el Capítulo 8 y empleando la información disponible. Las curvas de pérdida (valores esperados) de cada tipología se presentan en la Figura 9-9.

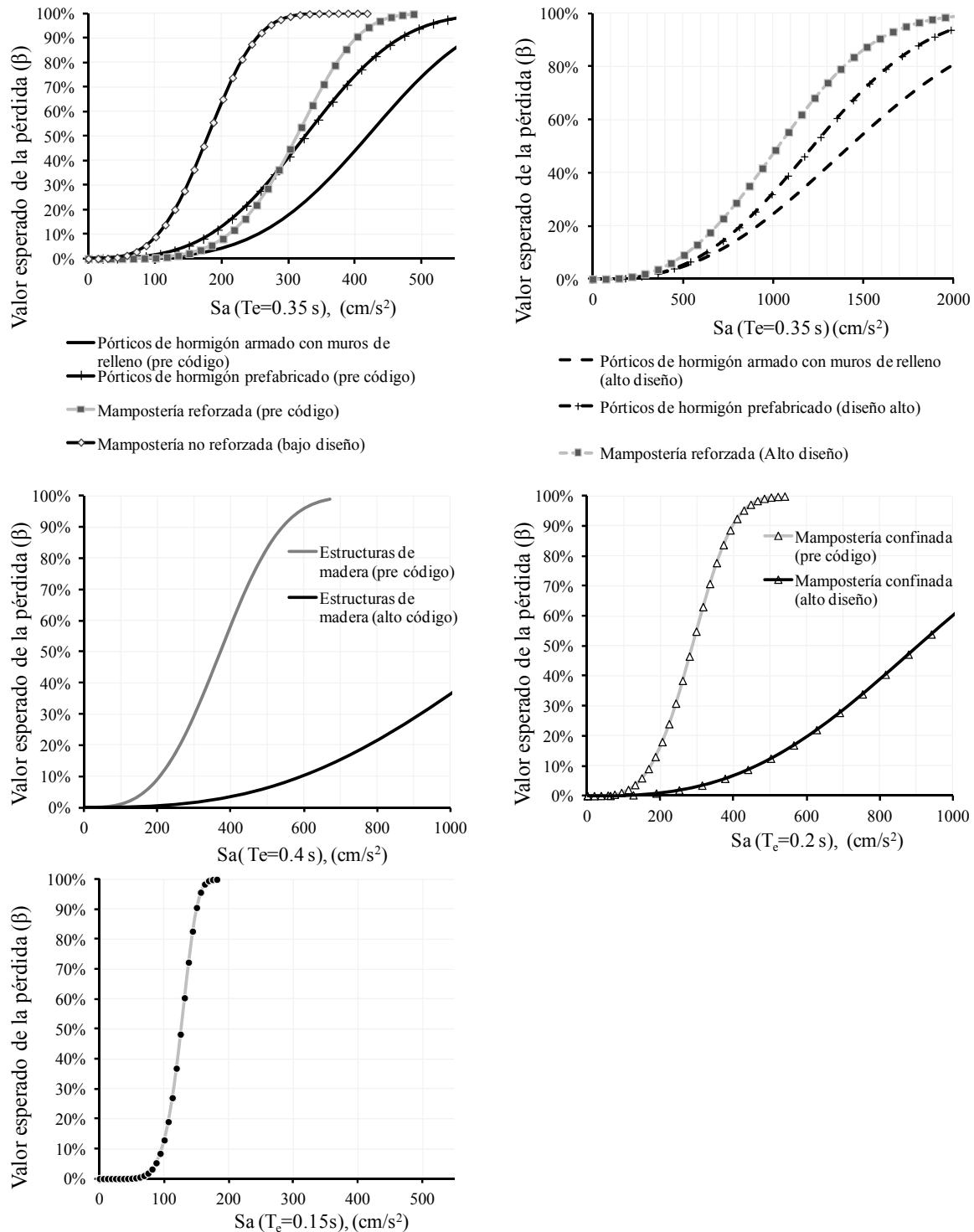


Figura 9-9 Curvas de pérdida (valores esperados) de las tipologías incluidas en el estudio

## 9.5 Valoración de los costos de reforzamiento estructural

Los costos de reforzamiento están relacionados con la intervención estructural adoptada para garantizar los niveles de seguridad pre definidos para la estructura. Por esta razón, dependen del sistema estructural y del nivel de diseño sismoresistente. Para este análisis, los costos de rehabilitación de los centros educativos se suponen como un porcentaje estándar de los costos de reposición de los edificios. Dichos costos fueron adoptados de los datos disponibles y del criterio experto de proyectos de reducción de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de instalaciones educativas.

En el documento FEMA 156 (1994) y FEMA 157 (1995) se sugieren costos típicos de la rehabilitación sísmica de edificios. Basado en la evaluación estadística de los datos de costos de aproximadamente 2000 proyectos de rehabilitación que fueron incluidos en el informe FEMA 156, una aplicación de internet, denominada *Seismic Rehabilitation Cost Estimator*, permite estimar los costos de rehabilitaciones usando información tanto básica como detallada del edificio. En el primer caso, los datos relevantes son el periodo de construcción, el sistema estructural, la zona de amenaza sísmica y el objetivo de comportamiento. Estos datos están expresados en dólares por área construida (en pies cuadrados) y sirvieron también de referencia para determinar los costos de la intervención en las instalaciones educativas.

Por otro lado, en Kappos y Dimitrakopoulos (2008), los costos directos de la rehabilitación de un conjunto heterogéneo de edificios fue adoptado como el 12% del valor de reemplazo de los edificios. Valores similares fueron identificados en el programa de reforzamiento de escuelas desarrollado entre 2007 y 2008 en Estambul. En este proyecto de Turquía, los costos de reforzar una instalación educativa variaron entre el 10 al 15% del costo de reposición del edificio (GFRRD, 2009).

En el caso de América Latina, se encontraron datos de los costos de reforzamiento de dos proyectos de reforzamiento de centros educativos, los cuales, fueron empleados para este análisis. Uno de estos es la actualización de la seguridad sísmica de colegios en Quito (ver GeoHazards International 1995). Los valores de las intervenciones estructurales, según tipología estructural se presentan en la Tabla 9-4.

**Tabla 9-4 Ejemplos de costos de reforzamiento de escuelas en Ecuador**

Institución	Tipología estructural	Periodo de construcción	Costos de reforzamiento USD /m <sup>2</sup> (1995)
Ana Paredes de Alfaro	Pórticos de hormigón armado	1956	25.93
Experimental Sucre	Pórticos de hormigón armado	1952-1959	18.51
José de Antepara	Adobe	1940	12.22
República de Argentina	Muros de mampostería no reforzada	1953	No disponible
República de Chile	Pórticos de hormigón armado	1945 / 1994	94.94
Río Amazonas	Pórticos de hormigón armado e	1978	24.38
11 de Marzo	Pórticos metálicos	Desconocido	20.26
Dirección Nacional de Construcciones Escolares, Módulo I	Pórticos de hormigón armado	Desconocido	63
Dirección Nacional de Construcciones Escolares, Módulo II	Pórticos metálicos	Desconocido	13

Fuente: GeoHazards International (1995)

El otro proyecto corresponde al programa de reducción de la vulnerabilidad sísmica de los colegios públicos de Bogotá. De acuerdo con Coca (2006), la inversión total en la rehabilitación estructural y mejoramiento de las instalaciones fue alrededor de USD 162.7 millones de dólares. El área total de los edificios con intervenciones estructurales (reforzamiento, reemplazo) fue cerca de 680000 m<sup>2</sup>, incluyendo 172 reforzamientos de colegios, 326 mejoramientos no estructurales y 54 colegios ampliados. A partir de estos datos, se encuentra que los costos de la intervención estructural son alrededor de 240 USD por m<sup>2</sup>. Ejemplos de las escuelas incluidas en este proyecto en Colombia se presentan en la Tabla 9-5.

**Tabla 9–5 Ejemplos de costos de la intervención estructural de algunos colegios en Bogotá.**

Instalación	Número de edificios	Tipología estructural	Periodo de construcción	Costos del reforzamiento USD /m <sup>2</sup> (2006)
Rodrigo Lara Bonilla	7	Pórticos de hormigón armado	1960-1984; 1984-1997	293.1
Luis López Mesa	5	Muros de mampostería no reforzada – Pórticos de hormigón armado	1960-1984 1984-1997	275.6
Alfonso López	4	Porticos de hormigón armado	1990	272.8
Marruecos y Molinos	8	Porticos de hormigón armado, Muros de mampostería no reforzada, estructuras de madera	1984-1997; 1998	400.0

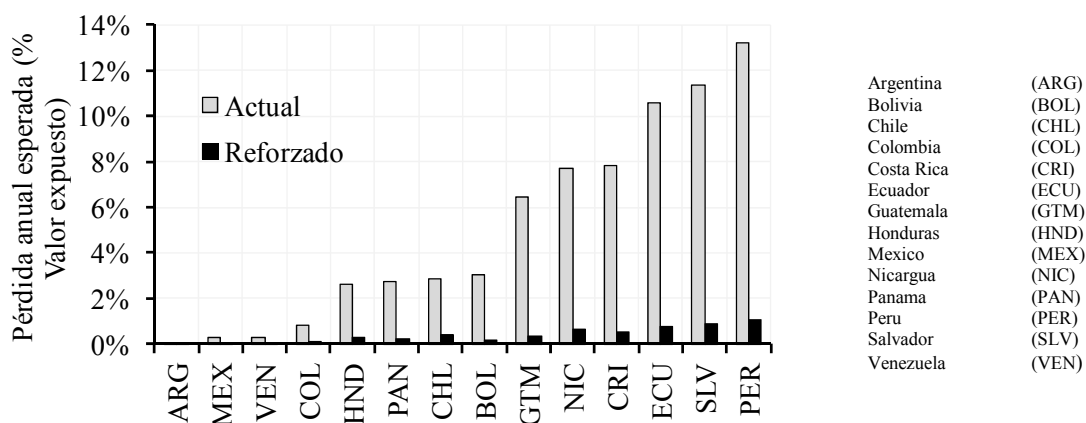
Fuentes: Secretaría de Educación del Distrito Capital (2006); Proyectos y Diseños –(P&D 2000)

A partir de la información disponible y de las experiencias mencionadas, los costos de reforzamiento/reemplazo fueron supuestos como sigue: i) Los edificios de adobe y de mampostería no reforzada se reemplazan por edificios nuevos de mampostería reforzada; (ii) para las tipologías estructurales restantes, los costos de reforzamiento fueron considerados como el 15% de los costos de reposición.

## 9.6 Resultados de la evaluación de riesgo y del análisis de beneficio-costo a nivel nacional

### 9.6.1 Pérdida Anual Esperada

La Tabla 9–6 presenta un resumen de los valores expuestos y de los resultados del análisis de beneficio-costo a nivel nacional. En la Figura 9-10 se pueden clasificar tres categorías de países de acuerdo a las estimaciones de la PAE en el estado actual. Los valores más bajos de la PAE (menores que el 1%) se encontraron en Argentina, Venezuela, Colombia y México. En general, estos resultados reflejan una concentración menor de edificios en zonas de peligrosidad sísmica relativamente baja (como en el caso de Argentina) así como la composición del área construida en tipologías estructurales de vulnerabilidad relativamente baja, como edificios de hormigón armado y de mampostería reforzada.



**Figura 9-10 Pérdida anual esperada del área construida del sector educativo según país**

Los valores más altos de la PAE (mayores que el 6% del valor expuesto) corresponden a Perú, El Salvador, Ecuador, Costa Rica, Nicaragua y Guatemala. Estos resultados reflejan la composición del conjunto de escuelas en tipologías estructurales de relativa alta vulnerabilidad como mampostería no reforzada y adobe, ubicadas en zonas de amenaza sísmica relativamente alta. La PAE estimada para estos países es considerable, con valores entre el 5% y 13%.

Tabla 9–6 Resumen de resultados del análisis de beneficio-costo por países

País	Número de estudiantes	Área construida (m <sup>2</sup> x 10 <sup>3</sup> )	Valor expuesto (millones USD)	Pérdida Anual Esperada (PAE)				Valor presente esperado de la pérdida E(L)		Costos de reforzamiento			Relación de beneficio-costo (BC)
				Actual		Reforzado		Actual	Reforzado	Millones USD	% PIB	% Valor expuesto	
				Millones USD	(%)	Millones USD	(%)						
VEN	5,932,654	28,131	25,519	73.78	2.9	7.10	0.3	2,489	239	6580	2	26	0.34
CHL	1,929,800	9,999	7,716	219.08	28.4	29.37	3.8	7,390	984	2820	2	37	2.27
MEX	26,225,836	122,785	89,116	248.63	2.8	45.77	0.5	8,389	1,535	40096	4	45	0.17
ARG	8,038,308	42,768	29,793	21.34	0.7	4.24	0.1	718	140	7647	2	26	0.08
PAN	682,940	2,170	1,483	40.43	27.3	3.55	2.4	1,364	120	670	3	45	1.86
CRI	1,153,291	3,159	1,952	152.33	78.1	10.15	5.2	5,143	343	952	3	49	5.04
COL	9,170,199	20,710	11,327	94.99	8.4	15.23	1.3	3,203	510	6036	2	53	0.45
PER	6,483,956	18,194	8,881	1,170.99	131.8	95.33	10.7	39,503	3,212	2587	2	29	14.03
ECU	2,817,108	4,146	1,572	166.36	105.8	12.25	7.8	5,613	413	662	1	42	7.85
SLV	1,803,495	1,535	475	53.82	113.3	4.10	8.6	1,816	138	356	2	75	4.71
GTM	2,760,358	2,204	640	41.31	64.5	2.24	3.5	1,394	75	286	1	45	4.60
BOL	2,286,652	4,953	929	28.35	30.5	1.49	1.6	957	50	353	2	38	2.57
HND	2,022,766	1,993	332	8.65	26.1	0.93	2.8	292	31	237	2	71	1.10
NIC	1,743,900	1,909	263	20.19	76.8	1.68	6.4	682	57	156	2	59	4.01

Para Bolivia, Chile, Panamá y Honduras, las estimaciones de la PAE son alrededor del 2% del valor expuesto. Estos resultados también están relacionados con el modelo de peligrosidad sísmica de cada país y las tipologías estructurales consideradas relevantes. En el caso de Chile, la amenaza sísmica es relativamente alta mientras que el conjunto de instalaciones educativas está compuesto por tipologías estructurales de vulnerabilidad relativamente baja como pórticos de hormigón armado y mampostería reforzada. En el caso de Honduras y Panamá, la concentración de las instalaciones en zonas de alta amenaza es moderada.

### 9.6.2 Relación de beneficio-costos

En la relación de beneficio-costos presentada en el apartado 8.7 (ver Ecuación 8-33), la intervención estructural es viable desde el punto de vista financiero (la relación beneficio-costos  $BC$  es mayor a 1) cuando la reducción de las pérdidas  $\Delta PAE$  (la diferencia en el valor presente de la  $PAE$  en los estados actual y reforzado) es superior a los costos de reforzamiento  $R$ , multiplicados por la tasa de interés  $\tau$ . Si estos términos son normalizados por el valor expuesto  $VE$ , la frontera de viabilidad del reforzamiento sísmico puede expresarse a través de la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta PAE}{VE} = \frac{\tau R}{VE} \quad [9-1]$$

Los resultados del análisis de beneficio-costos se presentan en la Figura 9-11. En la abscisa se presentan los costos de reforzamiento, multiplicados por la tasa de interés y normalizados por el valor expuesto. En las ordenadas, se presenta la diferencia del valor presente de la PAE en los estados actual y reforzado de las instalaciones educativas, también normalizadas por el valor expuesto.

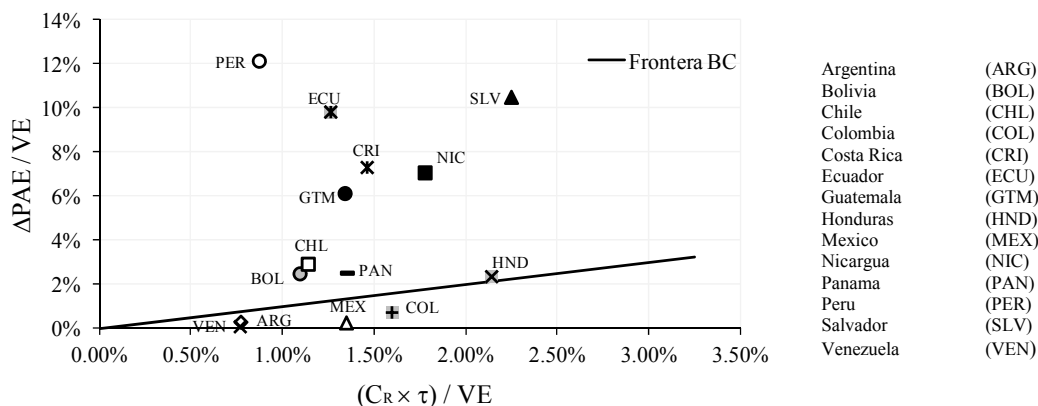


Figura 9-11 Resultados del análisis de beneficio-costos

En la Figura 9-11 es posible observar que la diferencia entre el valor presente de la PAE en los casos actual y reforzado no es significativa frente a los costos de reforzamiento en los casos de Venezuela, Argentina, Colombia y México. Así, estos países están debajo de la frontera de viabilidad de beneficio-costos. Por esta razón, desde un enfoque financiero y a nivel nacional, la reducción de la vulnerabilidad estructural del total del área construida de las instalaciones educativas (públicas) en estos países no es atractiva. Este resultado también está relacionado con las tipologías estructurales empleadas en el módulo de exposición. De la Figura 9-6 es posible observar que en estos países se encuentra un mayor porcentaje de edificios de hormigón armado y de mampostería reforzada. Para estas estructuras, la reducción en su vulnerabilidad, debido a la intervención estructural es menor al compararse con la reducción en la vulnerabilidad de las tipologías restantes (ver Figura 9-9).



En los demás países, hay mejores opciones para desarrollar proyectos de reducción de la vulnerabilidad sísmica de centros educativos desde una perspectiva financiera, considerando la diferencia en el valor presente de la PAE y los costos estimados de reforzamiento.

### 9.6.3 Contexto de los resultados de la evaluación del riesgo sísmico de los centros educativos

Qué significado pueden tener las estimaciones de riesgo, de acuerdo a los logros en educación y a la capacidad del sector educativo para reducir y financiar las pérdidas esperadas? Para atender a esta inquietud y para una mejor comprensión del estudio, los países fueron clasificados en grupos definidos por rangos de la PAE en el portafolio actual y del EDI. En un procedimiento similar, los países fueron clasificados basados en los resultados de la PAE y la inversión en educación como porcentaje del PIB.

La intención de este análisis es identificar los países que pueden no tener recursos suficientes para financiar los proyectos de mitigación y las actividades de recuperación post desastre. También este análisis es considerado como un primer criterio para identificar los países en los cuales, las pérdidas potenciales de la infraestructura educativa ante eventos sísmicos, representan altos costos de oportunidad y pueden afectar el desarrollo de metas educativas.

A través de la comparación entre las estimaciones de la PAE y del EDI, el riesgo sísmico de los centros educativos tiene diferentes significados. Es posible identificar cuatro grupos: I) países con altos valores de la PAE y notables avances en educación; II) países con notables avances en educación y bajos valores de la PAE; III) países con bajo progreso en educación y bajos valores de la PAE; IV) países con poco progreso en educación y altos valores de la PAE. En la Figura 9-12 se clasifican los países de acuerdo a la PAE y al índice EDI.

Un procedimiento similar también se llevó a cabo para representar la capacidad para financiar las actividades de reducción de riesgo, así como los planes de recuperación. Al nivel nacional, la inversión en educación como porcentaje del PIB es considerada como una referencia de la disponibilidad de recursos del sector educativo, bajo el supuesto que parte de los fondos de recuperación serán obtenidos de la redistribución del presupuesto.

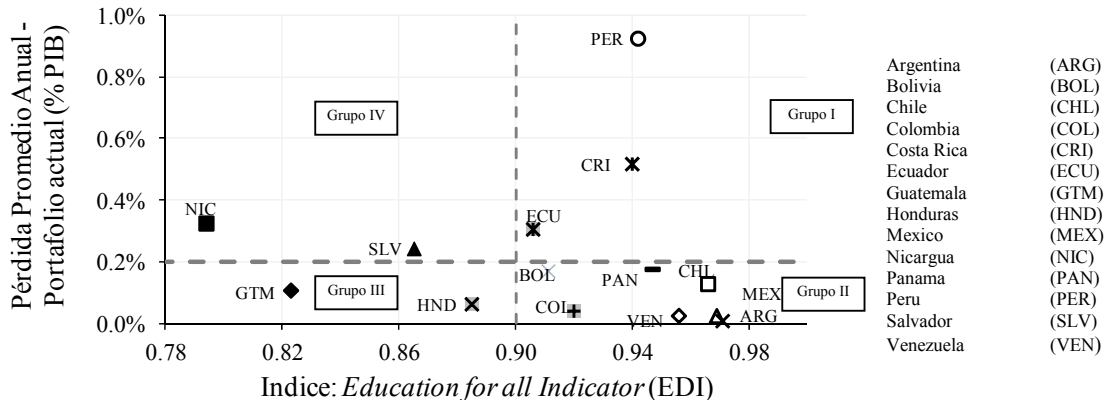
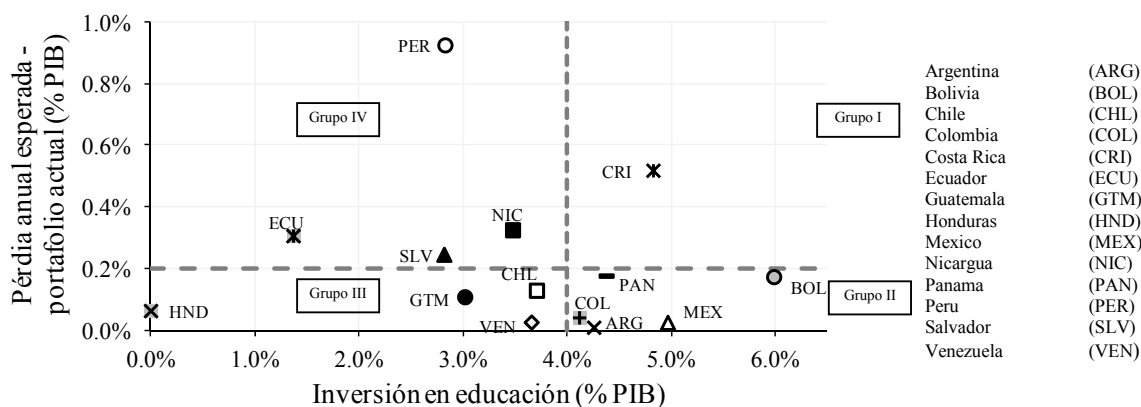


Figura 9-12 Pérdida Anual Esperada vs Índice de desarrollo en la educación

A través de esta comparación es posible identificar las siguientes categorías: I) países con altos valores de la PAE y altos niveles de inversión en educación; II) países con altos niveles de inversión en educación y bajos valores de la PAE; III) países con bajos niveles de inversión en educación y bajos valores de la PAE; IV) países con bajos niveles de inversión en educación y altos valores de la PAE. En la Figura 9-13 se clasifican los países de acuerdo a los grupos mencionados. En la Tabla 9-7 se resumen los dos criterios de clasificación propuestos.



**Figura 9-13 Pérdida Anual Esperada vs inversión en educación (%PIB)**

En cuanto a la capacidad para desarrollar programas de reducción de riesgo, la Tabla 9–6 presenta los costos de reforzamiento como porcentaje del PIB. Estos valores varían entre el 1% y el 4%, siendo cercanos al valor total de la inversión anual en educación. Por esta razón, se considera que los programas de reforzamiento sísmico de los edificios pueden significar esfuerzos políticos y económicos significativos.

**Tabla 9–7 Clasificación de países de acuerdo a la PAE , al índice de desarrollo en educación y a la inversión en educación (%PIB)**

Grupo	PAE vs EDI	PAE vs Inversión en educación(%PIB)
I	Perú, Costa Rica, Ecuador	Costa Rica
II	México, Argentina, Chile, Panamá, Venezuela, Colombia y Bolivia	Bolivia, Panamá, México, Argentina, Colombia
III	Honduras y Guatemala	Chile, Venezuela, Guatemala y Honduras
IV	Nicaragua, El Salvador	Perú, El Salvador, Nicaragua y Ecuador

De la clasificación de países presentada en la Tabla 9–7, se puede concluir que los países incluidos en los casos I y IV deben considerar como una tarea prioritaria el desarrollo de planes de inversión en la reducción del riesgo sísmico que favorecen a su vez el desarrollo de las metas educativas.

Se desea resaltar que estos resultados representan una estimación preliminar del riesgo sísmico a nivel nacional. El modelo usado para el análisis se basa en información general sobre el número de estudiantes, precios promedio de área construida, costos estándar de reforzamiento, tipologías estructurales y curvas de pérdida. Por esta razón, estos resultados no deben ser considerados para definir actividades específicas en programas de reducción del riesgo sísmico. Dado el alcance del estudio, el detalle de la información empleada y las limitaciones del modelo, la viabilidad de la rehabilitación de colegios, como los desarrollados en Bogotá o Quito, no pueden ser discutidos desde este análisis. Sin embargo, los resultados de este análisis son esclarecedores y permiten detectar países donde priorizar este tipo de estudios a partir de información de mayor detalle.

Este análisis se centra en la estimación de pérdidas económicas. Sin embargo, un estudio completo de beneficio-costos debe incluir otras variables de decisión, como por ejemplo, aquellas relacionadas con el posible número de estudiantes heridos, afectados, fallecidos. No obstante, estas consecuencias / pérdidas no pueden medirse en las mismas unidades con las pérdidas económicas (Hansson 2007). Por esta razón, los programas de reducción de riesgos deben fundamentarse considerando también aspectos sociales y políticos (Aven y Kristensen 2005). En este sentido, se sugiere el uso de indicadores de riesgo, siguiendo un enfoque holístico (Barbat et al. 2010; Barbat et al. 2011 y Carreño et al. 2012).

## 9.7 Resultados a nivel nacional: Colombia

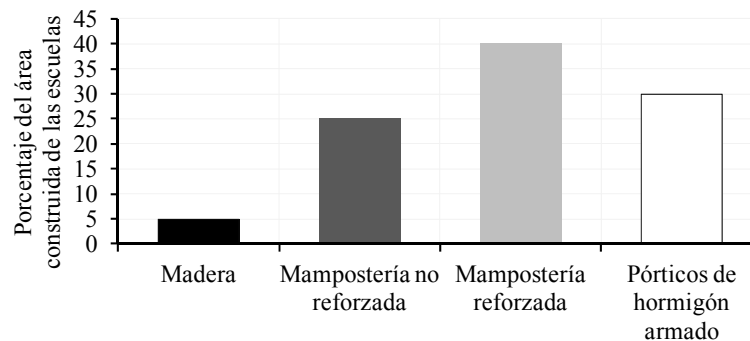
En Colombia, el comportamiento de los centros educativos durante terremotos ha resaltado la vulnerabilidad de estas instalaciones, así como la importancia del desarrollo de programas de reducción de riesgos. De acuerdo con el estudio de la CEPAL (1999), en el terremoto de Armenia del 25 de enero de 1999, de 521 instalaciones, 143 (27%) fueron completamente dañadas; 294 (56%) quedaron reparables y 84 (16%) sufrieron daños menores. Los daños afectaron cerca de 4000 aulas, 15000 profesores y más de 143000 alumnos. El valor económico de la pérdida en los centros educativos fue alrededor del 1.3% del producto bruto departamental de las zonas afectadas por el evento, que fueron principalmente Caldas, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca.

En el análisis a escala nacional del beneficio-costos de la reducción del riesgo en los centros educativos, se encontró que en Colombia, la intervención estructural del área pública de estas instalaciones no es factible desde el punto de vista financiero. De esta manera, un programa en el cual todas las instalaciones públicas sean sometidas a un programa de reforzamiento no parece viable. Con el fin de identificar las zonas en las cuales resulta atractivo efectuar intervenciones estructurales, se desarrolló un estudio de beneficio-costos a nivel subnacional.

Se consideró un total de 1114 municipios. Para cada uno, el número de estudiantes se obtuvo de los datos disponibles en el Departamento Nacional de Estadística (DANE 2008). La Tabla 9-8 presenta el número de estudiantes, el área construida estimada de los centros educativos y su valor económico. La composición del área construida en tipologías estructurales se presenta en la Figura 9-14. La distribución geográfica de los valores expuestos se presenta en la Figura 9-15. En la Figura 9-16 se presenta un mapa de los escenarios sísmicos generados en el análisis según rangos de magnitud Mw.

**Tabla 9-8 Valores expuestos**

Número de estudiantes	9170199
Área estimada de los centros educativos (miles de m <sup>2</sup> )	20710
Valor expuesto (Millones USD)	11327



**Figura 9-14 Composición del área de centros educativos en tipologías estructurales**

Valor expuesto (millones USD)

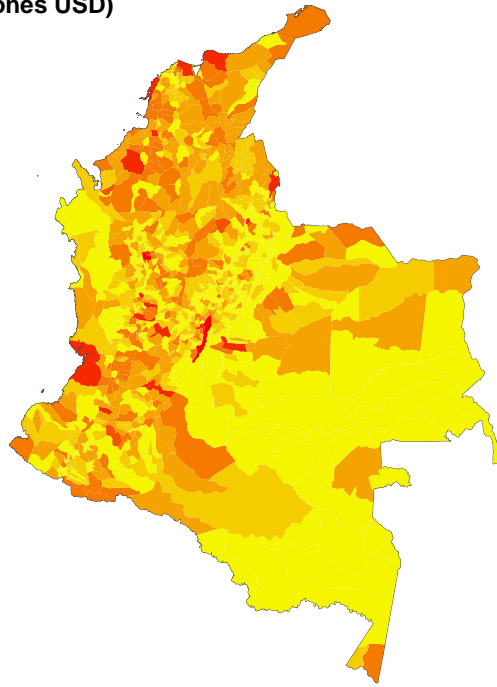
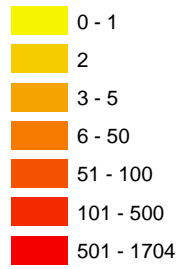


Figura 9-15 Mapa del valor expuesto según municipios

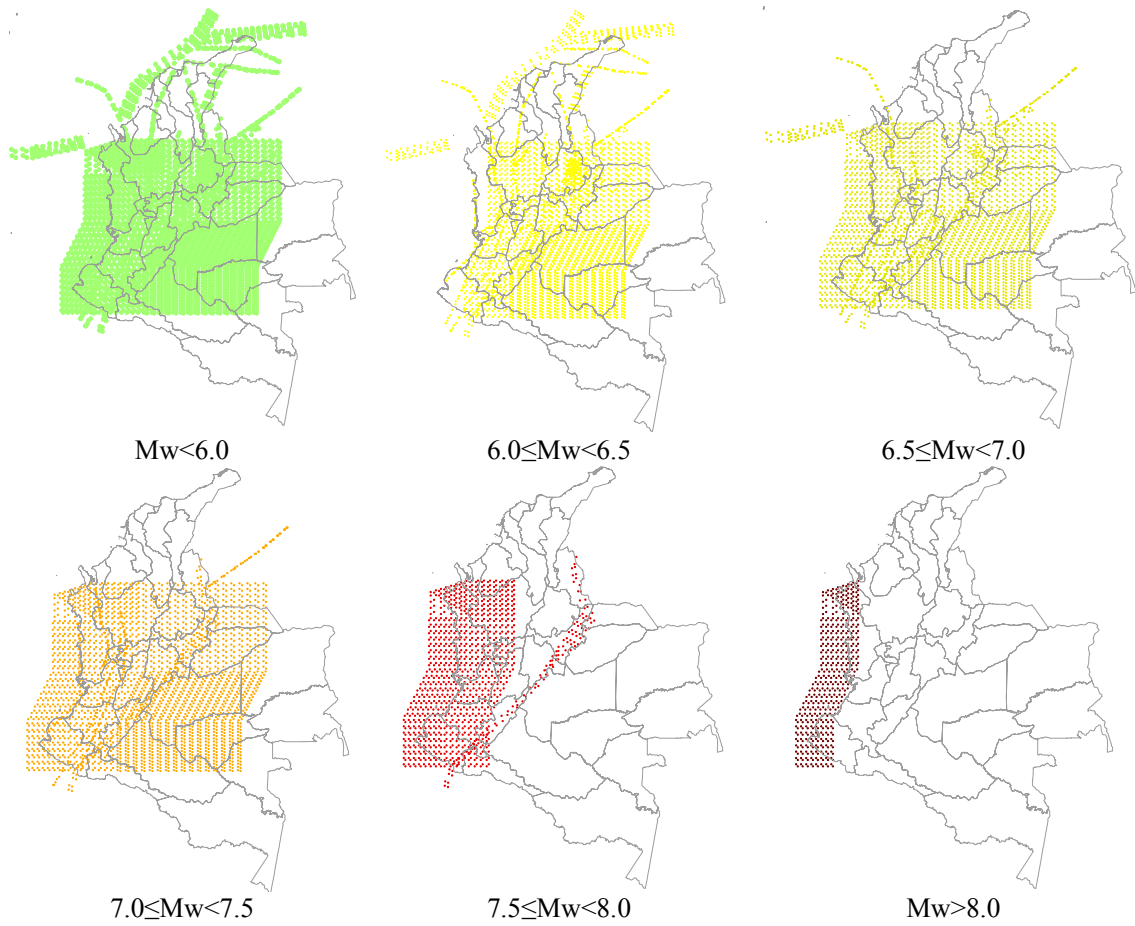


Figura 9-16 Mapa de los eventos sísmicos generados para el análisis según magnitudes

Usando los módulos de exposición, amenaza, vulnerabilidad y riesgo, se estimó la PAE en el estado actual y en el estado reforzado de las instalaciones educativas. Estos resultados se resumen en Figura 9-17. La Figura 9-18 presenta los resultados de la PAE, para el estado actual, según municipios.

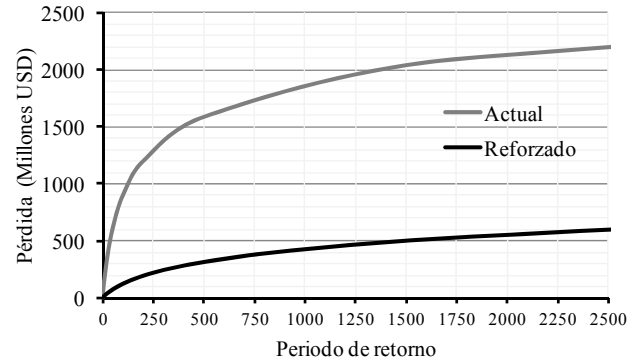


Figura 9-17 Curva de Excedencia de Pérdidas para el estado actual y el reforzado

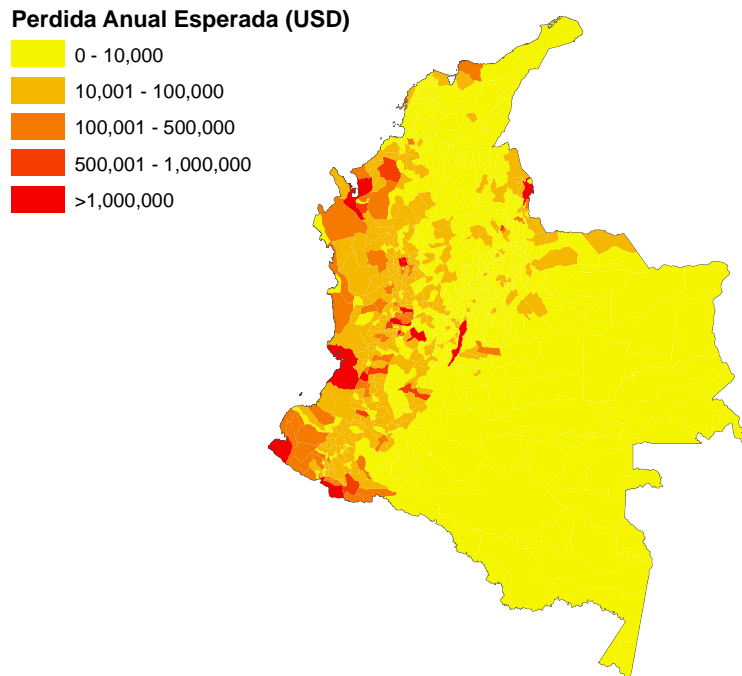


Figura 9-18 Mapa de la pérdida Anual Esperada por municipio. Estado actual

Para el análisis, los resultados a nivel municipal de las pérdidas en el estado actual y reforzado, así como la estimación de los costos del reforzamiento de los centros educativos, se consolidaron a nivel departamental. A partir de estos datos, se estimaron las relaciones de beneficio-costos para cada Departamento. En la Figura 9-19 (a) se presenta la razón de beneficio-costos estimada según Departamento; en la Figura 9-19(b) la diferencia del valor presente (esperado) de la PAE en el caso actual y en el reforzado, ( $E[LU]-E[LR]$ ); en la Figura 9-19(c) se muestran los costos de reforzamiento. En la Figura 9-20 (a) se presenta la frontera de beneficio-costos; en la Figura 9-20 (b) un mapa de los departamentos según la razón de beneficio-costos.

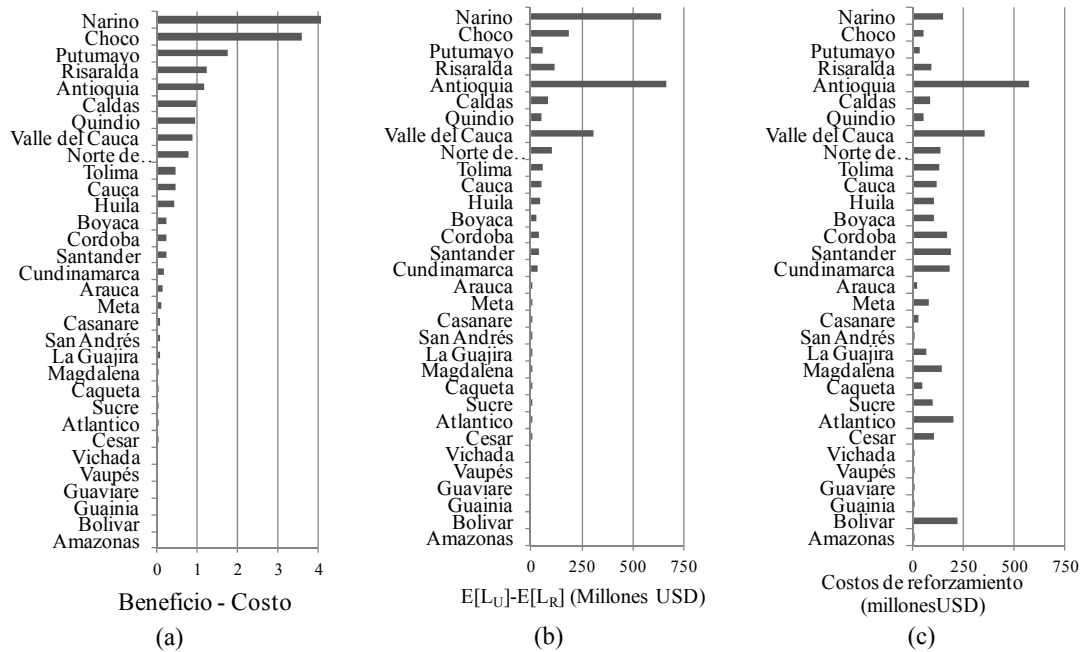


Figura 9-19 (a) razón de beneficio-costo por departamento; (b) Diferencia del valor presente (esperado) de la PAE en el caso actual y en el reforzado; ( $E[LU]-E[LR]$ ); (c) costos de reforzamiento

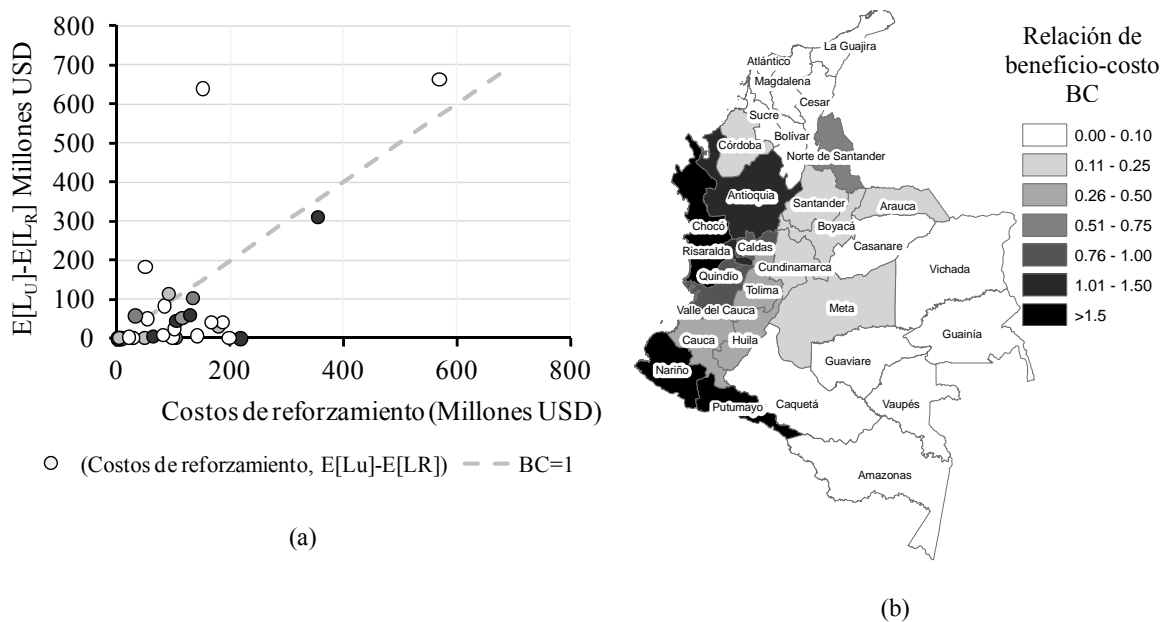


Figura 9-20 (a) Comparación entre los costos de reforzamiento y los beneficios del reforzamiento estructural de los centros educativos ( $E[LU]-E[LR]$ ); (b) Relación de beneficio-costo por Departamento

A nivel nacional, los costos de reforzamiento son alrededor de 3562 millones de USD. Estos costos pueden representar cerca del 30% de la inversión pública anual en el año 2010, lo cual es un esfuerzo significativo. Sin un criterio de priorización, la inversión requerida a nivel nacional no sería posible. Usando el criterio de beneficio-costo a nivel subnacional, es posible definir un umbral para promover las intervenciones estructurales en los centros educativos. Por ejemplo, suponiendo una política conservadora, si todos los Departamentos con una razón de beneficio-costo mayor a 0.75 deben desarrollar un reforzamiento de las instalaciones educativas, entonces, los costos esperados serían

alrededor de 1529 millones de USD, los cuales representan el 43% de los costos de un reforzamiento completo a nivel nacional. De esta manera, los resultados de este análisis son útiles para asignar prioridades en los programas de reducción de la vulnerabilidad.

## **9.8 Resumen y discusión**

En este capítulo se han presentado dos ejemplos de casos de estudio del análisis de beneficio-costos de una hipotética intervención estructural en centros educativos de países de Latinoamérica, a nivel nacional, y de Colombia, a nivel subnacional. El valor esperado de la pérdida y su desviación estándar se estiman considerando todos los eventos sísmicos posibles, de acuerdo a los modelos probabilistas de la amenaza sísmica. Para la evaluación de las pérdidas se adoptan funciones de pérdida que expresan tanto el valor esperado del daño, como su desviación estándar para una determinada intensidad de la peligrosidad sísmica.

En el modelo desarrollado, es posible observar que en zonas en las cuales el área construida escolar está compuesta por una considerable proporción de tipologías estructurales de alta vulnerabilidad, los valores de las pérdidas esperadas son importantes. Por otro lado, si el reforzamiento sísmico de los edificios representa una leve reducción de las pérdidas esperadas, la cual no es significativa frente a los costos de reforzamiento, la rehabilitación no es considerada provechosa desde una perspectiva financiera.

Dado el alcance, la información limitada empleada, así como los supuestos empleados para seleccionar los valores de los costos de reforzamiento y las tasas de descuento, este estudio debe ser considerado como preliminar y útil sólo para comparaciones regionales y como herramienta de priorización. Estos resultados son útiles para la elaboración de políticas en organizaciones internacionales interesadas en establecer prioridades entre diferentes países en un contexto supranacional, respecto a la distribución de fondos y financiación de programas enfocados en el reforzamiento de la infraestructura educativa. Sin embargo, las metodologías pueden ser aplicadas para desarrollar análisis más detallados, considerando los efectos de sitio, así como información más refinada sobre la sismicidad de la zona de interés y datos relevantes para la modelización de la vulnerabilidad el inventario de edificios.

Así, como se ha indicado más arriba, además del análisis nacional, se presenta el caso de estudio de Colombia como ejemplo de la aplicación de la metodología a nivel subnacional. De los resultados obtenidos se concluye que las relaciones de beneficio-costos son consistentes con la peligrosidad sísmica, la distribución de los elementos expuestos y las estimaciones de pérdidas. En este caso, el análisis de beneficio-costos señala las regiones en las cuales la intervención estructural es más atractiva desde un punto de vista financiero y de acuerdo al riesgo sísmico. De esta manera, esta metodología es útil para priorizar las inversiones en la reducción de las pérdidas esperadas dentro del marco de, por ejemplo, un programa nacional.

Dados los efectos de los terremotos en los centros educativos, se ha reconocido que las comunidades deben promover la reducción del riesgo sísmico en estas instalaciones, para preservar la vida de los alumnos y para garantizar la seguridad de las inversiones en educación. El primer objetivo es un compromiso moral, universalmente aceptado. El otro objetivo está restringido por el contexto de la comunidad que enfrenta el riesgo, en cuanto a su habilidad para prevenir el potencial de crisis y para recuperarse en situaciones de desastre.

Así, la evaluación de la viabilidad de la reducción del riesgo sísmico de los centros educativos debe complementarse considerando la seguridad de la vida de los estudiantes, la capacidad financiera de las comunidades, así como el progreso y avance en las metas educativas. En este sentido, los resultados de las evaluaciones de riesgo han sido comparados con indicadores del desempeño del sector educativo, así como también con indicadores de la inversión pública en educación. La intención de este análisis ha sido identificar los países de Latinoamérica que pueden tener recursos limitados para financiar proyectos de mitigación de riesgos, así como las actividades de recuperación post desastre. Además, este análisis puede considerarse como un primer criterio para identificar los países en los cuales, las pérdidas potenciales de la infraestructura escolar, representan altos costos de oportunidad y pueden afectar el cumplimiento de los

objetivos y metas educativas. Similares conclusiones pueden sacarse del estudio del caso de Colombia, en referencia a los Departamentos administrativos y a las regiones en las cuales pueden priorizarse este tipo de inversiones.



## **10 Evaluación de la respuesta sísmica de la red de hospitales públicos de Cataluña y de los impactos sobre la atención sanitaria**

### **10.1 Introducción**

En la evaluación y gestión de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales, es necesario considerar, además de los costos económicos de su pérdida, los efectos de la interrupción de sus servicios durante la emergencia y los impactos en la producción de servicios de atención a la comunidad. Para evaluar los costos económicos directos, en el Capítulo 4 se han presentado metodologías para estimar un índice de pérdida para un evento específico, empleando matrices de probabilidad de daño y rangos de la pérdida económica esperada para cada estado de daño, expresados en porcentaje respecto al valor del edificio. Como complemento, se han presentado también índices de funcionalidad y del tiempo esperado de recuperación como función del grado de daño. Para el análisis de riesgos, en el Capítulo 8 se han presentado metodologías para estimar las pérdidas directas en un determinado evento, así como la tasa de excedencia de un cierto valor de pérdidas, considerando un conjunto de eventos a los que se encuentran potencialmente expuestos los edificios. En este caso se emplean, para cada edificio, funciones que relacionan la pérdida esperada y su desviación estándar, con la aceleración espectral a la cual se encuentran expuestos.

Respecto a los efectos de la interrupción de los servicios durante emergencias, Nuti y Vanzi (1996), Fawcett y Oliveira (2000), Safina (2003) y Pujades et al. (2007) han desarrollado metodologías para evaluar la capacidad residual de respuesta de sistemas hospitalarios post terremoto, simulando, para escenarios escogidos, el número de heridos que llegan a cada instalación y evaluando la atención de los pacientes teniendo en cuenta los recursos disponibles y el daño esperado en las instalaciones.

En el caso de los servicios de salud, no son frecuentes trabajos que relacionen los daños esperados en la infraestructura sanitaria con los impactos en la atención a la salud luego del desastre. Existen estudios similares que relacionan el daño en la infraestructura con impactos potenciales en la producción nacional (Albala-Bertrand, 1993), así como en sectores industriales y comerciales (Rose et al. 1997; Rose 2004; Rose y Liao 2005).

El objetivo de este Capítulo, es adoptar una metodología para evaluar la respuesta sísmica de una red de hospitales. Este análisis se lleva a cabo para terremotos específicos, cuyos resultados son útiles para la planificación de emergencias médicas en caso de sismos. A su vez, este análisis se repite para un conjunto de eventos sísmicos a los que potencialmente se encuentran expuestos los hospitales, con el fin de evaluar las probabilidades anuales de excedencia para diferentes valores de la respuesta de la red de hospitales.

Por otro lado, se presenta una metodología para evaluar los efectos de los daños en los hospitales sobre la atención a la salud. Para este fin, se propone un modelo en el cual la producción de salud se asocia con el número de camas, con el personal sanitario y con la disponibilidad de tecnología y equipos avanzados de diagnóstico de pacientes. En este modelo se adopta como medida de la salud la tasa anual estandarizada de mortalidad. De esta manera, este modelo es útil para estimar la reducción esperada en la producción de salud, a partir de los daños estimados en los hospitales ante un determinado evento sísmico.

Estas metodologías se aplican a la red de hospitales públicos de Cataluña. En conjunto, estos resultados permiten identificar beneficios de la seguridad de las instalaciones de salud, relacionados con la necesidad de su funcionamiento en condiciones de desastre, así como los costos de oportunidad asociados a su pérdida.

## **10.2 Metodología para la evaluación de la respuesta sísmica de una red de hospitales**

Durante una crisis sísmica, los heridos potenciales deben ser atendidos por el sistema de hospitales. Para este fin, es útil desarrollar simulaciones en las cuales se evalúe la capacidad de respuesta del sistema comparando la demanda de servicios hospitalarios con la oferta de estas instalaciones. En general, la metodología consiste en lo siguiente:

- i) Estimar los heridos en la región de análisis
- ii) Estimar los daños en los hospitales y la degradación de su funcionalidad (pérdida de camas disponibles)
- iii) Estimar el número de heridos que llegan a cada hospital en diferentes intervalos de tiempo
- iv) Estimar cuántos pacientes atiende cada hospital en cada intervalo
- v) Estimar el número de pacientes en cola, el número de pacientes atendidos y los no atendidos oportunamente en cada intervalo y en cada hospital.

Para evaluar la respuesta sísmica de una red de hospitales, Nuti y Vanzi (1998) proponen como variable de decisión la distancia recorrida por los pacientes, así como el número de camas perdidas. Safina (2003) propone un Factor de Respuesta que representa el número acumulado de pacientes en el tiempo; en el caso de cada hospital, sugiere un factor relacionado con el número de pacientes ingresados y el número de camas disponibles. Bruneau y Reinhorn (2007) y Cimelaro et al. (2010) evalúan la resiliencia en términos de la recuperación de la funcionalidad.

En el modelo que se presenta en este Capítulo, la respuesta sísmica, tanto de la red como de los hospitales, se evalúa en términos del porcentaje de heridos no tratados oportunamente, respecto al total de heridos que ingresan en las instalaciones durante el periodo de gestión de la emergencia. Los heridos no tratados oportunamente se definen como aquellos que ingresan en las instalaciones de salud y que no reciben tratamiento en un tiempo determinado, llamado de supervivencia o límite de tratamiento. Dicho periodo varía según la severidad de los heridos (leves, moderados y graves). De acuerdo con Paul et al. (2006), el tiempo de supervivencia corresponde al máximo tiempo que un paciente puede esperar antes de ser atendido en una sala de operaciones (para pacientes moderados y graves) o para ser atendidos en salas de emergencia (para pacientes leves).

A continuación se describen los procedimientos para la distribución de heridos en los hospitales y en diferentes intervalos de tiempo, así como del número de pacientes en espera y del número de pacientes no atendidos oportunamente. En la Figura 10-1 se resume la metodología propuesta.

### *10.2.1 Evaluación de heridos y reparto entre los hospitales*

Para estimar el número de heridos leves, moderados y graves se adoptó la metodología de Coburn & Spence (1992). Para cada edificio, la probabilidad de colapso y el porcentaje de heridos afectados según severidad se estimaron siguiendo los procedimientos descritos en los apartados 8.5.4. A cada tipología estructural se asignaron las tasas de personas atrapadas y de heridos leves, moderados, graves y muertos adoptando los valores utilizados por Lantada (2007).

Para la asignación de los heridos a los hospitales es necesario identificar una relación origen-destino de los pacientes, de acuerdo a su ubicación, a la localización de las instalaciones de salud y a las condiciones de la oferta de servicios. Para este fin, Congdom (2001) presenta una metodología para determinar el flujo de pacientes ante cambios en las propiedades de los hospitales. Similarmente, Fawcett y Oliveira (2000) sugieren una metodología para estimar la distribución de los heridos en los hospitales y en diferentes intervalos de tiempo. Ésta metodología se adopta para la evaluación de la seguridad de los sistemas de hospitales.

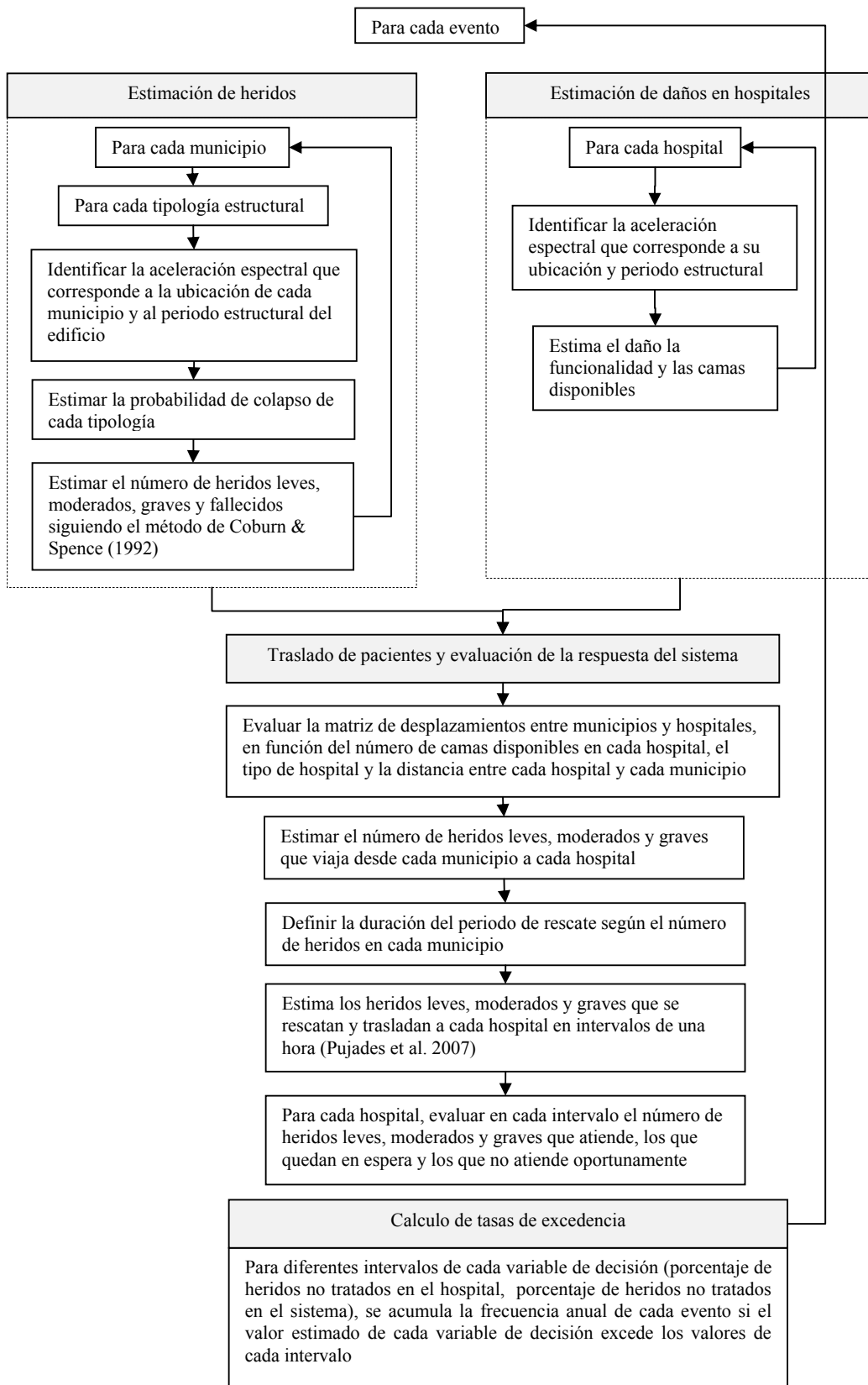


Figura 10-1 Metodología para la evaluación de la respuesta de los hospitales ante eventos sísmicos

Para estimar el número de heridos  $c_{ij}$  que van de la zona (municipio)  $i$  al hospital  $j$  se aplica la siguiente relación:

$$c_{ij} = C_i \times \frac{c'_{ij}}{\sum_{j=1}^{Nhosp} c'_{ij}} \quad [10-1]$$

En donde  $C_i$  representa el total de los heridos estimados en la zona  $i$ , y que equivale a la suma de los heridos leves, moderados y graves esperados.

El factor  $\frac{c'_{ij}}{\sum_{j=1}^{Nhosp} c'_{ij}}$  representa la proporción de heridos que van de la zona  $i$  al hospital  $j$ .

Por otro lado  $Nhosp$  corresponde al número total de hospitales. El factor  $c'_{ij}$  se evalúa de acuerdo a la siguiente expresión:

$$c'_{ij} = A_j \times \exp(-\gamma t_{ij}) \quad [10-2]$$

En donde  $\gamma$  es una constante y es igual a 0.15.  $A_j$  es el factor de atracción del hospital  $j$ ;  $t_{ij}$  representa el tiempo de desplazamiento entre la zona  $i$  al hospital  $j$ . Para estimar el tiempo de desplazamiento se asume una velocidad de traslado de 80 km/hora. La distancia  $ij$  se evalúa entre las coordenadas del centro del municipio y las del hospital. El factor de atracción de cada hospital se evalúa de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A_j = Bd_j \times FI_j \quad [10-3]$$

En donde  $Bd_j$  es el número de camas disponibles luego del evento y  $FI_j$  corresponde al factor de importancia del hospital, el cual toma los valores de 1 para hospitales básicos, 2 para hospitales de referencia y 3 para hospitales de alta tecnología. El número de camas disponibles se evalúa a partir del número de camas totales  $BT_j$ , el porcentaje de ocupación  $OP_j$  y el índice de funcionalidad  $L_{ff}$  estimado para cada hospital  $j$ , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Bd_j = BT_j \times (1 - (OP_j - 0.3)) \times L_{ff} \quad [10-4]$$

Para cada hospital, el grado de daño medio y el índice de funcionalidad se estimaron siguiendo los procedimientos presentados en el apartado 8.5.5.

Kelen et al. (2009), señalan que los hospitales, en situaciones de emergencia, pueden dar de alta (prematuramente) a pacientes de bajo riesgo que hayan ingresado antes de la crisis sísmica, con el fin de reducir la ocupación de la instalación y ampliar así la capacidad del hospital. Se consideran pacientes sin riesgo aquellos que pueden desplazarse por sí mismos y que pueden ser dados de alta sin mayor complicación. Los pacientes de bajo riesgo son aquellos que pueden ser dados de alta, que pueden continuar su tratamiento en casa, pero que necesitan ayuda de un familiar para desplazarse (Ministerio de Salud de Nicaragua 2005). Kelen et al. (2009) estiman que el porcentaje de reducción de la ocupación de las camas hospitalarias, al dar de alta prematuramente a pacientes de bajo riesgo, puede variar entre el 33% y el 39% dependiendo del tipo de hospital. Bajo estas consideraciones, para el análisis de la respuesta sísmica de la red de hospitales, se considera que los hospitales pueden reducir su porcentaje de ocupación en un 30% tal como se presenta en la ecuación [10-4].

10.2.2 Estimación del número de pacientes atendidos en diferentes intervalos de tiempo

La distribución en diferentes intervalos de tiempo del número de heridos que llegan a cada hospital depende de las actividades de rescate, de los recursos de emergencia disponibles, de los tiempos de viaje, entre otras variables. Araki (2008) presenta un modelo para realizar una simulación del transporte de heridos a los hospitales considerando el rol de diferentes agentes: hospitales, personal de emergencia, personal de administración de gobierno y los heridos. Para el presente trabajo se adopta la metodología sugerida por Pujades et al. (2007) en la cual, el número total de heridos (leves, moderados, graves)  $c_i(k)$  que se rescatan en la zona  $i$ , en el intervalo de tiempo  $k$ , se calcula utilizando una función exponencial decreciente que depende de dos parámetros: el número inicial de heridos rescatados  $c_i(1)$  en la zona  $i$ , y una tasa de decrecimiento  $r_i$ , tal como se presenta en la siguiente expresión:

$$c_i(k) = c_i(1)r_i^{k-1} \quad k = 1 \dots K_T \quad [10-5]$$

En donde  $K_T$  representa el número de intervalos considerados. De la revisión de los periodos de rescate realizada por Macintyre et al. (2006), se encuentra que el tiempo de rescate puede ser mayor a dos días, siendo poco factible rescatar víctimas aún con vida luego de 13 o 14 días. Bajo estas consideraciones, el número de intervalos considerados para el rescate de heridos se asignó dependiendo del total de heridos (leves, moderados, graves) calculados en cada municipio, de acuerdo a los rangos presentados en la Tabla 10-1.

**Tabla 10-1 Periodos de duración del rescate de heridos según el número de heridos**

Total de heridos	Duración del periodo de rescate $K_T$ (horas)
<50	10
50-250	72
250,1000	120
>1000	240

Siguiendo la ecuación [10-5] el número total de heridos  $C_i$  en la zona  $i$  se evalúa como:

$$C_i = \frac{c_i(1)(r_i^{K_T} - 1)}{r_i - 1} \quad [10-6]$$

Por otro lado, la tasa de decrecimiento se puede calcular siguiendo la siguiente relación:

$$r_i = \left( \frac{1}{c_i(1)} \right)^{\frac{1}{K_T-1}} \quad [10-7]$$

Ya que en el análisis se conoce el número total de heridos en cada municipio  $C_i$  es necesario estimar la tasa  $r_i$  y el número de heridos rescatados en el primer intervalo  $c_i(1)$  mediante un procedimiento iterativo. Para esto, se suponen diferentes valores para  $c_i(1)$  y se calcula la tasa de decrecimiento utilizando la ecuación [10-7] hasta que se encuentre un valor lo suficientemente cercano al total de heridos en la zona  $C_i$  de acuerdo a la ecuación [10-6].

Una vez identificados los heridos rescatados en el primer intervalo  $c_i(1)$  y la tasa de decrecimiento  $r_i$ , es posible identificar, para cada municipio  $i$ , el número de heridos rescatados en cada intervalo  $k$  siguiendo la expresión [10-5]. Para calcular, en forma simplificada, los heridos rescatados en cada municipio  $i$ , en intervalo  $k$  y según su severidad  $s$ ,  $c_{is}(k)$ , se consideró que los heridos de severidad  $s$  se rescatan en proporción al total de heridos, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$c_{is}(k) = c_i(k) \times \frac{C_{is}}{C_i} \quad [10-8]$$

En donde  $C_i$  es el número total de heridos que se estiman en el municipio y que equivale a la suma de los heridos leves, moderados y graves esperados.  $C_{is}$  corresponde a los heridos de la severidad  $s$  esperados en el municipio.

Una vez conocidos los heridos según nivel de severidad  $s$  que se rescatan en cada zona  $i$  y en cada intervalo  $k$   $c_{is}(k)$ , así como la proporción de los heridos que van de la zona  $i$  a cada hospital  $j$ , es posible establecer el número de pacientes según su severidad  $s$  que se llegan a cada hospital  $j$  en cada intervalo  $k$ ,  $c_{js}(k)$ , acumulando, para cada zona  $i$ , el producto entre los heridos rescatados en cada zona según su severidad en el intervalo  $k$ ,  $c_{is}(k)$  y el porcentaje de heridos que van de la zona  $i$  al hospital  $j$ , tal como se presenta en la siguiente expresión:

$$c_{js}(k) = \sum_{i=1}^{zonas} c_{is}(k) \times \frac{c'_{ij}}{\sum_{j=1}^{Nhosp} c'_{ij}} \quad [10-9]$$

Para obtener el número acumulado de heridos de severidad  $s$  que llegan al hospital  $j$  durante un determinado periodo, por ejemplo entre  $k=0$  y  $k=M$ ,  $Ac_{js}(M)$ , se debe realizar la suma de los heridos que llegan entre los intervalos  $k$  y  $M$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Ac_{js}(M) = \sum_{k=1}^{k=M} c_{js}(k) \quad [10-10]$$

### 10.2.3 Evaluación de heridos en espera

Una vez estimados los heridos según su severidad  $s$ , que llegan en cada intervalo  $k$  y a cada hospital  $j$ , es posible evaluar la respuesta de cada instalación para atenderlos. Paul et al. (2006), Takahashi et al. (2007) y Yi et al. (2010) presentan metodologías para obtener a través de simulaciones la capacidad que tienen los hospitales para atender heridos, así como los tiempos de espera de acuerdo a los recursos disponibles en cada instalación.

En el presente trabajo, el número de pacientes en espera en el hospital  $j$ , según su nivel de severidad  $s$  y en el intervalo  $k$ ,  $p_{js}(k)$ , se estiman de acuerdo a la siguiente expresión:

$$p_{js}(k) = p_{js}(k-1) + c_{js}(k) - \lambda \alpha_s L_{ff} - u_{js}(k) \quad [10-11]$$

En donde  $L_{ff}$  es el índice de funcionalidad del hospital  $j$ ,  $c_{js}(k)$  es el número de pacientes que llegan al hospital  $j$ , según su severidad  $s$ , en el intervalo  $k$ ;  $\lambda$  es la tasa de pacientes que atiende el hospital por hora.  $\alpha_s$  es un factor de prioridad asignado para el tratamiento de los pacientes y representa un porcentaje de  $\lambda$ . A través del factor  $\alpha_s$ , se desea reflejar la clasificación de heridos en el hospital (*triage*) y la correspondiente priorización para la atención. Por otro lado,  $\mu_{js}(k)$  es el número de pacientes de severidad  $s$  no atendidos oportunamente en el hospital  $j$  en el intervalo  $k$ . Dependiendo de la severidad del paciente,  $\mu_{js}(k)$  se evalúa como sigue:

$$\mu_{js}(k) = c_{js}(k - \tau_s) - \tau_s \lambda \alpha_s L_{ff} \quad [10-12]$$

En donde  $L_{ff}$  es el índice de funcionalidad del hospital  $j$ ,  $\tau_s$  es el tiempo límite de tratamiento (oportuno, de supervivencia) para un paciente de severidad  $s$  (leve, moderado, grave). De acuerdo con Paul et al. (2006), en la Tabla 10-2 se presentan los tiempos límite de tratamiento para los pacientes según nivel de severidad, así como los valores del factor de prioridad asignados a cada tipo de paciente,  $\alpha_s$ .

**Tabla 10–2 Tiempo límite de tratamiento según nivel de herido**

Nivel de severidad	Tiempo límite de tratamiento (minutos) $\tau_s$	Factor de prioridad $\alpha_s$
Leve:	390	15%
Moderado	270	35%
Grave	80	50%

- Leve* Pacientes con laceraciones, cortes, heridas problemas respiratorios leves, fracturas que no requieren cirugía
- Moderado* Pacientes que llegan con problemas más severos que pueden no necesitar cirugía
- Grave* Pacientes que llegan con quemaduras, golpes en la cabeza, fracturas que requieren cirugía

Para obtener el número acumulado de heridos de severidad  $s$  no tratados oportunamente  $j$  durante un determinado periodo, por ejemplo entre  $k=0$  y  $k= M$ ,  $A\mu_{js}(M)$ , se debe realizar la suma de los heridos que llegan no son tratados oportunamente entre los intervalos  $k$  y  $M$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A\mu_{js}(M) = \sum_{k=1}^{k=M} \mu_{js}(k) \quad [10-13]$$

Como ejemplo, se presenta el desarrollo de un caso hipotético, en el cual se conocen el número de heridos según su severidad en una zona determinada y se distribuyen a cuatro hospitales. En la Tabla 10–3 se presentan los heridos según severidad. A partir del número total de heridos, y considerando un periodo de atención de 240 horas, de acuerdo a los intervalos señalados en la Tabla 10–1, se estimaron la tasa de rescate  $r_i$  y el número de heridos rescatados en el primer intervalo  $c_i(I)$  de acuerdo a los procedimientos explicados en el apartado 10.2.2.

**Tabla 10–3 Número de heridos y parámetros de la función de rescate de los heridos**

Heridos leves	moderados	Graves	Kt (horas)	$r_i$	$c_i(I)$
500	300	200	240	0.99	10.8

En la Tabla 10–4 se presentan los parámetros de la oferta y acceso a los hospitales (Caso I): el número de camas, el porcentaje de ocupación de la instalación, el factor de importancia, la tasa de atención de pacientes por hora  $\lambda$ , la funcionalidad esperada en el hospital luego del terremoto y el tiempo de traslado en horas del municipio afectado al cada hospital,  $t_{ij}$ . A partir de estos valores se estiman el factor  $c'_{ij}$  y el porcentaje de heridos que llegan a cada hospital siguiendo los procedimientos presentados en el apartado 10.2.1. A su vez, en la Tabla se incluye el número total de heridos que llegan a cada instalación, el cual también se puede calcular a partir de la suma de los heridos rescatados en cada intervalo  $k$  y que llegan a cada hospital  $j$   $c_{js}(k)$  siguiendo los procedimientos descritos en el apartado 10.2.2. Las diferencias que se observan entre el número total de heridos en el municipio (1000 en la Tabla 10–3) y el número total de heridos que llegan a los hospitales (995) corresponde al error del proceso iterativo para calcular la tasa de rescate  $r_i$  y el número de heridos rescatados en el primer intervalo  $c_i(I)$ . Dicho error se consideró como el 0.5% del total de heridos que ocurren en el municipio (5 en este caso).

**Tabla 10–4 Caso I: Parámetros de los hospitales y reparto de los heridos en el hospital**

Hospitales	Número de Camas	Ocupación (%)	Factor importancia	$\lambda$	Funcionalidad ( $L_{ij}$ )	$t_{ij}$ (horas)	$c'_{ij}$	Porcentaje de heridos de la zona a cada hospital	Heridos que llegan al hospital
A	300	50%	3	3	0.8	0.6	524.9	47.9%	476
B	200	80%	2	2	0.8	0.3	149.7	13.6%	136
C	100	90%	1	1	0.8	0.1	31.6	2.9%	29
D	300	75%	3	3	0.8	0.4	390.8	35.6%	354
Total	900						1097	100	995

De la Tabla 10–4 se observa que el mayor porcentaje de heridos se asigna a los hospitales con mayor número de camas disponibles, de acuerdo al número de camas y al porcentaje de ocupación. De la anterior Tabla se resalta que los factores  $c'_{ij}$  de cada hospital no representan el número de pacientes que ingresan a la instalación. Este factor se emplea para repartir los heridos considerando la atracción del hospital (en términos del número de camas disponibles y el tipo de hospital), así como el tiempo de viaje entre el hospital y la zona en la que se encuentran los heridos.

En la Tabla 10–5 se presenta un Caso II en el cual se cambia la funcionalidad de los hospitales “A” y “C” (se disminuye de 0.8 a 0.2) con el fin de revisar cómo varía el reparto de los heridos ante estos cambios.

**Tabla 10–5 Caso II: Parámetros de los hospitales y reparto de los heridos en el hospital**

Hospitales	Número de Camas	Ocupación (%)	Factor importancia	$\lambda$	Funcionalidad ( $L_{ff}$ )	$t_{ij}$ (horas)	$c'_{ij}$	Porcentaje de heridos de la zona a cada hospital	Heridos que llegan al hospital
A	300	50%	3	3	0.2	0.6	131.2	19.3%	192
B	200	80%	2	2	0.8	0.3	149.7	22.0%	219
C	100	90%	1	1	0.2	0.1	7.9	1.2%	12
D	300	75%	3	3	0.8	0.4	390.8	57.5%	572
Total	900						679.7	100%	995

De la comparación de los valores de Tabla 10–4 y de la Tabla 10–5 se observa que la reducción de la funcionalidad del hospital “A” implica una disminución del número de camas disponibles en esa instalación, de acuerdo a las expresiones [10-3] y [10-4]. Ante esta situación, se asignan mayores porcentajes de pacientes a los hospitales “B” y “D”, siendo mayor el porcentaje en éste último, dado que tiene un mayor número de camas disponibles.

Siguiendo con el caso presentado en la Tabla 10–5, en la Tabla 10–6 se presentan los heridos según su severidad ingresados al hospital “D”. Se observa que la proporción de pacientes ingresados en el hospital según su severidad es igual a la proporción de pacientes esperados en el municipio (500/1000 leves, 300/1000 moderados y 200/1000 graves), tal como se observa en la Tabla 10–3. Por otro lado, se presenta la capacidad de atención de heridos, según su severidad, que tendría el hospital en el periodo de gestión de la emergencia. Dicha capacidad se calcula como el producto entre la tasa de atención a heridos por hora  $\lambda$ , el factor de prioridad de tratamiento de los heridos según su severidad  $\alpha_s$ , el índice de funcionalidad del hospital  $L_{ff}$  y el periodo de duración de la emergencia, el cual es igual a 240 horas en este ejemplo.

**Tabla 10–6 Heridos ingresados al hospital D según su severidad**

Tipo de heridos	Heridos ingresados en el hospital D	Heridos ingresados en el hospital D, (% respecto al total de heridos ingresados al hospital)	Capacidad de atención de heridos durante el periodo de la crisis $\lambda \times \alpha_s \times L_{ff} \times 240$
Leves	286	50%	86
Moderados	172	30%	202
Graves	114	20%	288
Total	572	100%	576

En la Figura 10-2, Figura 10-3 y Figura 10-4 se presenta la gestión de los heridos leves, moderados y graves, respectivamente, en el hospital “D”, durante el periodo de la emergencia. En estas figuras, el número acumulado de heridos ingresados corresponden a la suma de heridos (leves, moderados, graves, según sea el caso) que ingresan al hospital durante un periodo determinado, tal como se presenta en la expresión [10-10]. De esta manera, se observa que cuando  $M= 240$  horas, al hospital han ingresado 286 heridos leves, 172 moderados y 114 graves. Los heridos en espera se estiman de acuerdo a la ecuación [10-11]. Los heridos no tratados oportunamente, en cada intervalo  $k$ , se calculan siguiendo la expresión



[10-12]; en las figuras se presentan los valores acumulados de los heridos no tratados oportunamente, los cuales se determinan siguiendo la expresión [10-13].

Para este hospital, se observa que el número acumulado de heridos leves atendidos (la capacidad de atención) es siempre menor que el número acumulado de heridos leves ingresados (ver Figura 10-2). Por esta razón, constantemente se presentan heridos leves en espera. Dada la tasa de atención  $\lambda$ , el factor de prioridad  $\alpha_s$ , el número de pacientes ingresados y el tiempo de supervivencia de los heridos leves, también se presentan casos de heridos no tratados oportunamente. De esta Figura se resalta que la suma entre el total de los heridos no tratados oportunamente (18), la capacidad de atención de heridos (86) y los heridos en espera (182), es igual al número acumulado de heridos ingresados al final del periodo de la emergencia (286).

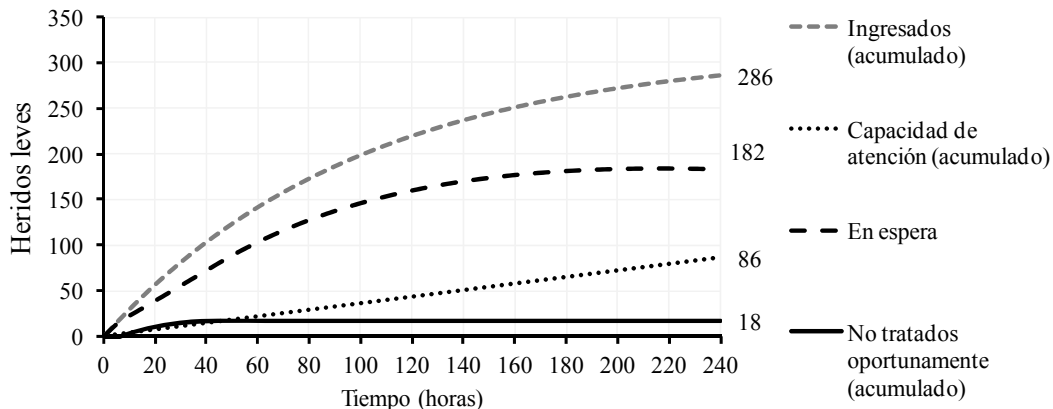


Figura 10-2 Gestión de los heridos leves en el hospital "D"

En el caso de los heridos moderados (ver Figura 10-3), se observa que durante las primeras 190 horas aproximadamente, el número acumulado de pacientes atendidos es menor que el número acumulado de pacientes ingresados. Por esta razón se presentan pacientes en espera. A partir de este punto la capacidad del hospital es mayor que los pacientes ingresados y por lo tanto ya no hay pacientes en espera. Para este caso, no se presentan pacientes no tratados oportunamente.

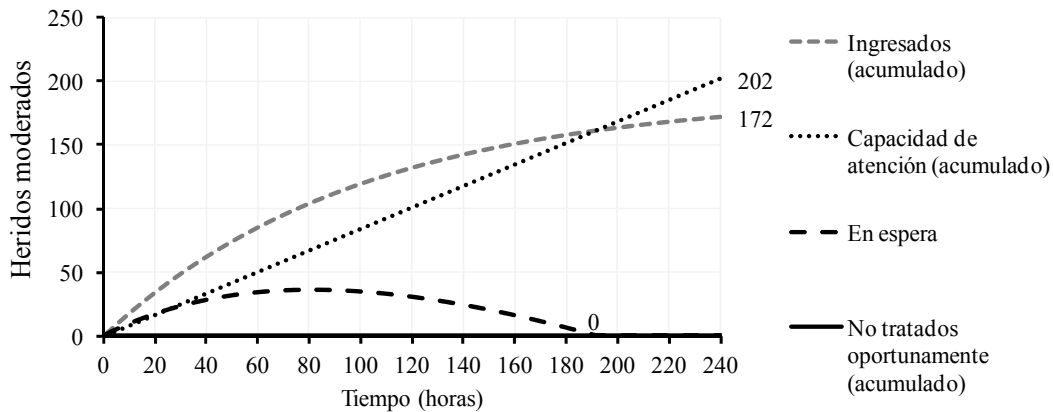


Figura 10-3 Gestión de los heridos moderados en el hospital D

En el caso de los heridos graves, se observa que la capacidad que tiene el hospital para atender heridos graves es siempre mayor que el número acumulado de heridos ingresados, por lo tanto no se presentan heridos en espera ni heridos no tratados oportunamente.

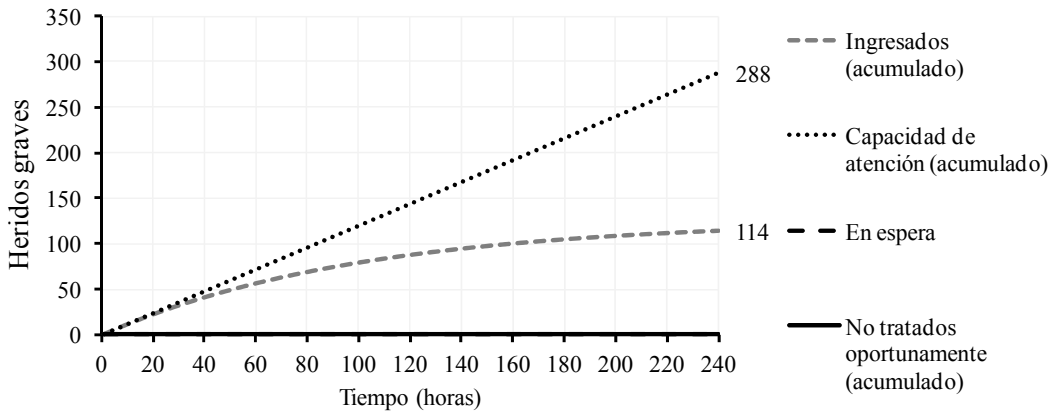


Figura 10-4 Gestión de los heridos graves en el hospital D

De este ejemplo se observa que la capacidad de atención del hospital es mayor para los heridos graves y menor para los heridos leves. De la Tabla 10–6 se observa que en proporción, dicha capacidad corresponde a los factores de prioridad  $\alpha_s$  asignados según la severidad de los heridos, siendo 0.15 para los leves (86/576), 0.35 para los moderados (202/576) y 0.5 para los graves (288/576). Por otro lado, la respuesta del hospital “D”, en términos del porcentaje de heridos no tratados oportunamente (33 leves, 0 moderados y 0 graves) respecto al total de heridos ingresados al hospital es del 3% (33/572).

Al repetir este ejercicio en todos los hospitales del Caso II y al sumar los resultados de los heridos en espera, de los ingresados y de los no tratados oportunamente, para cada intervalo  $k$ , es posible estimar la respuesta sísmica del conjunto de hospitales. En la Figura 10-5, Figura 10-6 y Figura 10-7 se presenta la gestión de la emergencia en los cuatro hospitales. Se observa que ingresan 499 heridos leves, 298 heridos moderados y 198 heridos graves, los cuales se acercan a los valores originales presentados en la Tabla 10–3. Como se mencionó atrás, la diferencia entre el número de heridos en el municipio y en los hospitales se debe al error considerado en el proceso iterativo de cálculo de la tasa de rescate  $r_i$ .

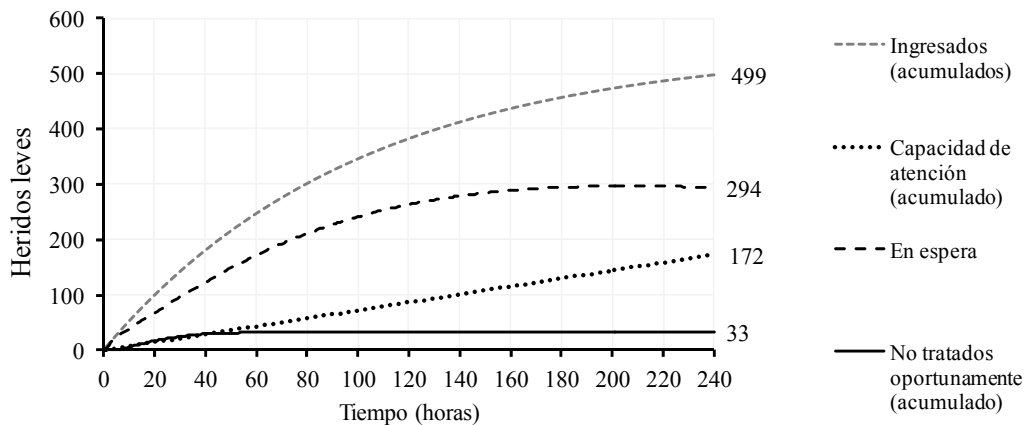


Figura 10-5 Gestión de heridos leves en el conjunto de hospitales (ejemplo)

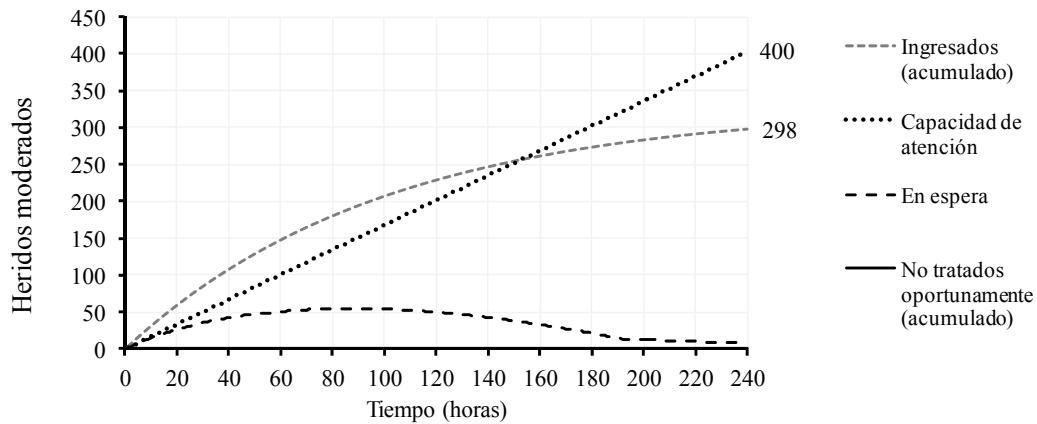


Figura 10-6 Gestión de heridos moderados en el conjunto de hospitales (ejemplo)

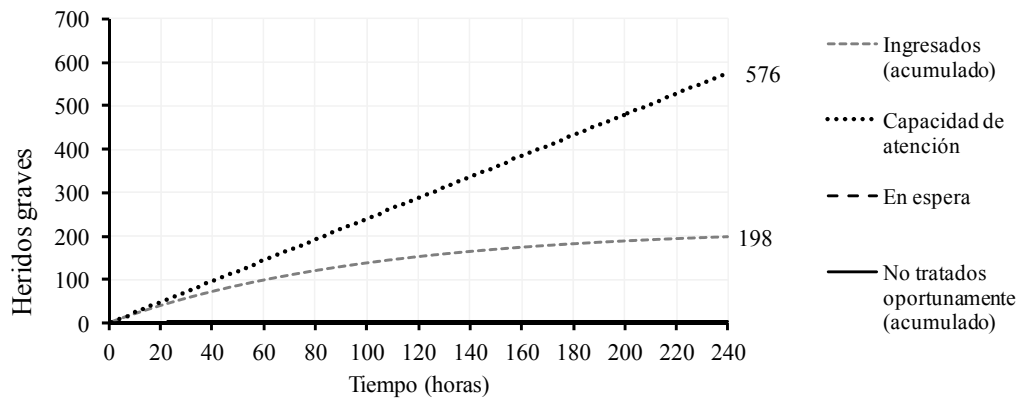


Figura 10-7 Gestión de heridos graves en el conjunto de hospitales (ejemplo)

Por simplicidad, la respuesta del sistema se evalúa como la suma de los heridos leves, moderados y graves no tratados oportunamente, en proporción al total de heridos ingresados en los hospitales. De esta manera, en este ejemplo dicho porcentaje corresponde al 3.3% (33/995). Al desarrollar el Caso I presentado en la Tabla 10-4, el porcentaje de heridos no tratados oportunamente es de 0.4%. De esta manera se observa que las variaciones en la funcionalidad de los hospitales repercuten en la respuesta sísmica del conjunto y que a través de una sola variable es posible comparar la respuesta de los dos casos.

#### 6.4.1 Alcance y limitaciones del modelo

El objetivo del modelo es calificar el comportamiento de una red de hospitales ante un escenario de daños por sismo, considerando como medida de evaluación el porcentaje de pacientes que no se atienden oportunamente respecto al total de heridos que ingresan en las instalaciones. El modelo presenta limitaciones respecto al reparto de los heridos entre los hospitales y al transporte de los heridos a las instalaciones de salud.

En cuanto al reparto de los heridos, en el modelo se considera que la proporción de heridos que van del municipio  $i$  al hospital  $j$  permanece constante a lo largo de la gestión de la emergencia. De esta manera, queda fuera del alcance del estudio evaluar, durante la atención de la crisis, el cambio en el reparto de los heridos entre los hospitales ante variaciones del número de camas disponibles.

Por otro lado, en el modelo presentado no se considera el envío de pacientes desde un hospital a otro. De esta manera queda fuera del alcance del estudio la evaluación de las ventajas de los sistemas de referencia de pacientes.

En cuanto al transporte de los heridos, en el modelo se considera una velocidad promedio de transporte (80 km/h) y la distancia recorrida se calcula entre los puntos dados por las coordenadas del hospital y del centroide del municipio o de la zona de análisis. De esta manera, queda fuera del alcance del estudio el cálculo de distancias considerando la malla vial, así como de los tiempos de viaje considerando el tipo de vía, o alteraciones en el transporte.

Respecto al reparto de los heridos en diferentes intervalos de tiempo, se considera que el tiempo de rescate incluye el tiempo que tarda el herido en llegar al hospital. Esta aproximación es razonable cuando los tiempos de viaje son pequeños en proporción a la duración del periodo de rescate. De esta manera, queda fuera del alcance la revisión de los efectos en los pacientes por tiempos de viaje prolongados.

En lo que respecta a la medida de evaluación, por simplicidad se consideró que la respuesta se mida en términos del total de heridos (leves, moderados y graves) no tratados oportunamente, respecto al total de heridos ingresados en los hospitales. Es posible realizar los cálculos discriminando dicho porcentaje según la severidad de los heridos, enriqueciendo así la planificación de recursos para la respuesta a la crisis.

### **10.3 Caso de estudio: Sistema de hospitales públicos de Cataluña**

#### *10.3.1 Polos de atracción de servicios, recursos médicos y congestión de los servicios hospitalarios:*

En la Figura 10-8 se presenta un mapa del número (interpolado) de camas de los hospitales de la XHUP en Cataluña. A través de esta zonificación se puede comparar geográficamente la oferta y señalar áreas de concentración. Se observa que la menor oferta (inferior a 135camas) se sitúa en las comarcas de Val d'Arán, Pallars Jussà, Pallars Sobirà, Alt Urgell, Cerdanya y parte de Ripollés. En estas zonas se ubican hospitales de nivel básico. En las comarcas de Alt Empordà, Baix Empordà, Garrotxa, Ribera de Ebre, Terra Alta, Selva, Berguedà y parte de Solsonés y Noguera se observa un rango de camas que oscila entre 135 y 200. Al suroccidente de Cataluña, en las comarcas de Segria, Montsia, Baix Ebre, Baix Camp, Garrigues, Pla de Urgell, Urgell, Conca de Barberá, Segarra, Anoia y Tarragona se encuentran rangos de camas entre 200 y 280 que corresponden a hospitales de referencia. Los Focos de mayor oferta se encuentran en Vallès Occidental y Barcelonés, cuyos rangos de camas oscilan entre 400 y 800 camas y corresponden a hospitales de alta tecnología.

La distribución de las camas hospitalarias corresponde a la densidad de población. De acuerdo con Prat et al. (2009) la accesibilidad al sistema sanitario se considera buena. En su estudio los autores estiman que cerca del 98,1% de la población reside a menos de 30 minutos de un centro de la XHUP. A pesar de que el flujo de pacientes entre los hospitales es grande, el porcentaje de resolución de la hospitalización de enfermos graves es alto en todos los gobiernos territoriales de la salud. Al año 2010, cerca del 94% de la hospitalización de enfermos graves se resolvió en la misma zona del paciente (Generalitat de Cataluña, Departament de Salut 2010).

La zona de Barcelona se considera un polo de atracción territorial de influencia sobre toda Cataluña debido a su dotación efectiva, especialmente en hospitalización y en Cirugía Mayor Ambulatoria, siendo menos importante en las áreas de influencia y cobertura ofrecida por los centros de Gironés – Pla de l'Estany – Selva y Tarragonès (Generalitat de Catalunya, Generalitat de Cataluña, Departament de salut 2008).

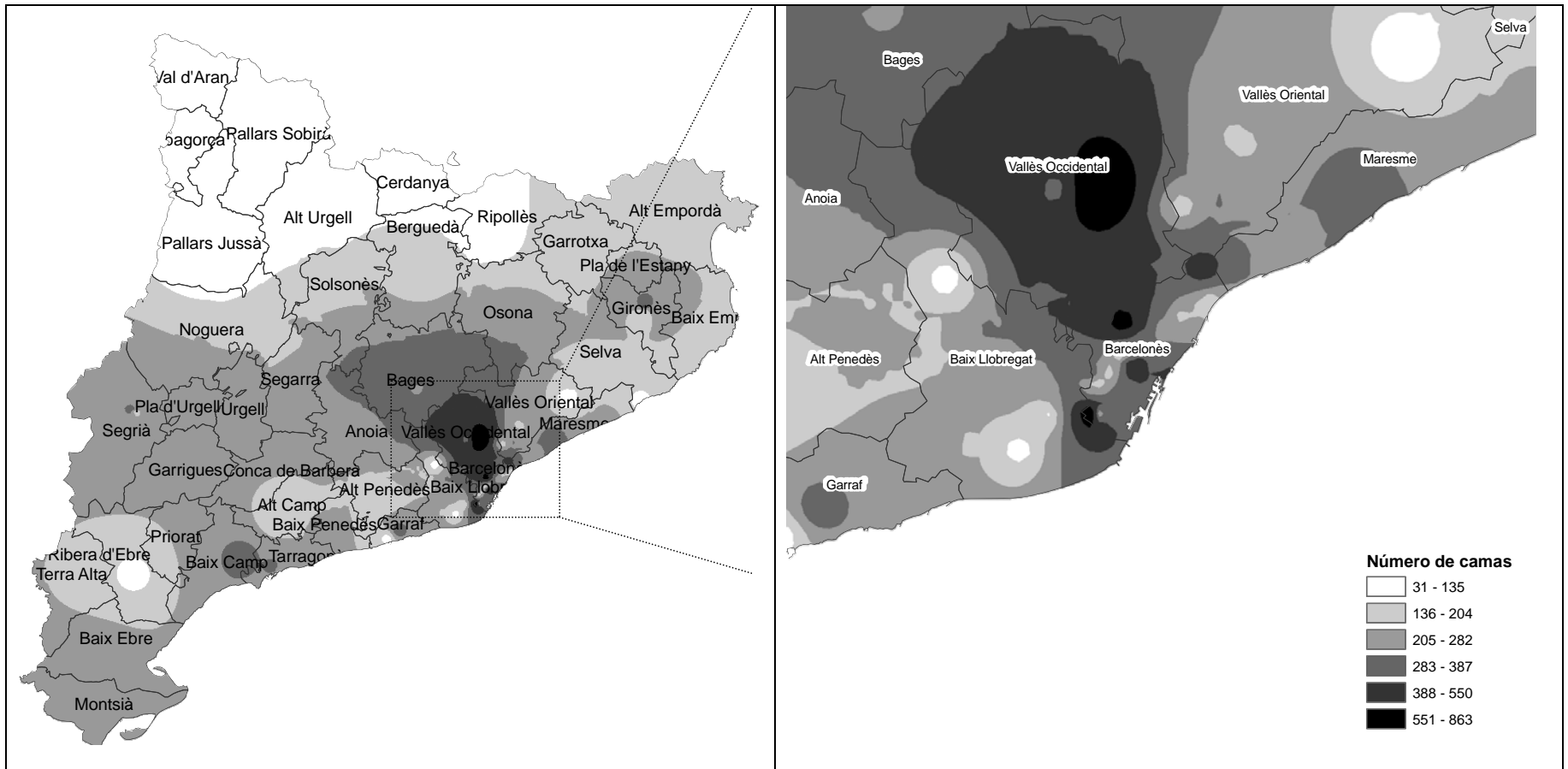


Figura 10-8 Zonificación según camas hospitalaria

De acuerdo al estudio de demografía de los profesionales sanitarios de Cataluña (Generalitat de Cataluña, Departament de salud 2008), en la región sanitaria de Barcelona se encuentra el mayor valor de recursos humanos en términos absolutos. En términos relativos a la población, las regiones sanitarias de mayor cobertura son Alt Pirineu, Val d'Aran y Lleida. Si se establece la referencia en relación a la atención hospitalaria, las regiones de mayor rendimiento corresponden a la región Metropolitana y Girona.

En cuanto a la dotación tecnológica de la red sanitaria, según el Registro de equipamientos de tecnología médica<sup>35</sup> en Catalunya (Estrada y Parada 2004) la región de Barcelona se cataloga como la de mayor dotación. La Tabla 10-7 presenta el número de equipos de tecnología médica, el porcentaje respecto al total de la región y la tasa por cada 10.000 habitantes según regiones sanitarias

**Tabla 10-7 Número total de equipos, porcentaje y tasa por 10.000 habitantes según regiones sanitarias**

Región	Total equipos	%	Tasa por 10.000 habitantes
Torres de l'Ebre	73	2%	4.32
Lleida	154	5%	4.15
Tarragona	170	6%	3.53
Barcelonès Nord i Maresme	226	8%	2.98
Girona	251	9%	4.11
Costa de Ponent	368	13%	2.77
Centre	507	17%	3.36
Barcelona Ciutat	1,179	40%	7.11
Cataluña	2,928	100	4.23

Fuente: Estrada y Parada (2004)

La Tabla 10-8 presenta el número de pacientes en lista de espera y la actividad quirúrgica según regiones sanitarias. Estos valores también se presentan normalizados por cada mil habitantes así como en términos del porcentaje respecto al total en Cataluña. Se observa que los porcentajes de pacientes en espera y de actividad corresponden al porcentaje de población de cada región. Por otro lado, los valores normalizados por cada mil habitantes muestran que las regiones de Terrès de l'Ebre, Barcelona y Cataluña central son las que tienen mayor proporción de pacientes en espera (en condiciones normales) y por lo tanto mayor congestión.

**Tabla 10-8 listas de espera y actividad según regiones sanitarias**

Región	Pacientes en espera (jun 2006)	Pacientes en espera (1000 hab)	Pacientes en espera (%) (jun 2006)	Actividad quirúrgica (pacientes atendidos)	Actividad quirúrgica (1000 hab)	Actividad quirúrgica (%)	Porcentaje población	Población total
Alt Pirineu i Arán	244	3.74	0.4%	874	13.40	1%	1%	65,203
Lleida	1,734	5.13	3%	4,398	13.01	5%	5%	338,122
Camp de Tarragona	3,914	7.41	6%	6,014	11.39	7%	7%	527,954
Terrès de l'Ebre	1,418	8.03	2%	1,896	10.74	2%	2%	176,537
Girona	3,026	4.60	5%	7,087	10.77	8%	9%	657,948
Cataluña Central	4,615	9.63	7%	10,743	22.43	12%	7%	479,048
Barcelona	46,667	9.43	76%	59,393	12.00	66%	69%	4,951,263
Cataluña	61,618	8.56	100%	90,405	12.56	100%	100%	7,196,075

Fuente: Generalitat de Cataluña, Departament de salud (2008)

<sup>35</sup> La cobertura actual del registro de equipamientos de tecnología médica de Cataluña incluye los siguientes tipos de equipos: acelerador lineal, angiógrafo digital, bomba de cobalto, cámara hiperbárica, cápsula endoscópica, cirugía robótica, densitómetro ossi, ECMO (oxigenación por membrana extracorpórea), ecógrafos, esterilizador de material médico, gammacámara, láser, litotriptor, magnetoencefalógrafo, mamógrafo, neuronavegador cerebral, sistema de comunicación y archivo de imágenes, resonancia magnética, sistema de telemedicina, tomógrafo computacional y tomógrafo para la emisión de positrones.

En cuanto a la atención de urgencias en los hospitales, en la Tabla 10–9 se presentan el número y porcentaje de hospitales según la tasa de pacientes atendidos por hora  $\lambda$ . Este valor se obtuvo de los datos asistenciales de los hospitales, considerando el número de urgencias que atienden (Generalitat de Catalunya, Departament de Salut, 2003).

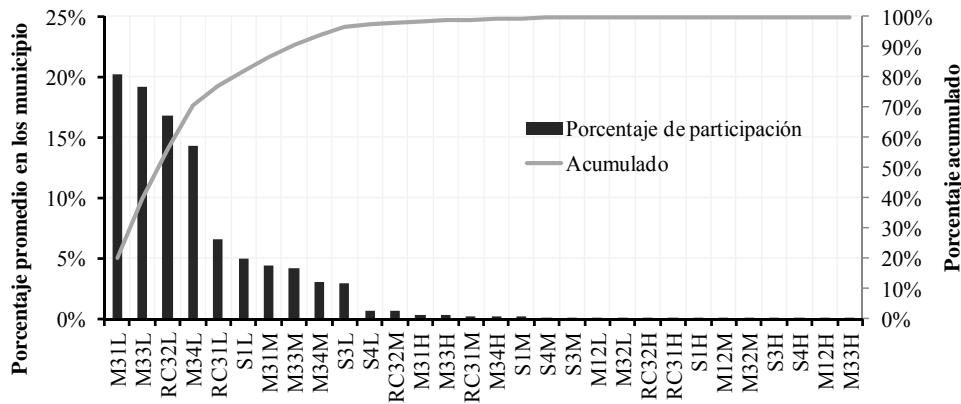
**Tabla 10–9 Porcentaje de hospitales según tasa de atención de pacientes**

Tasa de atención de pacientes $\lambda$ (pacientes /hora)	Número de hospitales	Porcentaje de hospitales
2.26	15	23.4%
4.50	13	20.3%
6.74	11	17.2%
8.98	11	17.2%
11.23	5	7.8%
13.47	2	3.1%
15.71	6	9.4%
20.19	1	1.6%

Fuente: Generalitat de Catalunya, Departament de Salut (2003)

### 10.3.2 Evaluación de la respuesta para eventos específicos

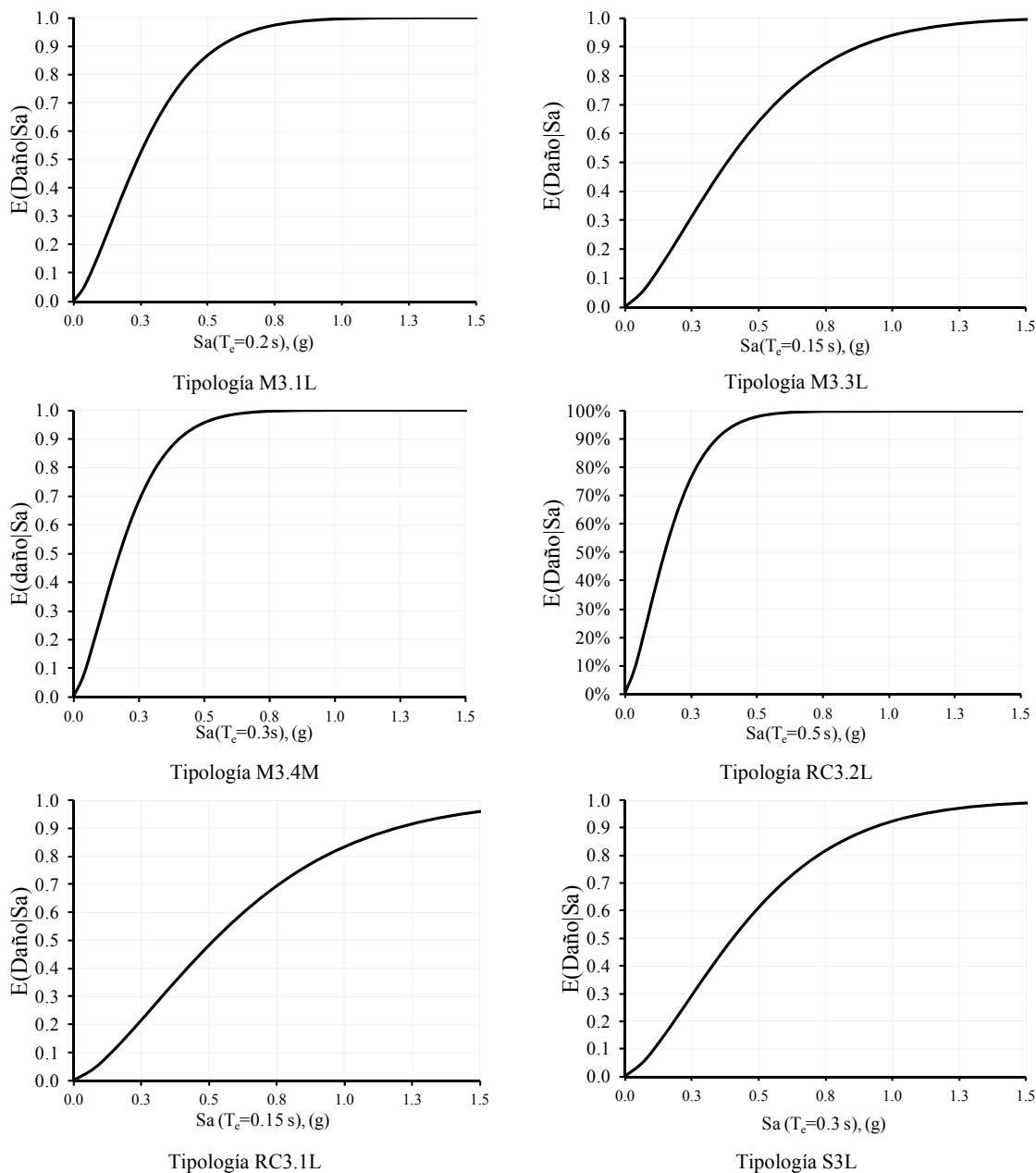
Para el caso de estudio, la estimación de heridos se realizó a nivel de cada municipio. De esta manera, en cada municipio, el área construida se distribuyó en diferentes tipologías estructurales de acuerdo a la clasificación realizada en el Plan Especial de Emergencias SISMicas de CATaluña SISMICAT según clases de vulnerabilidad (Susagna et al. 2006). Los porcentajes correspondientes a cada tipología estructural se obtuvieron de las descripciones de las tipologías según clases probables de vulnerabilidad, tal como se sugiere en el proyecto RISK UE (Milutinovic y Trendafiloski 2003). En total se consideraron 955 municipios y 30 tipologías estructurales. En la Figura 10-9 se presenta el porcentaje promedio de las tipologías estructurales consideradas en el estudio. La mayoría de las estructuras se clasifican en los tipos M31, M33, M34, RC31, RC32, S1 y S3.



- M12 Muros de carga de mampostería de piedra tallada
- M31 Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera
- M32 Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de bóveda de mampostería
- M33 Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería
- M34 Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado
- RC32 Estructuras irregulares de hormigón armado con tabiquería de mampostería
- RC31 Estructuras regulares de hormigón armado con tabiquería de mampostería
- RC4 Sistemas duales con muros y pórticos de hormigón armado
- RC5 Muros de hormigón prefabricado
- RC6 Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón
- S1 Estructuras metálicas resistentes al momento
- S3 Estructuras metálicas con tabiquería de mampostería no reforzada
- S4 Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados "in situ"

**Figura 10-9 Porcentajes promedio de participación de las tipologías estructurales consideradas en el análisis**

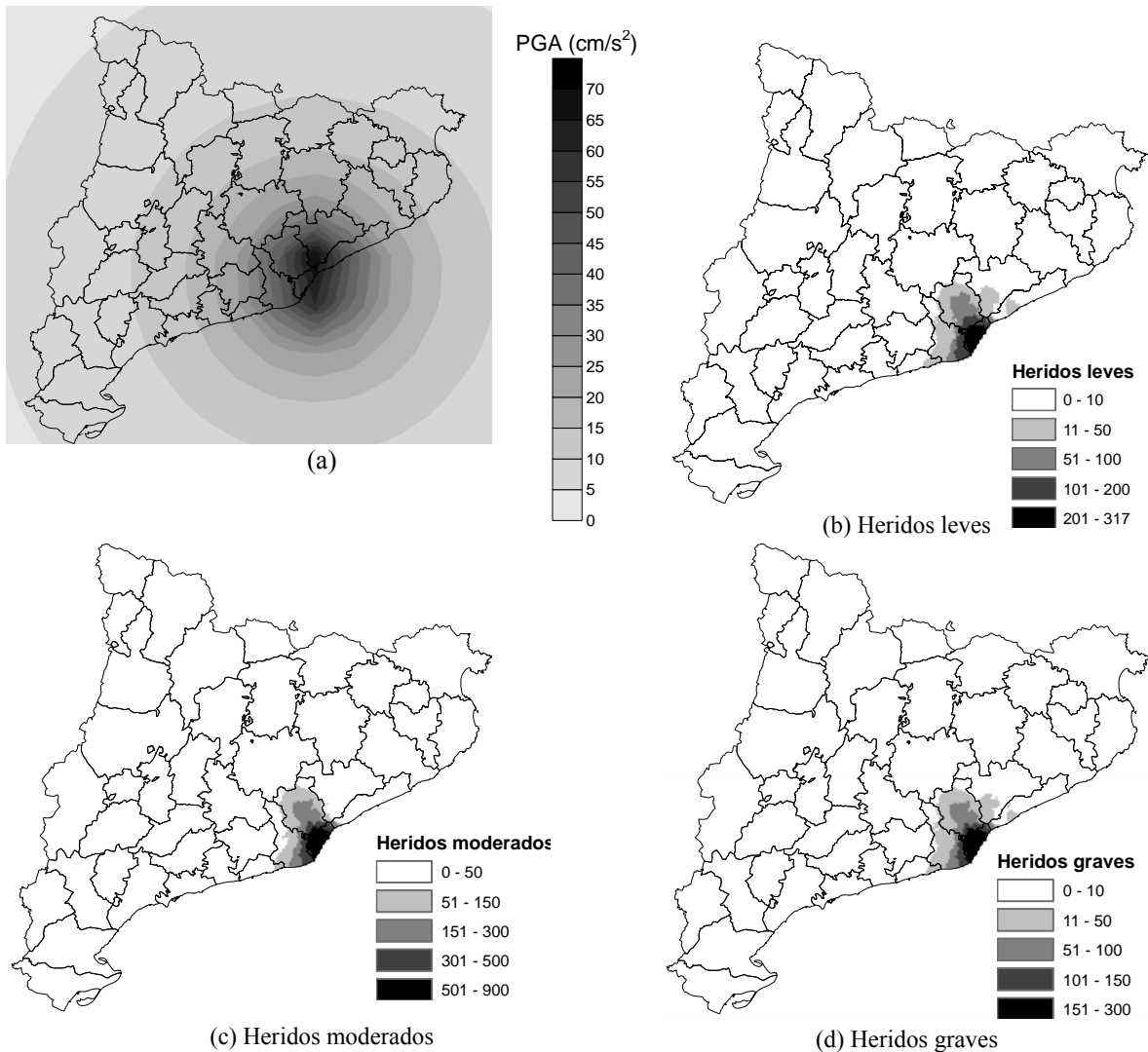
Para cada tipología se desarrollaron curvas que relacionan el daño esperado con la aceleración espectral a la que se encuentra expuesto el edificio, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 8.5.5. En la Figura 10-10 se presentan dichas curvas para las tipologías más comunes del análisis.



**Figura 10-10 Curvas de daño empleadas en el análisis**

El escenario simulado corresponde a un terremoto de Magnitud 5.3, con epicentro cercano a la ciudad de Barcelona, (ver Figura 10-11 a). Este escenario se generó a partir del modelo de peligrosidad sísmica elaborado por GEOTER (2008) empleando el software Crisis 2007 (Ordaz et al. 2007). Este escenario se consideró de interés por estar cercano a los centros poblados de mayor densidad en la región. Los heridos se calcularon adoptando la metodología de Coburn & Spence (1992). La probabilidad de alcanzar el estado de colapso se estimó a partir de las curvas de daño, tal como se describe en el apartado 8.5.4. En la Figura 10-11 (b), (c) y (d) se presenta el número interpolado de heridos esperados de severidad leve, moderada y grave, respectivamente.





**Figura 10-11 Aceleraciones espectrales para t=0 segundos en el escenario; estimaciones de los heridos esperados en el escenario (b) leves; (c) moderados; (d) graves**

En la Tabla 10–10 se presentan los resultados de la respuesta sísmica de la red de hospitales ante el escenario simulado.

**Tabla 10–10 Respuesta sísmica de la red de hospitales en el escenario**

Heridos	Total Ingresados a la red de hospitale	Total de heridos no atendidos oportunamente en la red de hospitales	
		Numero	Porcentaje
Leves	7400	880	11.9%
Moderados	20572	4522	22.0%
Graves	6899	1425	20.7%
Total	34871	6828	19.6%

En la Figura 10-12, Figura 10-13 y Figura 10-14 y se presenta la gestión de los heridos leves, moderados y graves, respectivamente. En estas Figuras se presentan el número acumulado de heridos ingresados, el número de heridos en espera, los heridos no tratados oportunamente, así como el número acumulado de heridos que la red de hospitales es capaz de atender durante el periodo de rescate (240 horas).

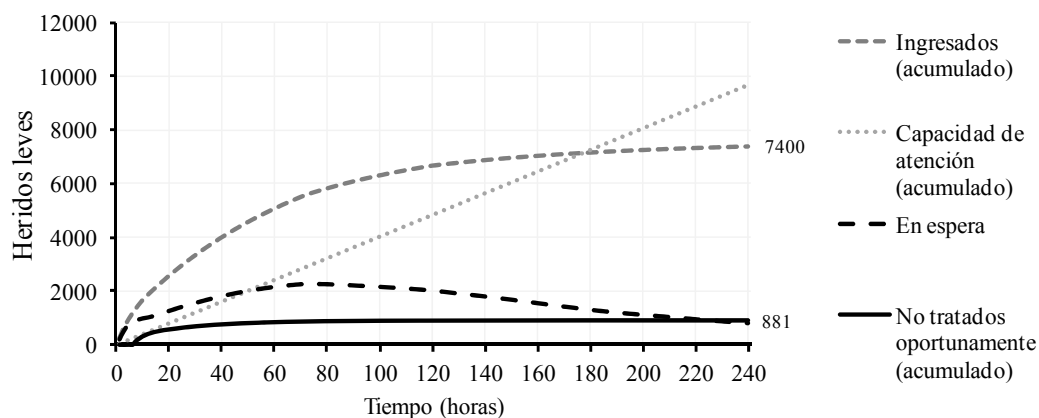


Figura 10-12 Gestión de los heridos leves en el sistema

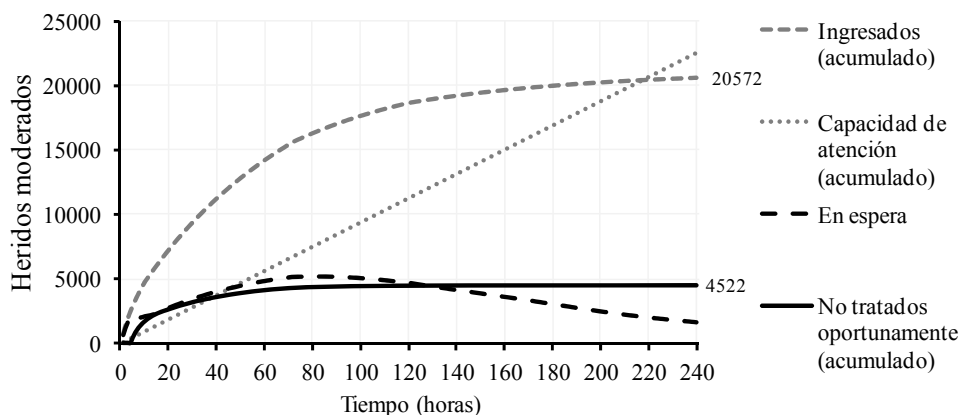


Figura 10-13 Gestión de heridos moderados en el escenario

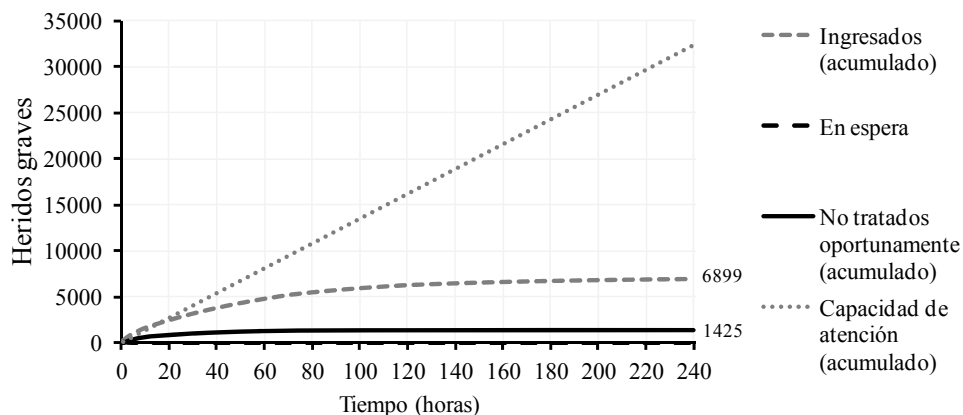


Figura 10-14 Gestión de heridos graves en el escenario

De Figura 10-12, Figura 10-13 y Figura 10-14 se observa que al final del periodo de rescate (240 horas) todos los heridos graves son atendidos y por lo tanto no se observan heridos graves en espera. No ocurre lo mismo con los heridos leves y moderados; en ese mismo intervalo todavía se calculan heridos leves y moderados en espera. El mayor número de pacientes leves y moderados en observa entre las 60 y 80 horas del evento. A su vez, se observa que durante las primeras 20 horas, el número de pacientes no tratados oportunamente crece considerablemente. A partir de este momento tiende a estabilizarse.

En la Figura 10-15 se presenta un mapa de los hospitales según valores del índice de funcionalidad calculado para el evento analizado. De esta Figura se observa que los hospitales afectados corresponden a aquellos cercanos al epicentro del evento y que su índice de funcionalidad puede llegar a valores cercanos a cero.

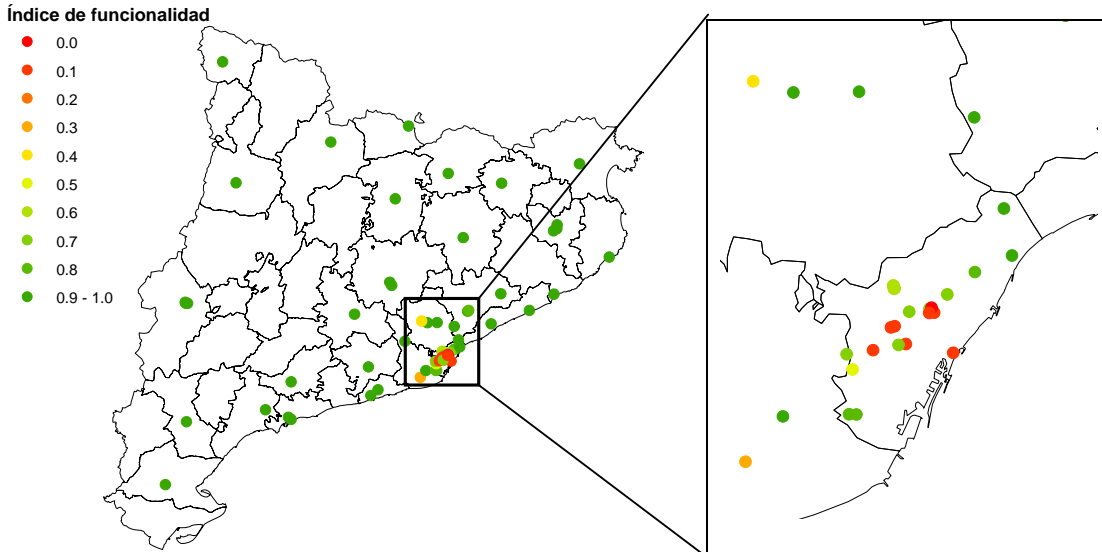


Figura 10-15 Índices de funcionalidad calculados en los hospitales para el evento

En la Figura 10-16 se presenta un mapa de los hospitales según rangos del total de heridos ingresados. De esta Figura se observa que los heridos se reparten entre los hospitales de la red de acuerdo a la distancia, al factor de importancia, a la funcionalidad de las instalaciones y al número de camas disponibles. Al comparar esta Figura con los resultados del índice de funcionalidad, se observa que los hospitales que resultan más afectados, en los cuales su funcionalidad es menor a 0.2, el número de heridos asignados es muy bajo.

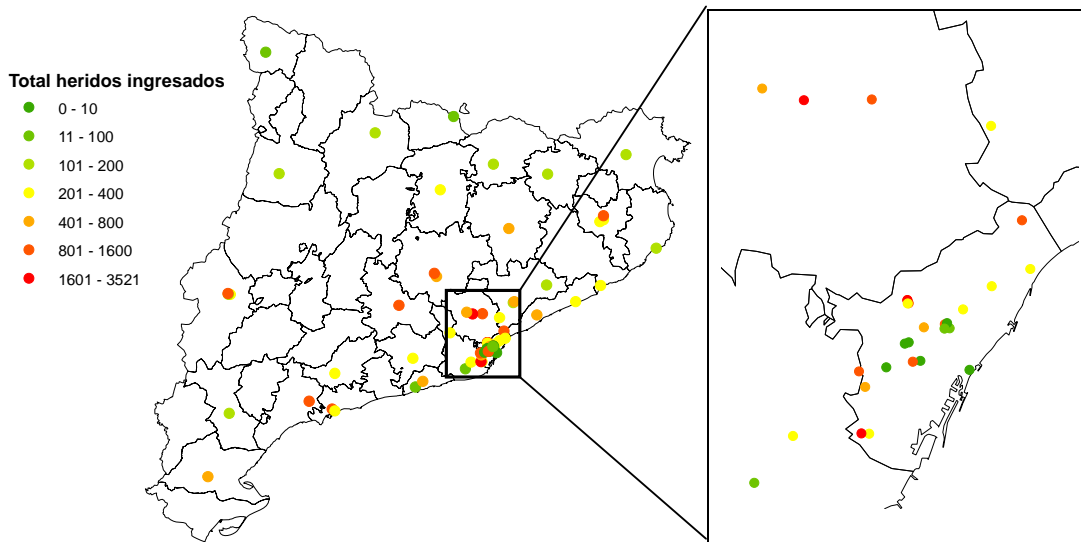
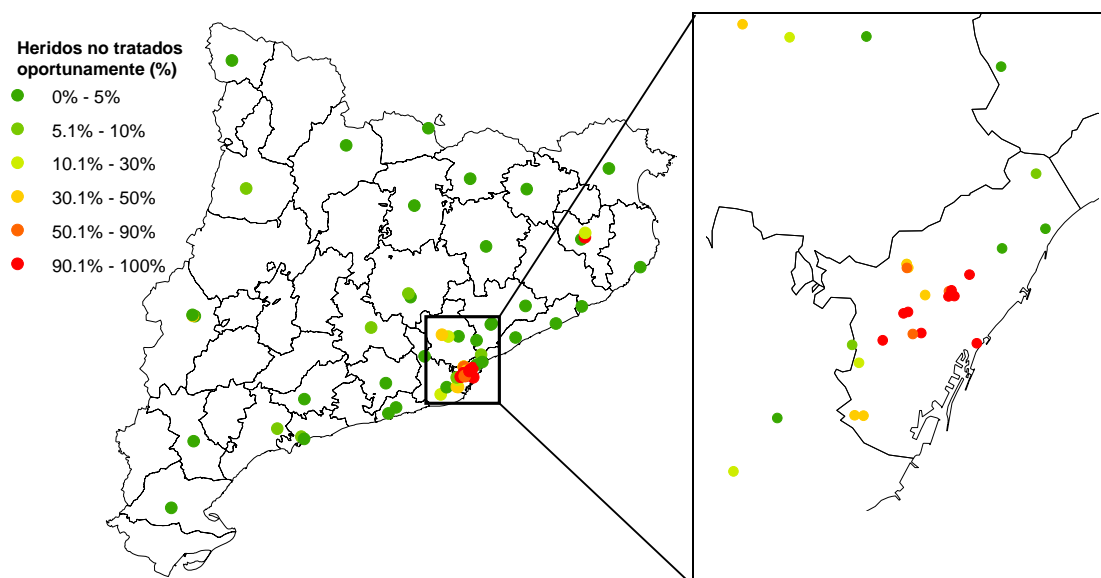


Figura 10-16 Total de heridos ingresados en los hospitales

En la Figura 10-17 se presenta un mapa de los hospitales según rangos del porcentaje de heridos no tratados oportunamente y en la Tabla 10-11 se presentan los resultados por cada instalación..



**Figura 10-17 Porcentaje de heridos no tratados oportunamente en los hospitales respecto al total de heridos ingresados**

Al comparar esta Figura con los resultados del índice de funcionalidad, se observa que aquellos hospitales con un índice de funcionalidad menor a 0.2 no pueden atender a los heridos que se dirigen a sus instalaciones, a pesar de que sea un número muy bajo. De estos valores se observa que en la respuesta de los hospitales también influye la tasa de atención de pacientes por hora  $\lambda$ . De esta manera, a pesar de que el edificio se encuentre funcional, si su tasa de atención es baja comparada con el número de heridos que ingresan, en el hospital se irán a presentar casos de heridos no tratados oportunamente. Este caso se observa en el hospital 18.

### 10.3.3 Evaluación del riesgo sísmico del sistema de hospitales públicos de Cataluña

El Índice de Vulnerabilidad de Hospitales presentado en el Anexo F y el análisis de la respuesta de sistemas sanitarios ante eventos específicos o de determinado periodo de retorno permiten tomar decisiones respecto a un estándar de seguridad. A su vez, permiten identificar las pérdidas esperadas y estimar la potencial demanda de servicios médicos durante la emergencia. Por otro lado, las evaluaciones de pérdidas (o de cualquier variable de decisión), en las que consideran que las instalaciones de salud están expuestas, a lo largo de su vida útil, a todos los posibles movimientos de suelo dada la peligrosidad sísmica de su ubicación, son útiles para desarrollar medidas de reducción de la vulnerabilidad que se ajustan a los valores de riesgo aceptable de los administradores de la infraestructura. En especial, en zonas de baja a moderada sismicidad, las evaluaciones de riesgo son relevantes para el desarrollo de análisis de beneficio-costos de medidas de mitigación (Lee et al. 2001).

Para tal fin, en esta sección se presenta una evaluación del riesgo sísmico de los hospitales públicos de Cataluña, adoptando la metodología presentada en el Capítulo 8. Las variables de decisión consideradas son el porcentaje de pacientes que no se tratan oportunamente en cada hospital y en el sistema. Para cada variable se obtiene la probabilidad anual de que se exceda un determinado rango de valores considerando un conjunto de eventos sísmicos.

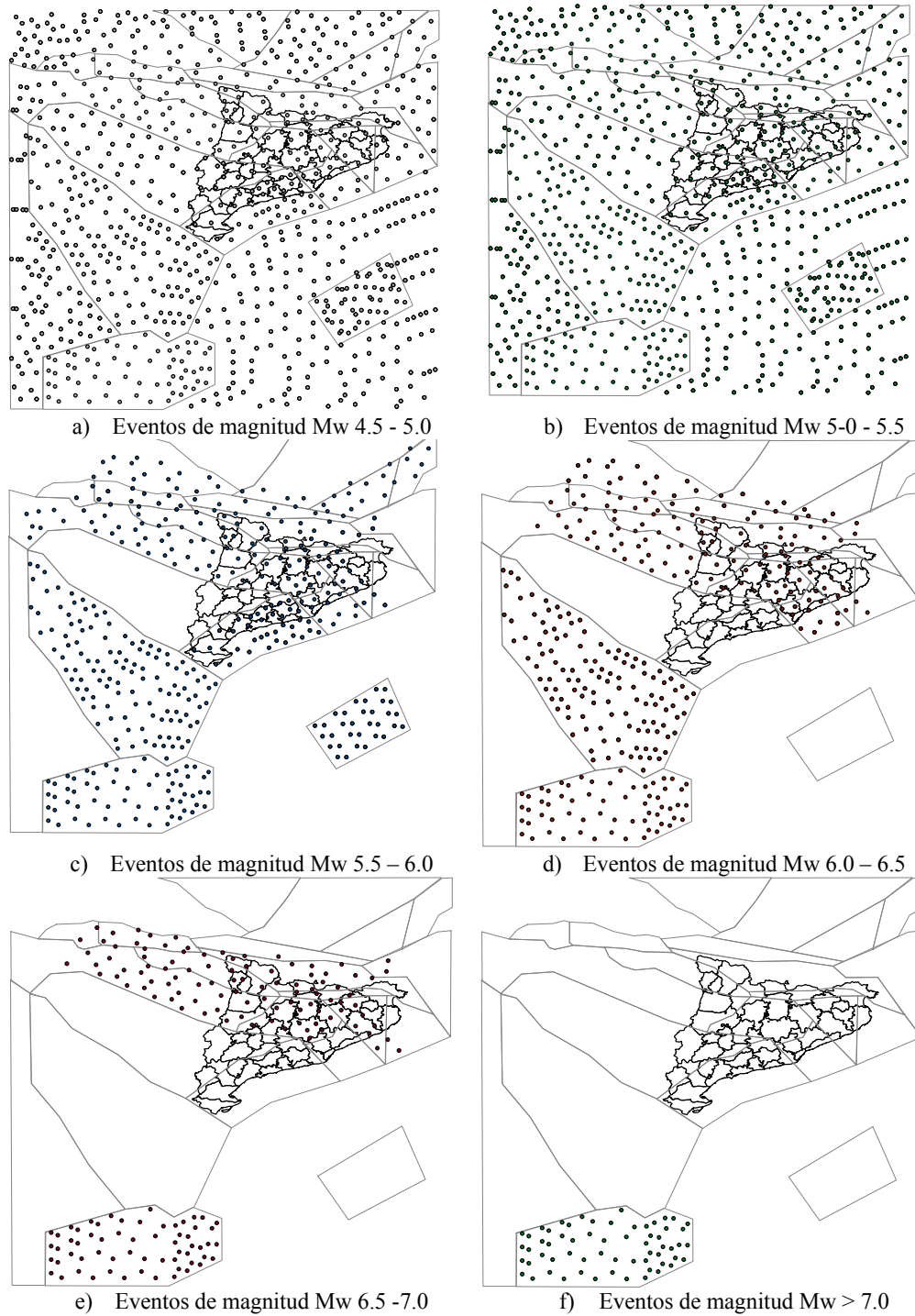
**Tabla 10–11 Resultados de la simulación del escenario según hospitales**

ID	Institución	Camas	% Ocupación	$\lambda$ (heridos /hora)	Factor de importancia	Índice de funcionalidad	Total heridos ingresados al hospital	% heridos ingresados respecto al total en el sistema	Heridos no tratados oportunamente	
									Total hospital	Porcentaje respecto a los ingresados en el hospital
1	Pius Hospital de Valls	142	0.75	3.21	1	1.00	236	0.68%	1	0.2%
2	Hospital Comarcal Móra d'Ebre	120	0.85	1.61	1	1.00	160	0.46%	3	1.8%
3	Hospital Tortosa Verge de la Cinta	237	0.95	4.7	2	1.00	464	1.33%	8	1.8%
4	H. Univ. De Tarragona Joan XXIII	342	0.77	8.36	2	1.00	1337	3.83%	88	6.6%
5	Hospital de Sant Pau i Santa Tecla	178	0.69	4.4	1	0.99	367	1.05%	3	0.8%
6	H. Universitari Sant Joan de Reus	318	0.85	6.99	2	1.00	991	2.84%	51	5.1%
7	Espitau Val d'Aran	31	0.62	1.16	1	1.00	67	0.19%	0	0.0%
8	Hospital Comarcal del Pallars	63	0.75	0.64	1	1.00	111	0.32%	9	7.8%
9	Fundació Sant Hospital	88	0.65	1.38	1	1.00	178	0.51%	7	4.0%
10	Clínica de Ponent	132	0.58	2.31	1	1.00	321	0.92%	16	4.9%
11	Hospital de Santa Maria	185	0.86	0.28	1	1.00	185	0.53%	86	46.3%
12	H. Univ. Arnau de Vilanova de Lleida	437	0.9	8.67	2	1.00	1170	3.36%	53	4.6%
13	Hospital Comarcal de Blanes	123	0.8	5.45	1	1.00	218	0.62%	0	0.0%
14	Hospital de Puigcerdà	31	0.75	1.71	1	1.00	58	0.17%	0	0.0%
15	Hospital de Palamós	151	0.88	5.64	1	1.00	141	0.40%	0	0.0%
16	Hospital Sant Jaume d'Olot	152	0.76	3.34	1	1.00	156	0.45%	0	0.0%
17	Hospital Provincial Santa Caterina	169	0.7	3.51	1	1.00	317	0.91%	4	1.3%
18	Clínica Girona, S. A	117	0.66	0.02	1	1.00	296	0.85%	281	95.0%
19	H. Univ. De Girona Dr. Josep Trueta	415	0.78	6.6	2	1.00	1557	4.46%	204	13.1%
20	Hospital de Figueres	168	0.9	7.39	1	1.00	138	0.40%	0	0.0%
21	Hospital de Campdevàrol	92	0.82	1.25	1	1.00	108	0.31%	1	1.0%
22	Hospital de Mataró	330	0.85	11.65	1	0.97	542	1.55%	0	0.0%
23	Institut Catalá d'Oncologia	126	0.85	0.82	2	0.80	347	0.99%	159	45.9%
24	Hospital Comarcal de l'Alt Penedés	144	0.8	4.65	1	1.00	205	0.59%	0	0.0%
25	Fundació Sanitària d'Igualada F.P	275	0.7	6.92	2	1.00	1209	3.47%	94	7.8%
26	H. Materno-Infantil Vall d'Hebron	466	0.85	9.13	3	0.58	1408	4.04%	471	33.4%
27	Centre Hospitalari	272	0.95	7.23	2	0.93	542	1.55%	5	1.0%

ID	Institución	Camas	% Ocupación	$\lambda$ (heridos /hora)	Factor de importancia	Índice de funcionalidad	Total heridos ingresados al hospital	% heridos ingresados respecto al total en el sistema	Heridos no tratados oportunamente	
									Total hospital	Porcentaje respecto a los ingresados en el hospital
28	Hospital de Viladecans	110	0.75	4.4	1	0.22	54	0.16%	8	14.1%
29	Hospital General de Vic	282	0.95	6.92	2	1.00	575	1.65%	5	0.8%
30	Corporació Sanitària Parc Tauli	872	0.95	20.19	2	0.90	1414	4.06%	12	0.9%
31	Hospital de Terrassa	341	0.75	9.96	2	0.90	2070	5.94%	311	15.0%
32	H. Universitari Germans Trias i Pujol	449	0.85	13.43	2	0.87	1449	4.16%	73	5.0%
33	Fundació H. Comarcal Sant Antoni Abat	111	0.8	4.25	1	1.00	63	0.18%	0	0.0%
34	Hospital Mútua de Terrassa	501	0.75	15.24	2	0.33	757	2.17%	254	33.5%
35	Hospital de l'Esperit Sant	177	0.85	7.21	1	0.74	261	0.75%	0	0.0%
36	Hospital Residència Sant Camil	328	0.75	5.37	2	1.00	736	2.11%	33	4.5%
37	Hospital de Sant Celoni	100	0.8	2.99	1	0.95	106	0.30%	0	0.0%
38	Hospital de Sant Boi	119	0.75	7.16	1	0.86	230	0.66%	0	0.0%
39	Fundació Privada Hospital de Mollet	174	0.75	7.54	1	0.91	320	0.92%	0	0.0%
40	Fundació Hospital de Sant Joan de Déu (Martorel)	112	0.75	6.72	1	0.93	214	0.61%	0	0.0%
41	C. Hospitalari-Unit. Coronària Manresa	290	0.85	5.47	2	1.00	966	2.77%	77	8.0%
42	Hospital Universitari de Bellvitge Prínceps d'Espanya	958	0.9	11.76	3	0.80	3521	10.10%	1221	34.7%
43	Consorti Hospital de la Creu Roja	123	0.75	6.83	2	0.42	462	1.32%	125	27.0%
44	Policlínica del Vallés, S.A	115	0.85	3.41	1	0.98	192	0.55%	0	0.0%
45	Hospital General de Granollers	296	0.95	9.78	2	0.72	665	1.91%	27	4.0%
46	Hospital de Sant Joan de Déu (Llobregat)	369	0.9	12.54	3	0.69	1176	3.37%	108	9.2%
47	Hospital de Sant Jaume	233	0.85	6.63	1	1.00	275	0.79%	0	0.0%
48	Hospital de Sant Bernabé	150	0.75	2.79	1	1.00	277	0.79%	5	1.8%
49	H. de Trauma-Rehabilit. Vall d'Hebron	355	0.9	9.13	3	0.58	952	2.73%	193	20.3%
50	Hospital General Vall d'Hebron	1393	0.9	9.13	3	0.58	2044	5.86%	937	45.8%
51	Institut Guttmann	152	0.8	0.08	2	0.67	243	0.70%	218	90.0%
52	Hospital Casa de Maternitat	130	0.9	1.01	1	0.00	0	0.00%	0	99.4%
53	Hospital Sant Rafael	200	0.62	0.79	1	0.57	300	0.86%	186	62.2%
54	Fundació Puigvert, I.U.N.A	170	0.6	2.34	3	0.63	888	2.55%	507	57.1%
55	Hospital de l'Esperança	161	0.65	2.48	2	0.61	531	1.52%	219	41.3%

ID	Institución	Camas	% Ocupación	$\lambda$ (heridos /hora)	Factor de importancia	Índice de funcionalidad	Total heridos ingresados al hospital	% heridos ingresados respecto al total en el sistema	Heridos no tratados oportunamente	
									Total hospital	Porcentaje respecto a los ingresados en el hospital
56	Hospital Dos de Maig	229	0.65	4.07	2	0.01	13	0.04%	13	97.6%
57	Hospital Clínic Provincial Barna	774	0.85	13.81	3	0.00	5	0.02%	5	99.7%
58	Clínica Quirúrgica Adriá	40	0.65	0.22	1	0.01	2	0.01%	2	98.9%
59	Clínica Plató, Fundació Privada	164	0.95	0.62	1	0.01	3	0.01%	3	98.1%
60	Hospital del Mar	418	0.85	12.74	2	0.00	7	0.02%	7	97.6%
61	Fund. Gest. San.Hosp.Sta. Creu i St. Pau	658	0.68	15.41	3	0.00	2	0.01%	2	99.8%
62	Hospital Universitari Sagrat Cor	359	0.8	1.16	2	0.68	990	2.84%	718	72.5%
63	Hospital Central - L'Aliança	305	0.75	5.47	2	0.01	16	0.05%	16	98.0%
64	Hospital Municipal de Badalona, S.A	140	0.75	5.71	1	0.84	266	0.76%	0	0.0%

A partir del estudio de peligrosidad llevado a cabo por GEOTER (2008) se definió la geometría y los parámetros de sismicidad de las fuentes sísmicas. Usando el software CRISIS 2007 (Ordaz et al. 2007) se generaron 4920 eventos aleatorios. En la Figura 10-18 se presenta el mapa de los eventos según rangos de magnitudes y en la Tabla 10-12 se presenta el número de eventos según rangos de magnitudes  $M_w$ .



**Figura 10-18** Eventos sísmicos incluidos en el análisis según rangos de magnitud



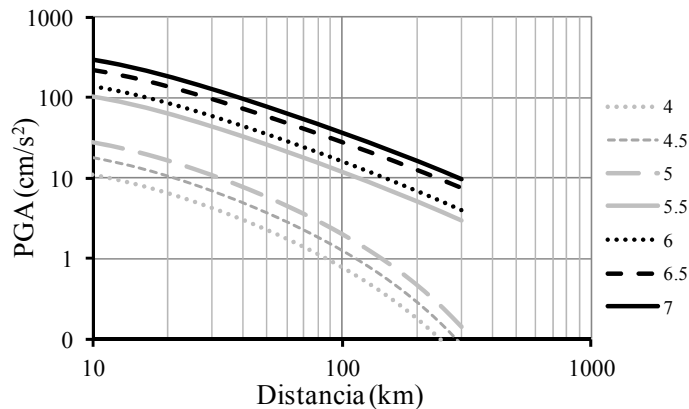
**Tabla 10–12 Número de eventos considerados según rangos de magnitud**

Rango de magnitud	Número de eventos
4.5-5.0	1898
5.0 – 5.5	1813
5.5 – 6.0	510
6.0 – 6.5	477
6.5 – 7.0	161
> 7.0	61
Total	4920

Para estimar las aceleraciones espectrales correspondientes a la ubicación de los hospitales se utilizaron las leyes de atenuación de Tapia (2004), Ambrasseys (1995) y Ambrasseys et al. (1996) bajo los siguientes supuestos:

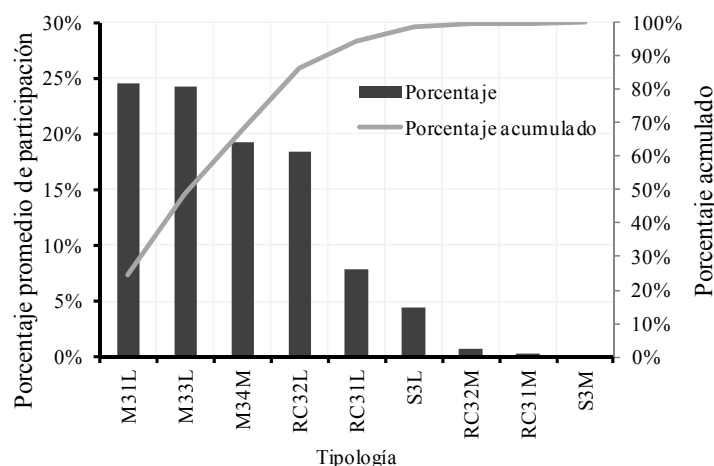
- Para terremotos de magnitud  $M_w$  menor a 5 se utilizó la ley de Tapia (2004)
- Para terremotos cuya magnitud se encuentra entre 5 y 6, se combinaron la ley Ambrasseys (1995), Ambrasseys et al. (1996) y Tapia(2004), considerando un 30% de participación para la ley de Tapia y del 70% para las restantes.
- Para terremotos cuya magnitud fuera mayor a 6, se utilizó la ley de Ambrasseys et al. (1996).

En la Figura 10-19 se presenta un ejemplo de las leyes de atenuación para periodos estructurales de cero segundos.



**Figura 10-19 Leyes de atenuación empleadas**

En cada evento, los heridos se evaluaron a nivel municipal, adoptando también el método de Coburn y Spence (1992). El área construida de los edificios en cada municipio se distribuyó en tipologías estructurales a partir de la clasificación en clases de vulnerabilidad sugeridas en el plan SISMICAT. Con el fin de agilizar el proceso de cálculo, se simplificó la descripción realizada en la sección 10.3.2 omitiendo la participación de edificios de tipologías altas para edificios de mampostería no reforzada y considerando sólo una tipología de estructuras metálicas. En la Figura 10-20 se presentan los porcentajes promedios de las tipologías estructurales en la zona de análisis.



**Figura 10-20 Porcentaje promedio de participación de las tipologías estructurales en los municipios de Cataluña**

En total se consideraron 955 municipios y 9 tipologías estructurales. En el caso de los hospitales, se empleó la clasificación en tipologías estructurales de la sección 7.2.2. El índice de funcionalidad de las instalaciones se calculó a través de las estimaciones de pérdidas obtenidas con las curvas de daño desarrolladas.

Para cada evento, se estimaron para cada hospital el número de pacientes ingresados, no tratados oportunamente y en espera, siguiendo la metodología propuesta. El parámetro seleccionado para evaluar la respuesta de los hospitales y de la red ha sido el porcentaje de pacientes no tratados oportunamente respecto al total que ingresa al hospital (o a la red). Si a esta variable se le denomina  $x$ , se debe resaltar que no se conocen funciones de distribución que permitan evaluar la probabilidad de excedencia de un determinado valor  $X$  (tanto en los hospitales y en la red) dado que ocurre un evento  $i$ ,  $P(x > X | i)$ . Para esto, es posible generar valores aleatorios para los parámetros que influyen en el cálculo del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en cada hospital y a partir de estos resultados identificar la función de distribución que mejor se ajuste. No obstante, este trabajo se consideró fuera del alcance de este estudio.

De esta manera, el porcentaje de heridos no tratados oportunamente  $x$  se consideró como una variable determinista; dado un escenario de daños, a través los procedimientos descritos se obtiene un único valor de  $x$ . De acuerdo con Safina (2003), si la evaluación de los daños es determinista, dichos daños estarán asociados a la misma frecuencia media anual de los eventos sísmicos  $n_i$  que los producen. De este modo, tanto para el sistema de hospitales como para cada instalación, es posible acumular la frecuencia media anual de sismos en los cuales  $x$  excede un determinado valor  $X$ . Al realizar este ejercicio sobre el conjunto de eventos, se obtiene la frecuencia media anual de excedencia  $N$  de un determinado valor  $X$ :

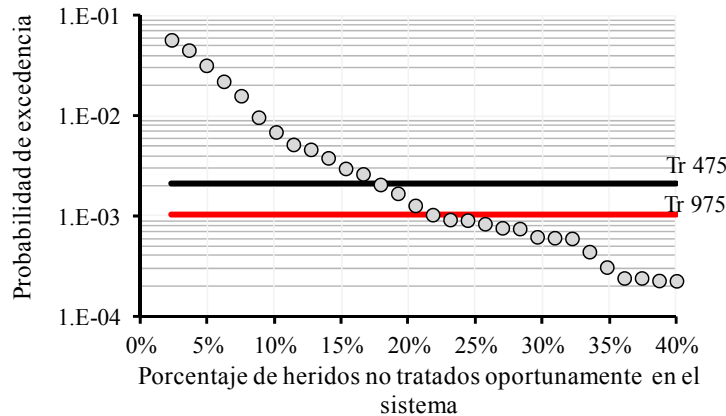
$$N = \sum_{i=1}^{\text{eventos}} (n_i | x > X) \quad [10-14]$$

Al suponer que los eventos siguen una distribución de tipo Poisson, la probabilidad de excedencia (anual) del porcentaje de pacientes no tratados oportunamente  $x$  se puede calcular de la siguiente manera

$$P(x \geq X | t) = 1 - e^{-Nt} \quad [10-15]$$

Donde  $N$  es la frecuencia media anual de excedencia y al buscarse la probabilidad anual,  $t$  se supone igual a 1.

De acuerdo a estas hipótesis y siguiendo el procedimiento presentado en la Figura 10-1, se estimaron las probabilidades de excedencia del porcentaje de heridos no tratados en el sistema. Estos resultados se presentan en la Figura 10-21.



**Figura 10-21 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el sistema**

Como referencia, se incluyeron las frecuencias correspondientes a periodos de retorno de 475 y 975 años para la evaluación de los valores de pérdidas aceptables. De la Figura 10-21 se observa que para periodos de retorno de 475 años, el número máximo probable de heridos no tratados oportunamente es cercano al 17%. Para periodos de retorno de 975 años, este porcentaje es cercano al 22%.

De la Figura 10-22 a la Figura 10-28 se presentan los resultados de la probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados en cada hospital. El comportamiento de los hospitales se clasificó de acuerdo al porcentaje de pacientes no tratados considerando como referencia los valores obtenidos para periodos de retorno de 475 y 975 años:

Nivel de comportamiento crítico:	el porcentaje de heridos no tratados es mayor al 20% para periodos de retorno de 475 años o de 50% para periodos de retorno de 975 años
Nivel de comportamiento intermedio:	el porcentaje de heridos no tratados es menor al 20% para periodos de retorno de 475 años o menor al 50% para periodos de retorno de 975 años
Nivel de comportamiento aceptable:	el porcentaje de heridos no tratados es cercano a 0% para periodos de retorno de 475 años

Estos porcentajes se han supuesto teniendo en cuenta los requisitos del documento FEMA 396 (2003) y la escala de daño sugerida por Elnashai y Rosseto (2004) En la Tabla 10-13 se presenta la clasificación de los hospitales según niveles de comportamiento. Se observa que cerca del 58% (37 de 64) de los hospitales tienen un comportamiento aceptable. Cerca del 9% (6 de 64) tienen un comportamiento intermedio y cerca del 33% (21 de 64) tienen un comportamiento crítico.

**Tabla 10-13 Clasificación de los hospitales según el porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el análisis de riesgo y para diferentes periodos de retorno**

Nivel de comportamiento	Porcentaje de hospitales	Hospitales
Aceptable	57.8%	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14,15,16,17,20,22,24,25,27,28,29,30,32,33,35,36,38,39,40,41,44,46,47,48,64
Intermedio	9.4%	19,21,31,37,43,49
Crítico	32.8%	11,18,23,26,34,42,45,50,55,51,52,53,54,56,57,58,59,60,61,62,63

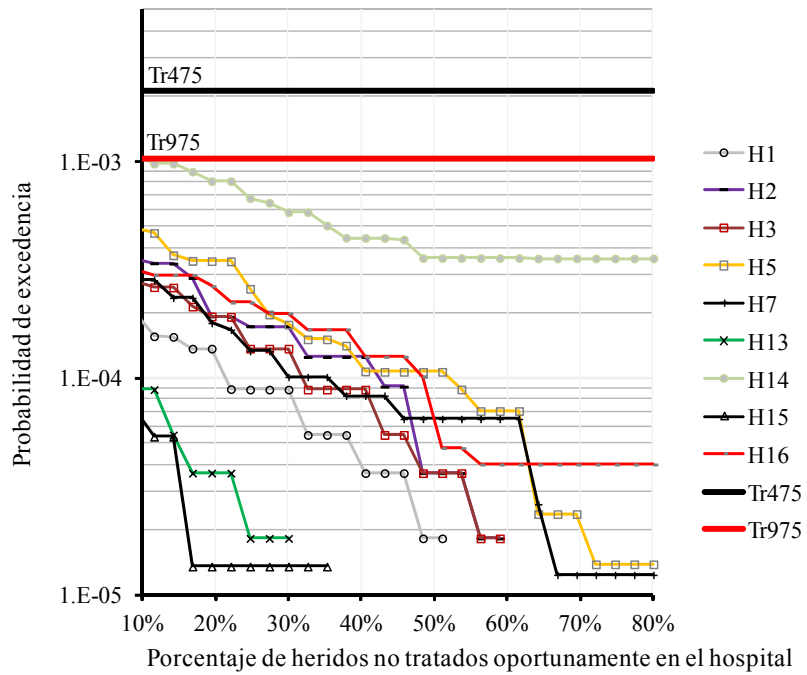


Figura 10-22 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables

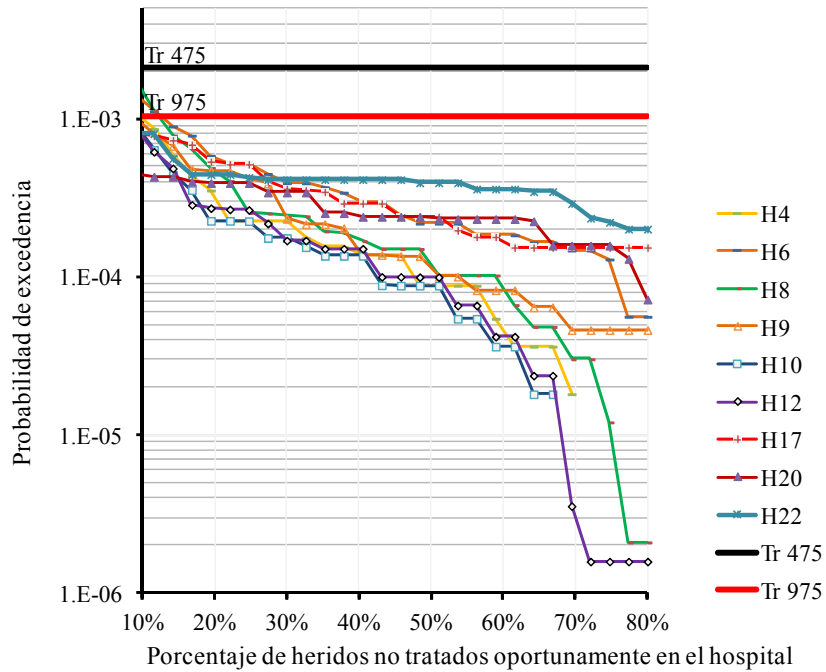


Figura 10-23 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables

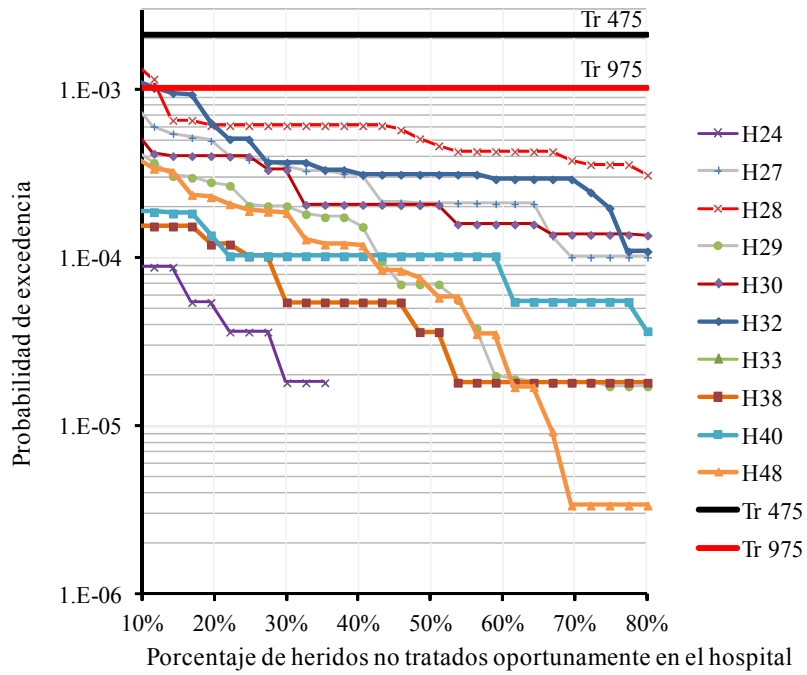


Figura 10-24 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables

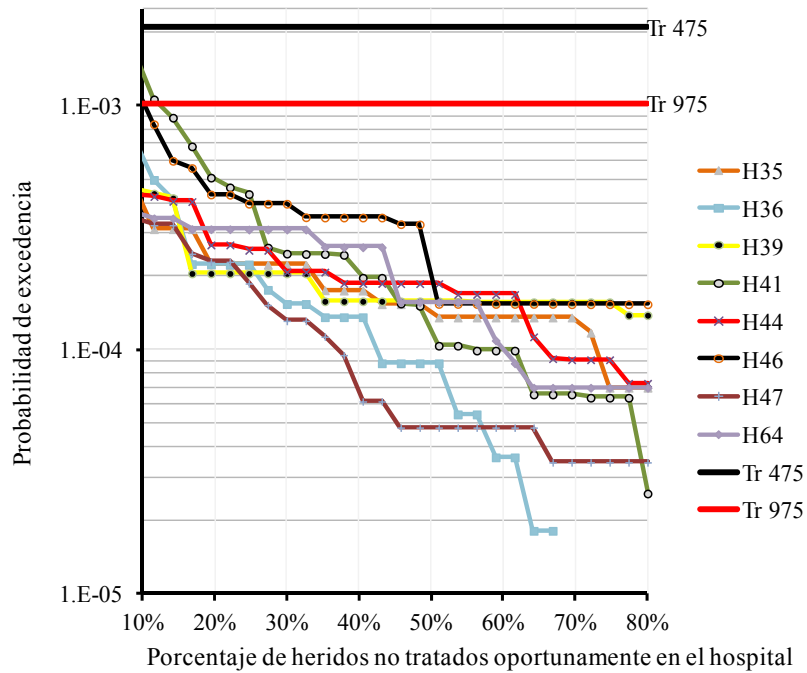


Figura 10-25 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles aceptables

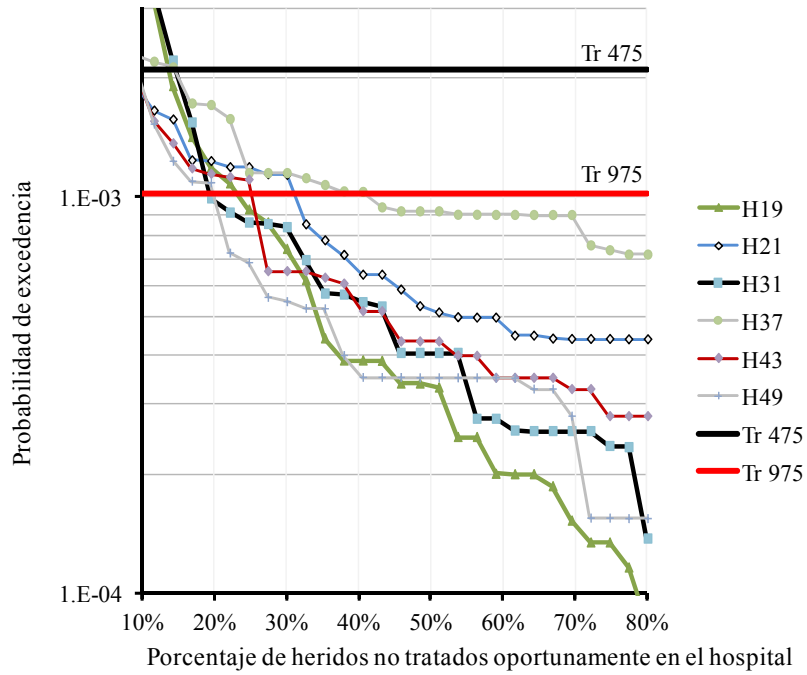


Figura 10-26 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles intermedios

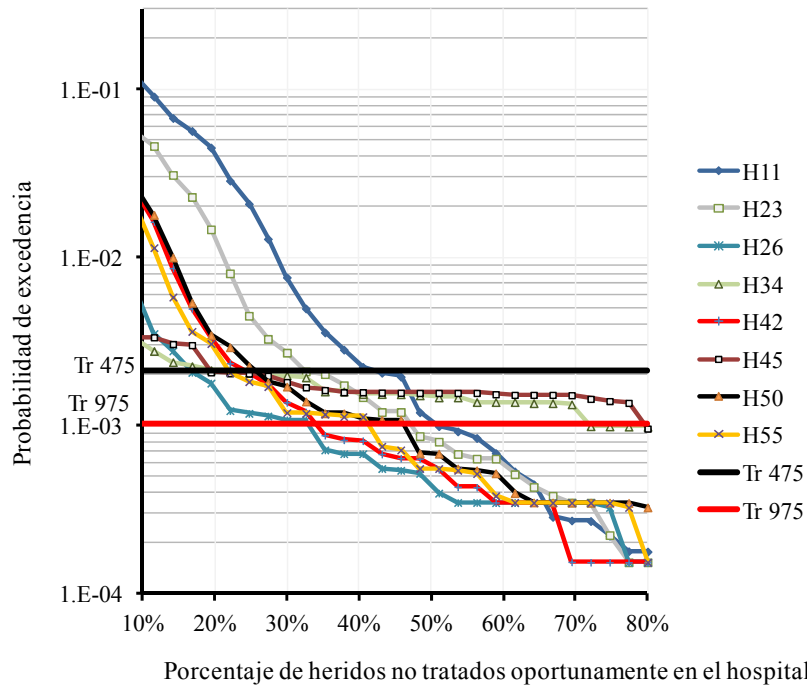
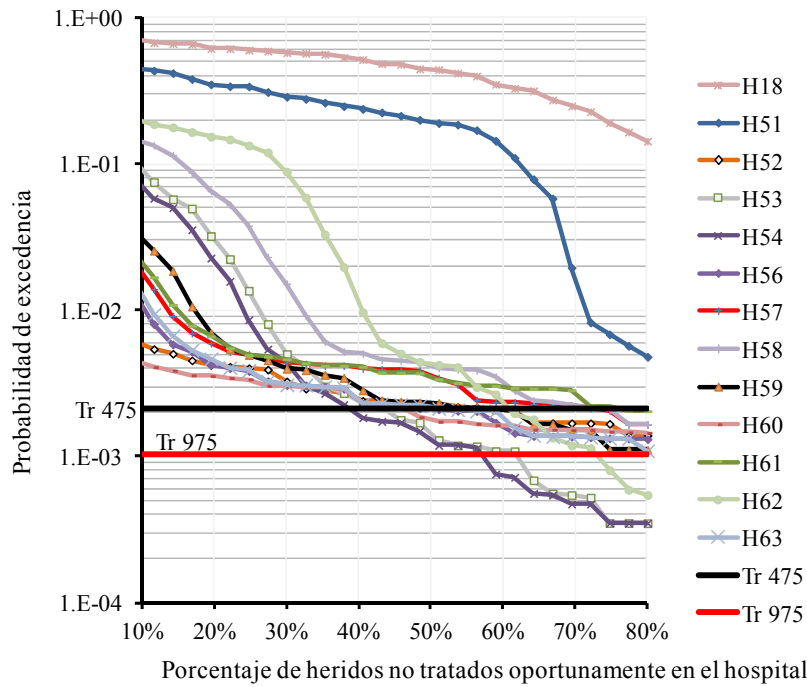
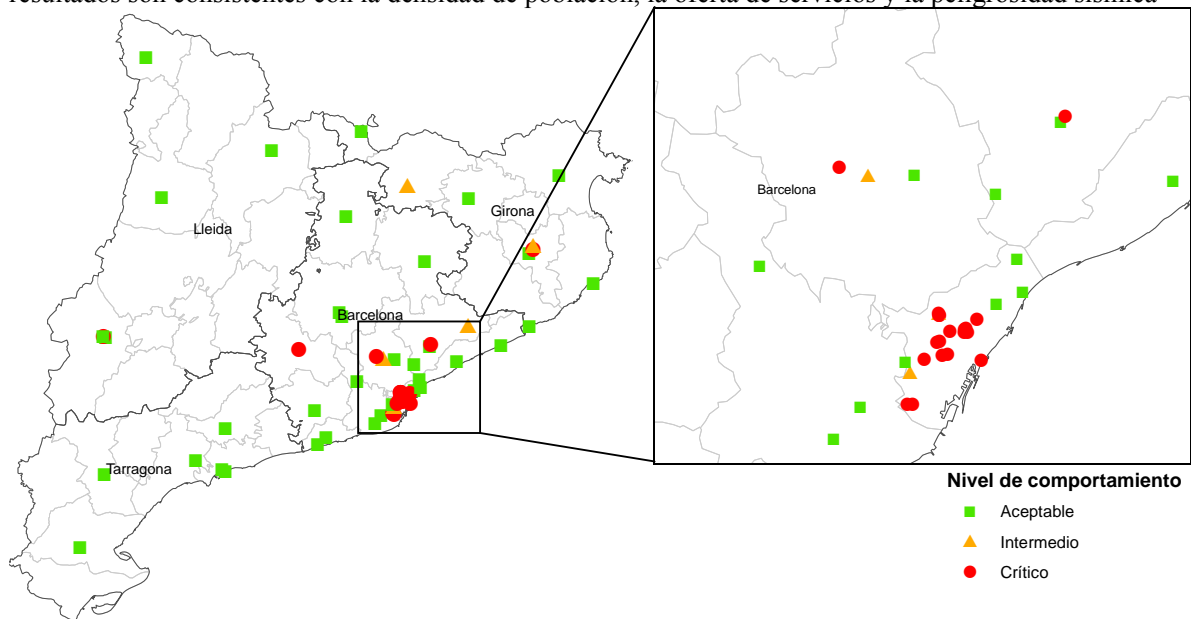


Figura 10-27 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles críticos



**Figura 10-28 Probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el hospital; hospitales con niveles críticos**

En la Figura 10-29 se presenta un mapa de las instalaciones según su calificación por niveles de comportamiento. Se observa que los hospitales con niveles intermedios y críticos se encuentran en las comarcas de Barcelona, Vallès Occidental, Vallès Oriental, Gironès, Ripollès y de Segrià. Estos resultados son consistentes con la densidad de población, la oferta de servicios y la peligrosidad sísmica



**Figura 10-29 Mapa de los hospitales según nivel de comportamiento**

## 10.4 Estimación de impactos en los servicios de salud

En el Eurocodigo 8 (EN-1998-1 2004), así como en otros códigos de diseño sísmoresistente, los edificios esenciales son considerados como aquellos cuya integridad durante terremotos es de vital importancia para la protección civil (como los hospitales); también se asigna una importancia especial a aquellos edificios cuyo colapso implique serias consecuencias sociales y económicas (como las escuelas). De esta manera, las evaluaciones de riesgo y de seguridad de los edificios esenciales deben considerar alternativas para valorar los costos sociales, económicos y funcionales asociados a las pérdidas probables.

Además de la respuesta a la emergencia, los daños en los hospitales pueden tener efectos en los servicios ordinarios de salud en la región luego del evento. De acuerdo con Auster et al. (1969), la producción de salud se considera como el resultado de los servicios médicos ofrecidos con la infraestructura y recursos hospitalarios disponibles. Para este fin, se establece una relación entre la tasa de mortalidad estandarizada, como medida de la producción de salud, las camas hospitalarias (como medida de la infraestructura empleada) y el personal disponible para la atención sanitaria. El objetivo del modelo es establecer cuál podría ser el efecto en la tasa estandarizada de mortalidad si se reducen los recursos con los que se atiende a la salud luego de un evento desastroso.

Para este fin, se adopta una función de producción  $y = F(K, L, A)$  en donde  $K$  corresponde a la infraestructura (en este caso el número de camas) y  $L$  al personal de servicios médicos.  $A$  hace referencia al progreso tecnológico que hace que la infraestructura (mejores tecnologías), o el trabajo (personal médico más capacitado), sean más eficientes a medida que pasa el tiempo. En Auster et al. (1969) se extiende este análisis incluyendo otras variables del entorno socioeconómico y del consumo de tabaco y alcohol. Por otro lado, Reyes-Santías et al. (2011) presentan una expresión para evaluar la producción considerando progresos tecnológicos. Estos autores sugieren una función de producción del tipo Cobb-Douglas, que tienen la forma:

$$y = F(K, L, A) = A(K)^\alpha (L)^\beta \quad [10-16]$$

En donde  $\alpha$  y  $\beta$  son factores que representan la variación de la producción ante cambios de  $K$  o  $L$  respectivamente. Es posible obtener estos parámetros a través de una regresión multilínea. Para esto, es necesario aplicar logaritmos y luego realizar la regresión considerando la información de la variable de producción (la tasa de mortalidad estandarizada  $y$ ) con el número de camas por cada mil habitantes  $K$ , el personal médico por cada mil habitantes  $L$ . Adoptando el trabajo de Reyes-Santías et al. (2011) se propone la siguiente expresión:

$$\ln(y) = \gamma + \alpha \ln(K) + \beta \ln(L) + \chi \ln(A) + \varepsilon \quad [10-17]$$

En donde  $\gamma$  representa el intercepto y  $\chi$  el coeficiente para el estimador del progreso tecnológico y  $\varepsilon$  corresponde al error de la regresión. Para representar el progreso tecnológico, se consideran las tasas por cada mil habitantes del uso de técnicas de diagnóstico usando equipos de Tomografía Axial computarizada (TAC), resonancia magnética, estudios hemodinámicos, angiografía digital y gammagrafía. En la Tabla 10-14 y en la Figura 10-30 se presentan los datos entre 1996 y 2005 de la tasa de mortalidad estandarizada, las camas, personal sanitario y técnicas de diagnóstico por cada mil habitantes. En la Tabla 10-15 se presentan los parámetros obtenidos en la regresión. Estos cálculos fueron llevado a cabo usando el software R versión 2.13.1.<sup>36</sup>

De los datos empleados, los valores de camas por cada mil habitantes corresponden al total de camas hospitalarias del sistema sanitario. En proporción, las camas de la XHUP corresponden a cerca del 50% del total de las camas hospitalarias en Cataluña<sup>37</sup>. Por otro lado, para complementar los vacíos de información en la serie de datos técnicas de diagnóstico entre los años 2005 y 2009, se realizaron proyecciones considerando una media móvil de 5 años.

<sup>36</sup> R version 2.13.1 (2011-07-08). Disponible en: <http://cran.r-project.org/> [Última consulta 30/10/2012].

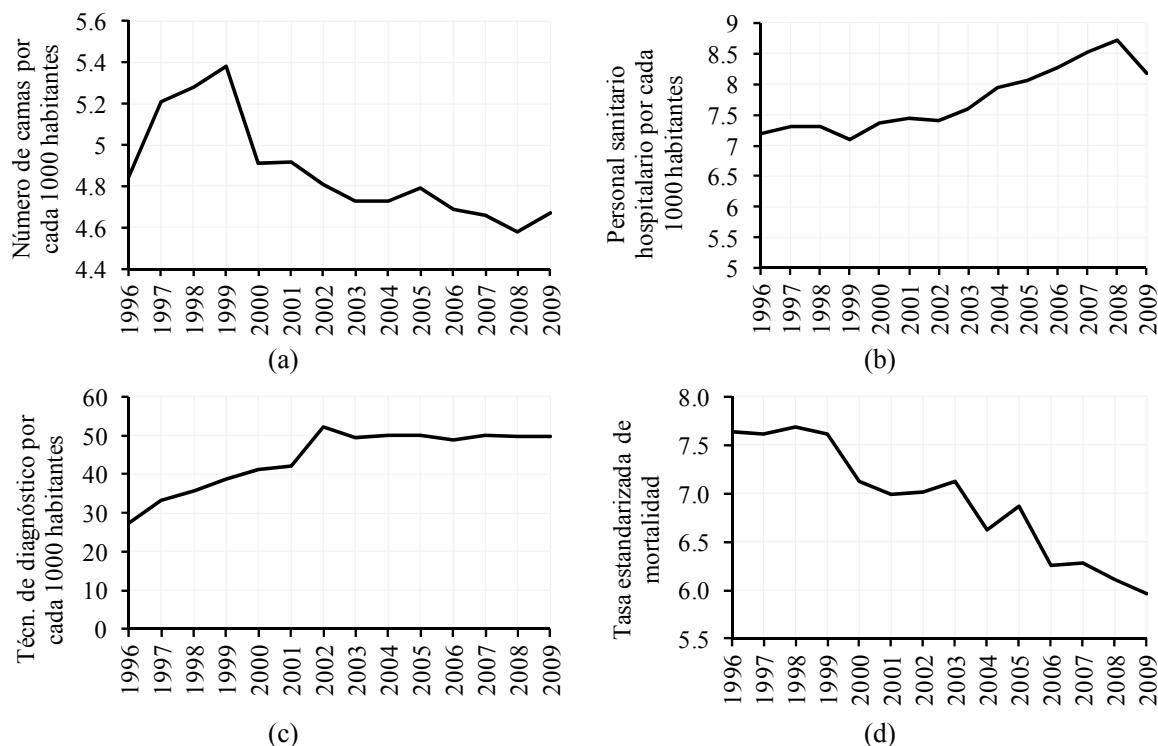
<sup>37</sup> Por ejemplo, para el año 2005, las camas hospitalarias de la XHUP se estimaron en 16027, mientras que el total de camas hospitalarias de ese año corresponde a 33269. Así en proporción las camas de la XHUP son alrededor del 48%. Ver: <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=830&t=2005&x=11&y=13> [Última consulta 30/10/2012]



**Tabla 10–14 Tasa de mortalidad estandarizada, camas y personal sanitario por cada mil habitantes**

Año	Tasa de mortalidad estandarizada	Camas por cada mil habitantes	Personal sanitario por cada mil habitantes	Técnicas de diagnóstico por cada mil habitantes
1996	7.64	4.91	7.20	27.40
1997	7.61	4.79	7.30	33.12
1998	7.69	4.75	7.30	35.56
1999	7.62	4.74	7.10	38.88
2000	7.12	4.71	7.36	41.34
2001	6.99	4.57	7.44	42.26
2002	7.01	4.61	7.40	52.06
2003	7.12	4.44	7.59	49.44
2004	6.63	4.47	7.94	49.96
2005	6.87	4.35	8.06	50.11
2006	6.26	4.69	8.27	48.77
2007	6.28	4.66	8.52	50.07
2008	6.11	4.58	8.72	49.67
2009	5.97	4.67	8.18	49.71

Fuentes: Idescat: Sanitat<sup>38</sup>,  
 Departament de Sanitat i Seguretat Social(2001; 2011)  
 INE: Estadística de indicadores hospitalarios<sup>39</sup>



**Figura 10-30 (a) Número de camas por cada mil habitantes; (b) personal sanitario por cada mil habitantes; (c) técnicas de diagnóstico; (d) tasa estandarizada de mortalidad**

<sup>38</sup> Idescat: Indicadores de sanidad, [en línea]. Disponible en: <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=16> [Última consulta 07/09/2012]

Los datos del número de camas por cada mil habitantes se encuentran en el siguiente vínculo:

<http://www.idescat.cat/territ/BasicTerr?TC=8&V3=802&V4=803&ALLINFO=TRUE&PARENT=25&V0=3&V1=0&CTX=B&VN=3&VOK=Confirmar> [Última consulta 30/10/2012]

<sup>39</sup> Instituto Nacional de Estadística – INE- Estadística de indicadores hospitalarios, [en línea]. Disponible en:

<http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=/t15/p415&file=inebase&L=0> [Última consulta 07/09/2012]

**Tabla 10–15 Parámetros de la regresión del modelo de producción de salud  $y=F(K,L,A)$**

Coefficientes	Estimador	Error estándar	P-valor
$\gamma$	5.558	0.635	0.0000
$\alpha$	-0.717	0.344	0.0641
$\beta$	-0.835	0.182	0.0010
$\chi$	-0.217	0.079	0.0207
Coeficiente de correlación ajustado		0.887	

De la Tabla 10–15 se observa que el modelo representa razonablemente los datos (el coeficiente de correlación ajustado es 0.8868). En cuanto a la significancia estadística de cada variable, se observa que para cada una el p-valor es menor que 0.1; por lo tanto, todas tienen una significancia estadística del 10%. Una vez establecida esta relación, para estimar la producción de salud luego del desastre  $y_d$  se evalúa la función de producción considerando la infraestructura disponible luego del evento  $K^*$ , siendo  $y_d=F(K^*,L,A)$  en donde:

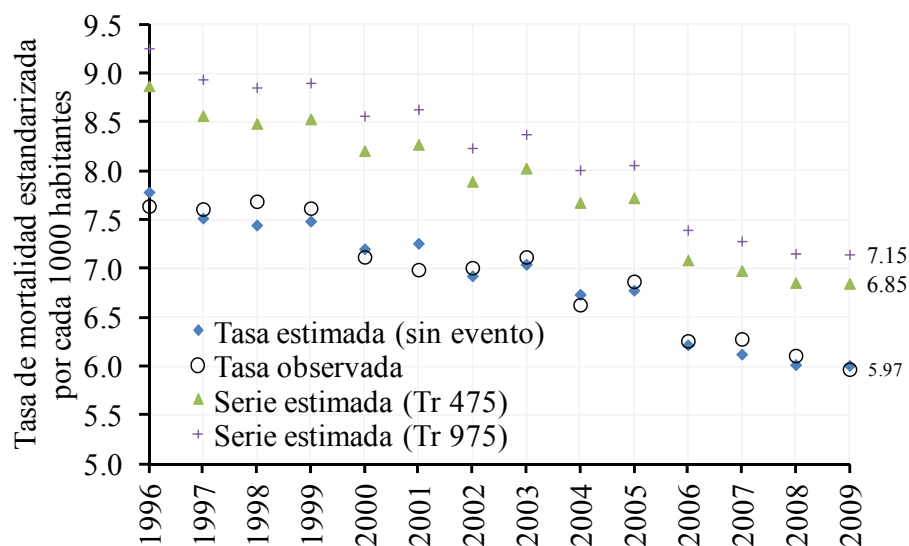
$$K^* = K_i \times (1 - ED) \tag{10-18}$$

$K_i$ , corresponde al valor de número de camas por cada mil habitantes en condiciones de normalidad. ED representa el porcentaje del total de camas perdidas. Así, la reducción en la producción  $\Delta y$  se puede evaluar a partir de la diferencia entre el estado normal y el estado post evento:

$$\Delta y = y_i - y_d = F(K_i, L, A) - F(K^*, L, A) \tag{10-19}$$

En la Figura 10-31 se presentan las estimaciones de la tasa de mortalidad estandarizada en condiciones de normalidad y las estimadas considerando los daños esperados para eventos de periodo de retorno de 475 y 975 años.

Para estimar la reducción en el número de camas de cada hospital se empleó el grado de daño medio normalizado. Del análisis, se encuentra que para eventos de periodo de retorno de 475 años, se estima que el 66% de las camas permanecen sin daño. Para periodos de retorno de 975 años, se estima que cerca del 57% de las camas permanezcan sin daño. Utilizando estos valores en la Ecuación [10-18] y en la [10-19] se obtienen las reducciones en la producción de salud.



**Figura 10-31 Tasa de mortalidad estandarizada en escenarios sin daños y con eventos de periodo de retorno (Tr) de 475 y 975 años**

De acuerdo a los datos presentados de oferta de A partir del modelo realizado, se encuentra que para el año 2009, una reducción del 1% de las camas de la XHUP representa un incremento esperado del 0.02 en la tasa estandarizada de mortalidad. Considerando las pérdidas para un periodo de retorno de 475 años, el incremento esperado en la tasa estandarizada de mortalidad es cercano a 0.88 muertos por cada mil habitantes. Para periodos de retorno de 975 años, este valor es cercano a 1.18. Estos resultados son útiles complementar los análisis de beneficio-costos de la reducción del riesgo sísmico de las instalaciones de salud, al resaltar los impactos de las pérdidas en la tasa de mortalidad estandarizada. Estos efectos no son resultados directos de los eventos; son efectos indirectos asociados a la reducción de la producción de salud. Así, se establece una conexión entre la seguridad de los hospitales y el bienestar y calidad de vida de la sociedad.

Las limitaciones de este análisis están asociadas con la especificación del modelo y a la estimación de efectos en escenarios. En este análisis se establece una relación (estadística) entre la mortalidad estandarizada, el personal sanitario, las camas hospitalarias y el desarrollo de diagnósticos empleando equipos de alta tecnología. Esta relación no implica causalidad entre la variable dependiente (la tasa de mortalidad) respecto a las restantes. Otros modelos para evaluar la salud y la producción de salud en los cuales se incluyan hábitos de consumo de tabaco, drogas, alcohol, así como índices del contexto socioeconómico que afectan el acceso a la salud, también pueden especificarse.

Por otro lado, en el análisis se emplea un modelo para estimar el aumento en la tasa de mortalidad estandarizada, dada la pérdida estimada para eventos de diferentes periodos de retorno. Al respecto, Hansson (2007) señala las limitaciones asociadas a la estimación de efectos (consecuencias) que dependen de mecanismos causales muy complejos, en los cuales la incertidumbre puede ser muy alta. De esta manera, los resultados obtenidos en este análisis pueden considerarse como una alternativa de evaluación, como una estimación relativa de los efectos potenciales.

Teniendo en cuenta que los presupuestos son limitados, el gasto público en salud estará asociado al cumplimiento de las políticas y objetivos de los planes de gestión (Flessa 2007). De esta manera, la pérdida probable de la infraestructura sanitaria puede limitar el cumplimiento de metas respecto a ampliaciones en la cobertura o a la actualización de la infraestructura. De esta manera, las pérdidas esperadas representan costos de oportunidad para el desarrollo de las políticas y planes de salud.

## **10.5 Resumen y discusión**

En este Capítulo se presentan metodologías para evaluar la respuesta de un sistema de salud ante eventos sísmicos, así como los impactos sobre la producción de salud. Para evaluar la respuesta de un evento determinado, se evalúa a nivel municipal el número de heridos leves, moderados y graves empleando la metodología de Coburn y Spence (1992). A su vez, se evalúa el daño y el índice de funcionalidad de cada instalación de salud a partir de las estimaciones de las curvas de fragilidad o de vulnerabilidad correspondientes a las tipologías estructurales. Los pacientes se distribuyen entre los hospitales considerando la distancia, el número de camas disponibles luego del evento y el nivel de servicio del hospital (básico, de referencia, de alta tecnología). Los pacientes se trasladan a los hospitales en diferentes intervalos de tiempo considerando que su rescate sigue una serie exponencial.

La atención de los hospitales se expresa en términos de la tasa de pacientes que atienden por hora. Se supone que cada paciente tiene un periodo de supervivencia o de atención oportuna cuando llega al hospital y depende de su severidad. Con estos datos es posible obtener, para cada hospital y en diferentes intervalos de tiempo, el número de pacientes que ingresan, que están en espera y que no se atienden oportunamente. Este procedimiento se aplicó a los hospitales públicos de Cataluña considerando un terremoto específico de Magnitud 5.0 a 45 km de la costa de Maresme, así como un conjunto de eventos (4920 escenarios).

El análisis de escenarios específicos permite identificar el número de heridos que puede ocurrir durante una crisis sísmica y por lo tanto resulta útil para la planeación de emergencias y el desarrollo de ejercicios de simulación de los responsables de protección civil y de los servicios sanitarios.

Como complemento, el análisis de riesgo, en el cual se aplica esta metodología para un conjunto de eventos sísmicos posibles, de acuerdo a la peligrosidad sísmica de la región, es útil para cuantificar las probabilidades anuales de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el sistema y en los hospitales. Estos resultados también son útiles para identificar las instalaciones con un comportamiento crítico de acuerdo al porcentaje de pacientes no tratados oportunamente para eventos de determinado periodo de retorno (i.e 475 y 975 años). En este análisis se determinan las pérdidas potenciales en cuanto a la oferta de servicios durante la emergencia; de esta manera se complementan los análisis de beneficio-costos, al incluir otras variables de decisión diferentes a los valores de la pérdida económica directa.

Del análisis de riesgo, se encuentra que los hospitales con comportamiento crítico son aquellos ubicados en las zonas de mayor densidad de población y de mayor peligrosidad sísmica, en las cuales se espera que ocurran más heridos y que los hospitales puedan tener mayores daños. De esta manera, los hospitales ubicados en las comarcas de Barcelona, Vallés Occidental, Vallés Oriental, Gironés, Val d'Aran, Cerdanya y Ripollés y Segriá, son las instalaciones que mayor demanda de servicios pueden presentar y sobre los cuales el porcentaje de heridos no tratados oportunamente es más elevado. Para periodos de retorno de 475 años, el porcentaje de heridos no tratados en el sistema puede llegar a ser del 17% y del 22% para periodos de retorno de 975 años.

Además de las pérdidas directas y de la reducción de la funcionalidad durante la emergencia, en el análisis de seguridad y riesgo sísmico de los edificios esenciales es importante considerar los impactos de los daños en los servicios que prestan. Para este fin, se presenta una metodología para evaluar los impactos de los daños en los hospitales sobre la producción de salud. Se propone un modelo para evaluar la producción de salud, expresada en términos de la tasa estandarizada de mortalidad, en función del número de camas por cada mil habitantes. Considerando los resultados de las pérdidas en las instalaciones de salud para escenarios de periodo de retorno de 475 y 975 años, es posible evaluar cuál sería el posible aumento de la tasa estandarizada de mortalidad ante la reducción del total de camas hospitalarias. En la aplicación de esta metodología para los hospitales públicos de Cataluña, se encontró que el aumento esperado para un periodo de retorno de 475 años es de 0.84 muertos por cada mil habitantes y de 1.14 para periodos de retorno de 975 años. Estos resultados son útiles para evaluar la importancia de la seguridad de las instalaciones de salud, ya que señalan que las pérdidas por desastre pueden limitar la producción de servicios de salud, afectando la calidad de vida de la comunidad. Tales impactos en la producción de salud representan costos de oportunidad para el desarrollo de políticas y planes de gestión del sistema sanitario.

## 11 Conclusiones y trabajos futuros

### 11.1 Conclusiones generales

#### 11.1.1 Evaluación y toma de decisiones frente a la seguridad de los edificios esenciales

Las pérdidas ocasionadas por terremotos en edificios y sistemas esenciales, tales como los centros educativos e instalaciones de salud, han resaltado la importancia de la gestión de la seguridad de esta infraestructura. Este problema está asociado a preguntas como, ¿Cómo evaluar la seguridad? ¿Cuál es el nivel de seguridad apropiado? ¿Cuáles son los beneficios de la seguridad?

La seguridad se ha definido en términos del comportamiento y grado de daños esperados para eventos de diferentes periodos de retorno. Para su verificación, se han propuesto metodologías que permiten comparar la capacidad y la demanda de los edificios frente a la acción sísmica. Bajo esta referencia, varias iniciativas globales, así como programas a escalas local y nacional, han fomentado planes para la evaluación y reducción de los daños en estas instalaciones.

En cuanto al nivel de seguridad sísmica apropiado, se han definido diferentes estándares de comportamiento para eventos de diferentes probabilidades de excedencia (2%,5%,10%), considerando que los edificios tienen un periodo de exposición determinado (por ejemplo 50 años). Estos valores hacen referencia a eventos de determinado periodo de retorno (2500, 975, 475 años), para los cuales, a medida que los edificios se consideran más importantes, se exigen menos daños probables con el fin de reducir las pérdidas económicas, la pérdida de funcionalidad y la afectación de sus ocupantes. Si bien estos niveles de amenaza han sido sugeridos y adoptados por grupos de expertos, debe reconocerse que los edificios están expuestos a todos los posibles movimientos del suelo, dada la peligrosidad de la zona en la que se encuentran ubicados. Por esta razón, para definir el nivel de seguridad apropiado para los edificios esenciales (y en general, para cualquier instalación) es deseable una evaluación de las pérdidas asociadas a (todos) los posibles eventos a los que se encuentran expuestos.

Por otro lado, la elección de un nivel de seguridad está asociada a la capacidad que tiene el administrador de la infraestructura para garantizarlo. La limitada capacidad técnica para identificar el peligro sísmico y la respuesta de los edificios, así como las restricciones en el presupuesto, son condiciones que hacen poco o nada factible la construcción de infraestructura cuyo riesgo sísmico sea nulo. De esta manera, la elección de un nivel de seguridad apropiado requiere de la comparación entre los beneficios y los costos de conseguir dicha seguridad, a partir de la cual se puede definir un nivel de pérdidas aceptables.

Así, respecto a los beneficios de la seguridad de los edificios esenciales, hace falta evaluar los daños con el fin de identificar las pérdidas potenciales y comunicar estos resultados, altamente sensibles, a las instituciones con responsabilidad en su gestión. La clasificación de los edificios en diferentes categorías de importancia señala el deseo de garantizar mayores niveles de seguridad a las instalaciones en las cuales las pérdidas potenciales pueden ser más elevadas. ¿Cómo se deben medir dichas pérdidas?

Identificar las pérdidas potenciales, así como los impactos de los daños en los edificios esenciales, hace visible la importancia de su seguridad. Esto permite que los riesgos se perciban y que se hagan necesarias medidas para la gestión de tales pérdidas. En zonas de alta amenaza, los programas de reducción de la vulnerabilidad son de más fácil comprensión. En la mayoría de los casos, los desastres que han experimentado estas zonas han impulsado a la comunidad hacia la evaluación de pérdidas potenciales y hacia la ejecución de políticas y estrategias de mitigación de riesgos. En zonas de sismicidad entre moderada y baja, el problema tiene menor visibilidad y por lo tanto, no suele considerarse ni prioritario ni urgente. Por otra parte, particularmente en estas zonas de peligrosidad sísmica entre moderada y baja, las incertidumbres, tanto epistémicas como observacionales, aumentan la dificultad de definir con certeza

cuáles pueden ser las pérdidas potenciales, y, en consecuencia, hacen que las decisiones deban tomarse bajo incertidumbre. Además, estas decisiones, en general, no están exentas de cierta subjetividad vinculada a estimaciones realizadas por expertos. Estas condiciones dificultan, o incluso pueden impedir la toma de decisiones respecto a la gestión de la seguridad sísmica de las instalaciones.

Para cuantificar y comunicar apropiadamente el valor de los edificios esenciales y su seguridad, los beneficios deben expresarse en términos de pérdidas económicas directas e indirectas asociadas a la reparación y/o reconstrucción de los edificios, equipo y reposición del inventario, a la pérdida de su funcionalidad en situaciones de emergencia y a los impactos en la producción de servicios luego del desastre. A su vez, es importante considerar los costos de oportunidad de la reposición del capital afectado, especialmente cuando es financiado a través de la reasignación de recursos públicos (Keipi 2002); es decir, en este contexto, el coste que comporta la no realización de la inversión, que en cierto modo, se puede estimar mediante los beneficios potenciales de la hipotética realización del gasto.

En el caso de instalaciones y edificios que albergan servicios esenciales o de especial importancia, claramente, los beneficios de la seguridad trascienden los aspectos estrictamente económicos. Mejoras en las funciones y servicios e incluso la salvación de vidas humanas son ejemplos de los beneficios de la seguridad, en general y en el caso sísmico en particular. En esta tesis se han aprovechado las ventajas del uso de indicadores que abarquen estimaciones de pérdidas tanto directas como indirectas, así como también otros aspectos de la vulnerabilidad de las instalaciones y las repercusiones de su deterioro en el contexto social y económico. Sin duda, estos indicadores ayudan a una mejor cuantificación del coste de oportunidad y pueden contribuir a generar mejores consensos sobre el establecimiento de prioridades en cuanto a la seguridad de los edificios, expresando los resultados en términos comprensibles para la comunidad, para los expertos, para técnicos, así como para los responsables de la gestión de los servicios relacionados con el sistema, instalaciones y/o infraestructuras cuya fragilidad frente a amenazas probables se analiza.

### *11.1.2 Seguridad sísmica vs riesgo sísmico*

La evaluación de la seguridad sísmica de los edificios esenciales se asocia a la verificación de estándares de comportamiento específicos para diferentes niveles de peligrosidad. Este enfoque es práctico ya que cuenta con procedimientos de evaluación y estándares consensuados por expertos. De esta manera, diferentes agentes pueden realizar una misma evaluación o adelantar procedimientos de revisión, con fines de control y aseguramiento de la calidad. No obstante, presenta limitaciones en cuanto al desconocimiento de la confiabilidad del análisis, a la subjetividad de la definición de los requisitos de seguridad, así como a la falta de comunicación de los beneficios que se obtienen al exigir mayores niveles de seguridad.

Frente a estas limitaciones de la evaluación de la seguridad, la evaluación del riesgo presenta ventajas, ya que permite identificar pérdidas para todos los eventos posibles a los cuales se encuentran eventualmente expuestos los edificios. No obstante, debe señalarse que estos resultados no son medidas objetivas del riesgo y por lo tanto no pueden compararse con tasas de fallas observadas. Dada la incertidumbre en las estimaciones de riesgo, sus resultados sólo son válidos en el contexto del modelo empleado, siendo útiles para comparar las pérdidas estimadas entre diferentes alternativas estructurales.

Así, la gestión de la seguridad de los edificios esenciales no necesariamente tiene que limitarse a la estimación de riesgos, o a la verificación de estándares de comportamiento. Estos dos enfoques no son excluyentes, sino complementarios. A través de los análisis probabilistas de pérdidas se pueden establecer medidas aproximadas del nivel de pérdidas aceptables, así como de la factibilidad de las actividades de reducción de riesgos. En este sentido, se resalta que no hace falta tener bases objetivas sobre las pérdidas esperadas para tomar decisiones en cuanto a la seguridad de los edificios esenciales. Para enfrentar el problema son necesarios modelos de pérdidas para describir los escenarios posibles, y sobre estos resultados, tomar una decisión. La confiabilidad de las acciones sólo podrá evaluarse a través de simulaciones, o a partir de experiencias post-desastre.

Por otro lado, el cumplimiento de estándares de comportamiento comprende la selección de criterios de seguridad claros, que son útiles para la definición de normas de cumplimiento. A su vez, los factores de importancia empleados para aumentar la confiabilidad de los edificios esenciales son una solución práctica ante riesgos que son difíciles de cuantificar.

De esta manera, abordar el problema de la seguridad sísmica de los edificios esenciales implica hacer frente al conocimiento incompleto tanto de la amenaza, como de la respuesta de los edificios. La aleatoriedad de la acción sísmica, al igual que la ignorancia en la modelación de la peligrosidad y de la respuesta de las estructuras, hacen que los métodos basados en probabilidades no sean suficientes. En este contexto, la precaución y la cautela son bases para la toma de decisiones “en el dominio de lo desconocido, dónde la única regla es la prudencia” (Ekeland, 1991).

## 11.2 Conclusiones de los casos de estudio

En este trabajo se han desarrollado metodologías para la evaluación de la seguridad y para la priorización de acciones orientadas a la mitigación del riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Estas metodologías se han aplicado a: 1) un conjunto de edificios de importancia especial en la Comarca de Val d’Aran (España), 2) a un conjunto de centros educativos de Cataluña, 3) a los hospitales públicos de Cataluña y, 4) a centros educativos públicos de países de América Latina. Así, por un lado, se adoptaron procedimientos para cuantificar el comportamiento sísmico de edificios. Por otro, se desarrollaron metodologías para la estimación de las pérdidas probables considerando un conjunto de eventos sísmicos acordes con la peligrosidad sísmica de la zona de análisis. Estos resultados son empleados para la evaluación de relaciones de beneficio-coste de acciones orientadas a una eventual reducción de la vulnerabilidad de las instalaciones.

### 11.2.1 Evaluación de la seguridad sísmica y de los daños esperados en edificios esenciales de Cataluña

En este trabajo se adoptó un método basado en espectros de capacidad tal como fue propuesto en el proyecto RISK UE (Milutinovic & Trendafiloski 2003) para evaluar el comportamiento de los edificios. En este procedimiento se comparan los espectros de capacidad de tipologías estructurales con los espectros de demanda correspondientes a la ubicación de los edificios. Su seguridad se calificó de acuerdo a los estándares propuestos por el Comité VISION 2000 (SEAOC 1995).

#### *Los edificios*

Se han elaborado formularios y guías para la evaluación de la vulnerabilidad estructural de los edificios. Estas herramientas fueron utilizadas en inspecciones visuales rápidas. Estos formularios fueron útiles para clasificar los edificios en tipologías estructurales, así como para recopilar información en cuanto a la ubicación, área y valor de la instalación y tipo de servicios que prestan.

Para evaluar el comportamiento y el daño esperado en los edificios, a cada tipología estructural se asignó un espectro de capacidad y curvas de fragilidad para los estados de daño, leve, moderado, extensivo y completo.

#### *La acción sísmica*

La decisión sobre la cuantificación de las acciones sísmicas probables se basa en un estudio nuevo y específico para Cataluña, realizado por encargo del Instituto Geológico de Cataluña (GEOTER 2008). En este sentido, se consideró oportuno usar las formas espectrales previstas en el Eurocódigo EC 8 ajustadas a los resultados del estudio de GEOTER (2008). Así, se compararon los espectros de amenaza uniforme obtenidos para Cataluña con las formas espectrales del EC 8, concluyendo que las características de la sismicidad de Cataluña corresponden a las formas espectrales de tipo II, que efectivamente corresponden a terremotos moderados (de magnitud menor a 5.5). Una vez adoptadas estas formas espectrales analíticas, se observó que, para un periodo de retorno de 475 años, los espectros tipo II normalizados al

PGA, eran mayores que los valores medios de los espectros de amenaza uniforme, correspondiendo aproximadamente al percentil 70. A su vez, se observó que los espectros correspondientes al percentil 70 (para un periodo de retorno de 475 años) eran similares a los valores medios (percentil 50) de los espectros de amenaza uniforme de periodo de retorno de 975 años.

Bajo estas consideraciones, para definir la demanda sísmica (en roca firme), para un periodo de retorno de 475 años, se ajustaron (redujeron) los espectros del EC 8 Tipo II de forma que la meseta de aceleración constante fuera igual al valor máximo de los espectros obtenidos en el estudio de GEOTER (2008). Un procedimiento similar se empleó para definir la demanda sísmica para un periodo de retorno de 975 años. Al respecto, se señala que la reducción de las formas espectrales del EC 8 para que la meseta de aceleración constante coincida con los valores máximos de los espectros obtenidos en el PSHA, puede observarse también como una reducción del PGA. Para este caso, los PGA reducidos del evento de periodo de retorno de 975 son semejantes al PGA calculado para eventos de periodo de retorno de 475 años. De esta manera, quedaron totalmente definidas las acciones sísmicas en todo el territorio de Cataluña en términos espectrales compatibles con las del EC 8 y para periodos de retorno de 475 y 975 años, lo que ha facilitado la aplicación sistemática y masiva de los análisis de comportamiento y daño esperados.

Para considerar los efectos de suelo se emplearon espectros de respuesta, de acuerdo a los resultados de estudios de mesozonación sísmica (IGC 2011). Ya que los factores de amplificación varían desde 1.2 (para suelo tipo B') hasta 1.8 (para suelo tipo E), se consideró importante incluir el tipo de suelo para evaluar la demanda sísmica en los edificios y así desarrollar un modelo más completo para el análisis del comportamiento y del daño de los edificios.

#### *Daños, pérdidas económicas, funcionalidad y de tiempos de recuperación*

En esta tesis se han definido y adoptado tres índices importantes: 1) índice de pérdida económica, 2) índice de funcionalidad y 3) índice de recuperación.

Para estimar la pérdida económica se ha propuesto un índice en el cual la pérdida se expresa como porcentaje del valor del edificio. Para calcular dicho índice se emplean las estimaciones de la matriz de probabilidad de daño. A su vez, se definen, para cada estado de daño (leve, moderado, extensivo y completo) conjuntos difusos para expresar la pérdida económica. Dichos conjuntos se describen por funciones de pertenencia, en las cuales, las abscisas corresponden a un determinado porcentaje de pérdida y las ordenadas a la posibilidad de encontrar dicho porcentaje de pérdida en el estado de daño correspondiente. Para evaluar el índice de pérdida se siguen los siguientes pasos: 1) para cada estado de daño, se multiplican (normalizan) las ordenadas de las funciones de pertenencia por la probabilidad de daño correspondiente, de acuerdo a los resultados de la matriz de probabilidad de daños; 2) se calcula la envolvente de las funciones de pertenencia normalizadas; 3) se calcula el centroide de dicha envolvente. Este centroide corresponde al índice de pérdida y resulta útil para traducir el daño esperado en pérdidas económicas, considerando que para cada estado de daño, la pérdida económica tiene un rango de valores posibles.

En cuanto a la evaluación de la funcionalidad de las instalaciones, se propone un índice de funcionalidad que relaciona el grado de daño medio con una calificación de la funcionalidad de la instalación, siendo 1, funcional, operativo y 0, sin funcionamiento. Los valores del índice de funcionalidad se establecieron a partir de los niveles de comportamiento y daños esperados descritos en los documentos FEMA 273 (1997), FEMA 356 (2000), FEMA 395 (2003) y FEMA 396 (2003). Éste índice resulta de interés para calificar y priorizar los edificios en cuanto a su capacidad operativa durante una emergencia.

Finalmente, para evaluar el tiempo esperado de recuperación, se adoptaron los valores típicos para edificios comerciales, edificios de oficinas y edificios para servicios profesionales, técnicos y de negocios, propuestos en el documento FEMA 227 (1992). Estos valores se ajustaron de acuerdo al grado de daño medio, obteniéndose así el índice de recuperación. Éste índice resulta de interés para calificar y establecer prioridades respecto a los costos esperados por la pérdida de funcionalidad.



*Seguridad sísmica de edificios esenciales a nivel local:  
edificios de importancia especial en el Valle de Arán*

El estudio se ha basado en la inspección de 40 edificios (33 instalaciones) que albergan servicios especiales y esenciales. De los resultados de la inspección de los edificios, se encontró que el 20% son estructuras de muros de mampostería de piedra con forjados de madera; cerca del 32.5% de muros de mampostería no reforzada, 27.5% de edificios de hormigón armado y 17.5% de edificios metálicos. Los edificios restantes (2.5%) son estructuras de madera. Aproximadamente el 76% de los edificios tienen hasta tres niveles sobre rasante; por esta razón, la mayoría se clasifica en edificios bajos. Cerca del 42% de los edificios, en especial escuelas de educación primaria y ayuntamientos, fueron construidos antes de 1962 sin requerimientos sismoresistentes. Alrededor del 37% se construyeron entre 1962 y 2002. Un 11% se ha construido a partir del año 2002. Si bien los edificios en su mayoría han tenido modificaciones durante su vida útil, estas no se han desarrollado para reducir su vulnerabilidad sísmica, o para actualizar su seguridad de acuerdo a los requerimientos de las normativas de construcción más recientes.

En cuanto a la peligrosidad sísmica, cerca del 70% de las instalaciones se encuentran en roca firme (suelo tipo A), las cuales están expuestas a un PGA que varía entre 0.1g y 0.12g para periodos de retorno de 475 años y entre 0.11 y 0.135 para periodos de retorno de 975 años. Un 20% de los edificios se ubican en suelo tipo C y un 10% en suelo tipo E. Tales instalaciones están expuestas a un PGA's que varían entre 0.16g y 0.22 g para periodos de retorno de 475 años. Estas aceleraciones son del orden de 0.18g y 0.24 g para periodos de retorno de 975 años.

De los resultados de la evaluación de la seguridad, se encontró que para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 70% de los edificios tienen daños entre nulos y moderados y se consideran operacionales. El porcentaje restante no cumple tal requisito. Para el periodo de retorno de 975 años, se encontró que cerca del 8% de los edificios tienen daños extensivos o mayores y por lo tanto no cumplen con el requisito de seguridad de la vida. Los restantes tienen daños menores y por lo tanto cumplen tal requisito. Las instalaciones de personal y equipos de ayuda, así como los edificios de gobierno y de patrimonio histórico, son los que tienen en conjunto mayores daños esperados.

Para un periodo de retorno de 475 años, el promedio de las instalaciones tienen un índice de pérdida económica del 25% de su coste de reposición. En cuanto a su funcionalidad, se observa que cerca del 50% tienen un índice de funcionalidad menor a 0.5. Por último, cerca del 60% de las instalaciones tienen un periodo de recuperación entre 0 y 150 días. Cerca del 35% tienen un periodo de recuperación entre 150 y 200 días. Alrededor del 5% tienen un periodo de recuperación mayor a 200 días, indicando un impacto no despreciable del sismo con un periodo de retorno de 475 años.

Los resultados de este análisis son útiles para identificar los sectores, así como los edificios que presentan mayores daños, y priorizarlos según sus pérdidas económicas, índice de funcionalidad y tiempo de recuperación, con el fin de adelantar preparativos para la atención de emergencia, así como considerar y priorizar evaluaciones detalladas de la vulnerabilidad y posibles intervenciones estructurales.

*Análisis de seguridad sísmica de edificios esenciales a nivel regional:  
conjunto de centros educativos de Cataluña*

En este caso de estudio se seleccionaron un conjunto de centros educativos de Cataluña, con el fin de identificar sus propiedades estructurales y realizar una evaluación de su seguridad sísmica. La selección de estos centros se realizó considerando aspectos relacionados con la evolución de la arquitectura escolar en la región durante el siglo XX, las técnicas constructivas empleadas, la tipología de edificios y su distribución en el territorio. El conjunto de centros educativos está compuesto por escuelas de las capitales de comarca de la Provincia de Girona, escuelas de los municipios de la Comarca de Val d'Arán y un conjunto de centros educativos construidos con sistemas industrializados.

Para clasificar los edificios en tipologías estructurales se emplearon diversas fuentes de información:

- Los edificios de la Provincia de Girona se clasificaron en tipologías estructurales a partir de la revisión de planos estructurales, memorias de cálculo, entre otros documentos. Cerca del 15% son edificios de muros de mampostería no reforzada. Alrededor del 57% de los edificios son de pilares y forjados de hormigón armado. Cerca del 13% son edificios de muros de hormigón y pórticos de hormigón prefabricado. Cerca del 14% son edificios de estructuras metálicas.
- Las escuelas de Val d'Aran fueron clasificadas de acuerdo a las observaciones realizadas en inspecciones visuales. La mayoría de estos edificios son de muros de mampostería no reforzada.
- Los edificios construidos con sistemas industrializados se clasificaron en tipologías a partir de las descripciones realizadas por Pons (2009). La mayoría se componen de pórticos de hormigón prefabricado (46%), cerca del 11% son de muros de hormigón prefabricado, el 43% son de pórticos metálicos resistentes a momento.

En general, los centros educativos son estructuras de hasta 3 plantas sobre rasante, razón por la cual la mayoría de los edificios se clasifican como estructuras de baja altura.

En cuanto a la peligrosidad sísmica, cerca del 19% se encuentra en roca firme (suelo tipo A), Un 17% en suelo tipo B y un 43% en suelo tipo B'. Alrededor del 15% se encuentra ubicado en suelo Tipo E. menos del 10% están ubicados en suelos C y D. Al considerar los tipos de suelo, para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 30% están expuestos a PGA's menores que 0.08g. Alrededor del 55% están expuestos a PGA's entre 0.08 y 0.12g. Un 10% de los edificios están expuestos a PGA's entre 0.12g y 0.14g. Un porcentaje cercano al 5% se encuentra expuesto a PGA's entre 0.14g y 0.2g. Para periodos de retorno de 975 años, cerca del 35% están expuestos a PGA's menores a 0.1 g. Cerca del 50% de los edificios están expuestos a PGA's entre 0.1g y 0.14g. Alrededor del 10% de los edificios están expuestos a PGA's entre 0.14g y 0.16g. Un porcentaje cercano al 5% están expuestos a PGA's entre 0.16g y 0.22g.

De los resultados de la evaluación de la seguridad, todos los centros educativos cumplen con el requisito de seguridad de la vida para un periodo de retorno de 975 años. Para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 80% de los edificios tienen daños entre nulos y leves; alrededor del 10% tienen daños entre leves y moderados. Muy pocos (menos del 5%) tienen daños mayores al estado moderado. Éstos últimos no cumplen con el nivel de comportamiento operacional.

Los mayores daños se encuentran en los edificios educativos de Val d'Aran y de Girona, de acuerdo a la peligrosidad sísmica y a la fragilidad de las instalaciones. En Girona, cerca del 60% de las instalaciones tendrían daños entre nulos y leves. Cerca del 35% tendrían daños que varían entre leves y moderados. El 5% de los edificios tendrían daños al estado moderado y no cumplirían con el requisito de nivel operacional. Los centros industrializados en su mayoría se encuentran ubicados en la Provincia de Barcelona. La mayoría (más del 80%) de estos centros tendrían daños entre nulos y leves.

Como complemento al análisis de seguridad, se estimaron las pérdidas económicas. El valor promedio de pérdida de los centros de Girona se encuentra entre el 15% y el 20% de su valor de reposición; es inferior al 5% para los edificios industrializados y cercano al 25% para los edificios de Val d'Aran.

A pesar del alcance del análisis, se debe recalcar que las pérdidas potenciales de las escuelas pueden representar costos de oportunidad considerables para el sector educativo. En este sentido, se considera necesario discutir los estándares de seguridad establecidos para estas instalaciones en la Norma de Construcción Sismoresistente Española NCSE-02. Así mismo, se sugiere incluir en la planificación de la construcción de la infraestructura educativa y en las guías de construcción de nuevos centros educativos, tanto la seguridad de los alumnos, así como los valores esperados de las pérdidas frente al peligro sísmico. De información facilitada por personal del Departament d'Ensenyament, consta que el problema de la seguridad de los estudiantes es una preocupación y una prioridad importante del Departament, no así el tema de la amenaza sísmica sobre la que hasta la fecha disponían de menos información.

*Análisis de seguridad sísmica de edificios esenciales a nivel regional:  
conjunto de hospitales de Cataluña*

En este trabajo se propone un Índice de Vulnerabilidad de Hospitales (IVH) en el cual se consideran aspectos estructurales, no estructurales, de capacidad de respuesta, así como el contexto social. La evaluación de la seguridad estructural se basa en el método simplificado basado en espectros de capacidad. Para la evaluación de la vulnerabilidad no estructural se adoptan los niveles de comportamiento sugeridos en FEMA 396 (2003) y se establecen clases de vulnerabilidad de acuerdo a las condiciones de anclaje y seguridad de los elementos no estructurales. Con estas referencias se ha propuesto un índice de daño no estructural para cada clase de vulnerabilidad en términos del grado de daño medio (estructural). Para la evaluación de la capacidad de respuesta se establecen criterios cualitativos para las actividades de preparación y manejo logístico de emergencias. Por último, el contexto social se evalúa considerando índices asociados con el acceso a recursos (empleo y pobreza), dependencia de grupos vulnerables (jóvenes y adultos mayores) y densidad de población. Este índice, al igual que los índices de pérdida y funcionalidad, definidos más arriba, se aplicaron a los hospitales públicos de Cataluña.

Así, en este caso de estudio se describe la organización territorial así como las propiedades arquitectónicas de 64 hospitales públicos de Cataluña. Los edificios se clasifican en tipologías estructurales a partir de la información disponible en Safina (2003) así como en la descripción de propiedades estructurales de las instalaciones de salud en Cataluña (Generalitat de Cataluña 2010, Generalitat de Cataluña 2011). Los más comunes son edificios de pilares y forjados de hormigón armado con muros de relleno irregulares de mampostería no reforzada, edificios de muros de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería y de muros de mampostería no reforzada con forjados de hormigón armado. Cerca del 50% de los edificios fueron construidos antes de 1962. Durante su vida útil, en la mayoría se han realizado múltiples reformas estructurales para habilitar los espacios, pero no para mejorar su respuesta ante terremotos.

En cuanto a la peligrosidad sísmica, menos del 20% se encuentra en roca firme (suelo tipo A), Un 15% en suelo tipo B; el 35% en suelo tipo B'. Cerca del 10% en suelo tipo C; un 20% en suelo tipo E. Una proporción baja de edificios (menor al 2%) está ubicado en suelo tipo D. Al considerar los efectos de suelo, para eventos de periodo de retorno de 475 años, cerca del 42% de los edificios están expuestos a un PGA menor que 0.08g. Alrededor del 50% de los edificios están expuestos a un PGA entre 0.08g y 0.12g. Cerca del 7% de los edificios están expuestos a un PGA entre 0.12g y 0.16. Para periodos de retorno de 975 años, cerca del 15% de los edificios están expuestos a un PGA menor que 0.08 g. Cerca del 50% están expuestos a una aceleración entre 0.08g y 0.12g. El porcentaje restante (35%) está expuesto a un PGA entre 0.14g y 0.18g.

En la evaluación de daños, para un periodo de retorno de 475 años, cerca del 16% de los hospitales tienen un daño esperado mayor al estado moderado y no cumplen el nivel operacional. Para periodos de retorno de 975 años, todos los hospitales cumplen con el requisito de seguridad de la vida. A partir de los daños estructurales estimados, así como de la descripción general de las condiciones no estructurales y de la capacidad de respuesta disponible en Safina (2003), se aplicó el Índice de Vulnerabilidad de Hospitales. Se observa que para periodos de retorno de 475 años, cerca del 47% de los hospitales tienen un IVH mayor a 0.6. Para periodos de retorno de 975 años, este porcentaje es cercano a al 62%. El valor promedio del IVH para el conjunto de instalaciones es 0.55 para periodos de retorno de 475 años y de 0.72 para periodos de retorno de 975 años. Se encuentra que los hospitales con mayor Índice de Vulnerabilidad se encuentren en la Provincia de Barcelona, en Cataluña Central y en las comarcas del norte de Cataluña.

En cuando a las pérdidas económicas, para periodos de retorno de 475 años, cerca del 76% de los hospitales tienen un índice de pérdida económica menor al 30% del coste de reposición del edificio; los restantes tienen un índice de pérdida que varía entre el 30% y 50%. Para periodos de retorno de 975 años, 52% tienen un índice de pérdida menor al 30%. Los restantes tienen un índice de pérdida que varía entre el 30% y 60%.

En cuanto a la funcionalidad de los hospitales, se estima que, para periodos de retorno de 475 años, cerca del 18% de las instalaciones tendrían un índice de funcionalidad menor a 0.3 (baja). Un 19% tendrían un

índice de funcionalidad que varía entre 0.3 y 0.5 (incipiente). Un 20% tendría un índice de funcionalidad entre 0.5 y 0.7 (apreciable). Un 16% tendría un índice entre 0.7 y 0.9 (notable). Por último, un 27% tendrían un índice de funcionalidad mayor a 0.9 (alta).

Para periodos de retorno de 975 años, un 47% de los edificios tendrían un índice menor a 0.3 (baja). Un 16% tendrían un índice entre 0.3 y 0.5 (incipiente). Un 11% tendrían un índice entre 0.5 y 0.7 (apreciable). Un 7% un índice entre 0.7 y 0.9 (notable). Por último, un 20% tendría un índice mayor a 0.9 (alta).

Dada la información y métodos empleados para la evaluación de la vulnerabilidad estructural y no estructural, el IVH es útil para definir prioridades de intervención de la vulnerabilidad de los hospitales. La estructura de este índice puede adaptarse para evaluar la vulnerabilidad de otras instalaciones de especial importancia como las estaciones de bomberos, escuelas, entre otras. En estos casos, es necesario identificar apropiadamente los indicadores usados para el análisis de la vulnerabilidad no estructural y de la capacidad de respuesta.

#### *Comentarios a las evaluaciones de seguridad*

Los resultados de los anteriores casos de estudio se consideran útiles para dimensionar las pérdidas potenciales y priorizar acciones eventuales en los edificios según sus daños. A pesar de que se obtengan resultados individuales, se señala que estos valores son válidos en el contexto del modelo. Por lo tanto, son útiles para realizar comparaciones dentro del conjunto de edificios analizados y en cualquier caso, deben analizarse desde una perspectiva probabilista. En el caso de interesar estudios individualizados se requeriría un mayor detalle de la información, modelado estructural y la intervención en el estudio de personal experto, sanitario en el caso de los hospitales.

En consecuencia, en el marco del Plan Especial de Emergencias Sísmicas en Cataluña (SISMICAT), estos resultados deben ser considerados como una evaluación preliminar, útil para asignar prioridades para el estudio detallado de la vulnerabilidad de los edificios, así como para la reducción de su vulnerabilidad. Dado el alcance de este estudio, no ha sido posible identificar modelos representativos de edificios construidos con sistemas industrializados exactamente comparables a los usados en escuelas de Cataluña, habiéndose usado curvas y modelos aproximados. Por lo tanto, se recomienda el desarrollo de análisis específicos para esta tipología de edificios, con el fin de mejorar la confiabilidad del análisis. Tampoco ha sido posible acceder a información técnica de la arquitectura y construcción de los Hospitales. En consecuencia, también en este caso se ha recurrido a modelos estructurales simplificados razonables. En consecuencia, si se quiere mejorar el análisis con estudios de mayor detalle, es imprescindible el acceso a las memorias constructivas, planos estructurales, entre otros documentos de interés para la identificación de las propiedades estructurales de los hospitales públicos de Cataluña.

#### *11.2.2 Evaluación del riesgo sísmico y del beneficio-costo de la reducción de la vulnerabilidad de edificios y sistemas esenciales*

Para la evaluación de riesgos en edificios y sistemas esenciales se adoptó un modelo de catástrofe en el cual se estiman las pérdidas de los edificios ante un conjunto de eventos potencialmente dañinos. Para este fin se ha desarrollado el siguiente procedimiento:

- Descripción de los elementos expuestos al riesgo sísmico: información sobre la ubicación, valor económico y tipología estructural de los edificios expuestos al riesgo.
- Generación de curvas de pérdida para las tipologías estructurales incluidas en el análisis. Dichas curvas relacionan el valor esperado de la pérdida y su desviación estándar, con la aceleración espectral. En este caso es importante destacar que se considera la aceleración espectral correspondiente al periodo propio de la respuesta espectral del edificio analizado y no el PGA, como en análisis previos.
- Generación de un conjunto de eventos sísmicos, descritos por su magnitud y tasa de recurrencia, de acuerdo con la sismicidad de la zona de estudio. Para cada evento se evalúan las aceleraciones espectrales correspondientes a la ubicación de las instalaciones empleando leyes de atenuación.

- Evaluación de las pérdidas en cada uno de los eventos considerados y estimación de la curva de excedencia de pérdidas y de la pérdida anual esperada.

Estos procedimientos se aplican en dos casos de estudio: (i) a escala nacional, para evaluar la factibilidad de las obras de reducción del riesgo en centros educativos en países de América Latina; (ii) a nivel regional, para evaluar la probabilidad anual de excedencia de variables que representan la capacidad de respuesta de un sistema de hospitales ante emergencias sísmicas. Esta metodología se aplicó a la red de hospitales públicos de Cataluña.

*Evaluación del beneficio-coste de la mitigación del riesgo sísmico a nacional:  
centros educativos de países de América Latina*

Los datos básicos para el estudio han sido el área construida de los centros educativos públicos y su valor económico. Estos datos se han estimado de forma aproximada a partir de información disponible respecto al número de alumnos, así como indicadores relacionados con los precios por metro cuadrado, número de alumnos por metro cuadrado, índices de inversión pública en educación e índices de progreso del sector educativo. El área construida se estimó a nivel municipal y se clasificó en diferentes tipologías estructurales de acuerdo a las técnicas de construcción más representativas. Esta clasificación se ha basado en los informes disponibles en la base de datos el proyecto World Housing Encyclopedia-WHE (EERI-IAEE 2012), ver <http://www.world-housing.net/>, o el proyecto PAGER-WHE (Jaiswal et al. 2010).

Para cada tipología estructural se generaron curvas de pérdida considerando el estado actual, así como su estado después de una hipotética intervención estructural. Usando estas curvas se calcularon, tanto los valores esperados de la pérdida para todos los eventos generados de acuerdo a los modelos de amenaza de cada país. Estos resultados se resumen en la curva de excedencia de pérdidas y en la pérdida anual esperada.

Los beneficios de la reducción del riesgo se estimaron como la diferencia entre el valor presente de la pérdida anual esperada en el estado actual y en el estado reforzado. Al comparar estos valores con los costos de reforzamiento, se obtuvo una relación de la viabilidad o no de las obras de reforzamiento. En el modelo desarrollado, es posible observar que en los casos en los cuales el área construida escolar está compuesta por una considerable proporción de tipologías estructurales de alta vulnerabilidad, las pérdidas esperadas son importantes. Por otro lado, si el reforzamiento sísmico de los edificios representa una leve reducción de las pérdidas esperadas, que no es significativa frente a los costos de reforzamiento, la rehabilitación sísmica no se considera factible desde una perspectiva financiera.

Los resultados de las evaluaciones de riesgo se compararon con indicadores del desempeño del sector educativo y con indicadores de la inversión pública en educación. Éste análisis ha permitido identificar los países de Latinoamérica que pueden tener recursos limitados para financiar proyectos de mitigación de riesgos, así como las actividades de recuperación post desastre. Además, este análisis puede considerarse como un primer criterio para identificar los países en los cuales, las pérdidas potenciales de la infraestructura escolar, representan altos costos de oportunidad y pueden afectar el cumplimiento de los logros en educación. Así, ha sido posible identificar aquellos países en los cuales las inversiones en reducción de riesgos en los centros educativos pueden ser más oportunas, necesarias y provechosas. Estos países son Perú, Costa Rica, Ecuador, Nicaragua y El Salvador.

La metodología empleada para la estimación de pérdidas se basa en modelos de la industria de seguros y se considera la más apropiada para evaluar la conveniencia del reforzamiento estructural (Grossi 2005). Dadas las limitaciones en la información, así como los supuestos empleados para seleccionar los valores de los costos de reforzamiento y las tasas de descuento, esta metodología es útil para evaluaciones preliminares y para priorizar regiones de acuerdo a su riesgo sísmico. Estos datos son relevantes para la elaboración de políticas en organizaciones internacionales interesadas en establecer prioridades entre diferentes países en un contexto nacional y supranacional, respecto a la distribución de fondos y financiación de programas enfocados a mejorar las condiciones de países con problemas de desarrollo en general y en el reforzamiento de la infraestructura educativa, en particular.

Dada la incertidumbre del análisis de pérdidas, estos resultados no deben considerarse como medidas objetivas y absolutas del riesgo y por lo tanto, estos análisis de beneficio-costos deben ser considerados de forma relativa, ya que permiten establecer comparaciones de las ventajas económicas de diferentes alternativas de diseño estructural. No obstante, las metodologías pueden ser puntos de partida para desarrollar análisis más detallados, considerando los efectos de sitio, así como información más refinada sobre la sismicidad de la zona de interés y datos relevantes para la modelización de la vulnerabilidad del inventario de edificios.

Por otro lado, la dificultad para evaluar variables de decisión que no pueden medirse en las mismas unidades, tales como las pérdidas económicas y la vida humana, hace que las decisiones sobre la reducción de riesgos deban tomarse en el contexto adecuado, considerando en todo caso aspectos de índole social y político. Por estas razones, los índices que contemplan no sólo los aspectos relacionados al daño estructural, sino los impactos indirectos y la fragilidad socioeconómica son ayudas relevantes para la toma de decisiones.

*Evaluación de la respuesta sísmica sistemas esenciales y de los impactos de los desastres: hospitales públicos de Cataluña*

En este trabajo se adaptó un modelo para evaluar la capacidad de un sistema de hospitales a eventos sísmicos. En el modelo, los heridos son asignados, en una primera ronda, mediante un procedimiento en el cual intervienen la distancia entre el hospital y las zonas en donde se estimaron los heridos, el número de camas disponibles en el hospital, la funcionalidad estimada para el hospital después del evento sísmico y el tipo de hospitales (básico, de referencia, o de alta tecnología). A su vez, se emplea una función exponencial decreciente para estimar el número de heridos que son rescatados y trasladados a los hospitales en diferentes intervalos de tiempo. De esta manera se simulan, para un determinado escenario de daños, el número de heridos ingresados, en espera y de heridos no tratados oportunamente, en diferentes intervalos de tiempo, para cada uno de los hospitales.

El parámetro básico para evaluar la respuesta de los hospitales (y de la red) es el número de heridos no tratados oportunamente. Es importante destacar que el concepto de heridos no tratados oportunamente hace referencia a aquellos heridos que no reciben atención durante un tiempo límite de tratamiento y/o de supervivencia y por lo tanto, es útil para cuantificar de alguna forma la capacidad de los hospitales. No obstante, este concepto en ningún caso se refiere al tratamiento global de los heridos ya que no se contempla, para este estudio, la reasignación de heridos de hospitales saturados ni la instalación, por ejemplo, de hospitales de campaña. Estos aspectos serían sin duda de interés para caracterizar o evaluar con mayor detalle la capacidad de respuesta global del sistema.

Este procedimiento se ha aplicado a los hospitales públicos de Cataluña. En este caso de estudio, las instalaciones de salud se clasificaron en tipologías estructurales, tal como se presentó en el análisis de seguridad y en la aplicación del Índice de Vulnerabilidad de Hospitales. En forma similar, el área construida de cada municipio se clasificó en tipologías estructurales, considerando las clases de vulnerabilidad empleadas en el plan SISMICAT (Susagna et al. 2006). Para cada tipología se elaboraron curvas que relacionan la aceleración espectral (correspondiente al periodo propio de la respuesta espectral del edificio) con el daño esperado en el edificio.

A partir de los modelos zonificados de peligrosidad sísmica desarrollados por GEOTER (2008), se generaron un conjunto de eventos descritos por su magnitud y tasa de recurrencia. Para cada evento, las aceleraciones espectrales, correspondientes a la ubicación de los edificios, se estimaron usando un conjunto de leyes de atenuación. Para cada evento y a partir de las estimaciones del daño esperado en los edificios, se estimaron a nivel municipal el número esperado de heridos, así como el índice de funcionalidad de cada hospital.

Del análisis se encuentra que los hospitales con comportamiento crítico son aquellos ubicados en las zonas de mayor densidad de población y de mayor peligrosidad sísmica, en las cuales se espera, respectivamente, que ocurran más heridos y que los hospitales puedan tener mayores daños. Para periodos

de retorno de 475 años, el porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el sistema puede llegar a ser del 17% del total de heridos ingresados y del 25% para periodos de retorno de 975 años.

Los resultados de este análisis son útiles para el desarrollo de planes de emergencia y de ejercicios de simulación, para los responsables de protección civil y de los servicios sanitarios. Las evaluaciones de la respuesta para diferentes periodos de retorno son útiles para identificar los hospitales en los cuales se espera mayor congestión de los servicios y así calificar su seguridad respecto a estándares definidos en guías de seguridad hospitalaria o en informes técnicos. Por último, el análisis de riesgo permite evaluar la probabilidad anual de excedencia del porcentaje de heridos no tratados oportunamente en el sistema y en los hospitales. Estos datos también son útiles para desarrollar análisis de beneficio-costos de la reducción del riesgo en las instalaciones de salud.

Finalmente, como complemento a los estudios de beneficio-costos de edificios y sistemas esenciales, en este trabajo se adoptó un modelo para estimar la producción de servicios en términos de la infraestructura y recursos empleados. En el caso de los hospitales, este procedimiento se aplica para evaluar los impactos en la producción de salud, dados los daños estimados en las instalaciones durante eventos sísmicos. La producción de salud se mide en términos de la tasa estandarizada de mortalidad, que representa el número anual de fallecidos por cada 1000 habitantes, normalizado de acuerdo a la población (y a su composición por grupos de edad) en un año de referencia. En este modelo, la tasa estandarizada de mortalidad se relaciona con indicadores como el número de camas, el personal médico y las técnicas de diagnóstico de pacientes empleando nuevas tecnologías. Esta metodología se ha aplicado para un conjunto de hospitales públicos de Cataluña, estimando la producción de salud tanto en condiciones normales, como en el caso en el que se presenten daños por eventos de diferentes periodos de retorno. De los resultados se encuentra que, para escenarios de periodo de retorno de 475, el incremento esperado en la tasa de mortalidad puede ser del orden de 0.88 muertos por cada mil habitantes. Dicho incremento esperado puede ser del orden de 1.14 para periodos de retorno de 975 años.

Estos resultados también son útiles para identificar los costos de oportunidad asociados a los daños por terremoto en los hospitales. Las pérdidas representan interrupciones en el logro de metas y objetivos en la gestión de los servicios hospitalarios, dado que los recursos necesarios para la reposición de los bienes afectados podrían haberse invertido en el sostenimiento de la calidad del servicio o en la consecución de mayores niveles de salud y en consecuencia, de mayores tasas de supervivencia y de esperanza de vida. Por otro lado, esta metodología permite evaluar los impactos de los desastres en el bienestar y calidad de vida de la sociedad, ya que los daños en las instalaciones sanitarias comportan necesariamente una reducción significativa de la atención médica y, en consecuencia reducir la producción de salud.

### **11.3 Trabajos futuros**

En este trabajo se adoptaron, desarrollaron y aplicaron metodologías para la evaluación de la seguridad y riesgo sísmico de edificios y sistemas esenciales. Al respecto, se han desarrollado diferentes casos de estudio en los que se evalúa el daño esperado, la pérdida económica, índices de funcionalidad y estimaciones del tiempo de recuperación, tanto de centros educativos como de hospitales, considerando eventos de periodo de retorno específico (como por ejemplo, 475 y 975 años), así como un conjunto de eventos a los cuales se encuentran potencialmente expuestos los edificios. A su vez, se han adoptado y aplicado metodologías para estimar relaciones de beneficio-costos útiles para evaluar la viabilidad de programas y acciones orientadas a la reducción del riesgo sísmico. Por otro lado, se han propuesto modelos para estimar la capacidad y respuesta sísmica de sistemas hospitalarios y de los impactos potenciales en la atención a la salud, cuyos resultados son útiles para la planificación de emergencias, así como para estimar los costos indirectos de desastres sísmicos.

Las limitaciones de este trabajo se asocian tanto a la información disponible, como a los métodos empleados. Para superarlas, se presentan a continuación recomendaciones generales, así como otras enfocadas al análisis de la seguridad y riesgo de centros educativos, de hospitales y de líneas vitales.

*Recomendaciones generales*

- *Participación de los responsables y gestores de los edificios y sistemas esenciales:* a este respecto, se señala que si bien la evaluación de los daños y pérdidas potenciales por eventos sísmicos corresponde a personas con experiencia en la materia, la gestión de dichas pérdidas corresponde a los responsables o gestores de la infraestructura. Por lo tanto, es imprescindible el diálogo y cooperación entre los analistas de riesgos con el personal de protección civil, gerentes de servicios médicos, educativos, de líneas vitales y de gobierno en general.

Así, la estimación de riesgos debe, además de ser una labor científica, corresponder a una motivación de la gestión de la infraestructura. Sólo de esta manera la evaluación de riesgos puede ser útil para la toma de decisiones. Estos dos aspectos permiten reconocer que las pérdidas estimadas han sido obtenidas con rigor científico, que son limitadas respecto al estado del conocimiento, y que a partir de sus resultados es necesario tomar decisiones tanto para la reducción de riesgos como para la planificación de recursos ante potenciales emergencias.

- *Calidad de la información sobre los elementos expuestos al riesgo:* un factor importante en la estimación de riesgos corresponde a una adecuada descripción de los elementos expuestos. En este sentido, es relevante identificar tanto la ubicación de los elementos, como su valor y sus propiedades estructurales. Esta información es útil tanto para evaluar la acción sísmica a la cual se encuentran potencialmente expuestos, así como para modelar su capacidad y respuesta sísmica.

De esta manera, para mejorar la confiabilidad del estudio, es necesario que existan canales de comunicación y de intercambio de información entre los encargados de la estimación de pérdidas y los gerentes y responsables de los servicios y sistemas esenciales. En particular, en el caso de la seguridad sísmica de edificios esenciales de Cataluña, se sugiere que para el desarrollo de futuros estudios se tenga acceso a planos estructurales, memorias de construcción, entre otras fuentes de información, tanto de los centros escolares como de los hospitales, u otros edificios de importancia especial, con el fin de modelar la vulnerabilidad de tal infraestructura.

- *Consideraciones sobre la vulnerabilidad no estructural y la organización para la respuesta a emergencias:* El comportamiento sísmico de los elementos no estructurales es importante en la funcionalidad de los edificios y sistemas esenciales. Por esta razón, es relevante que se orienten líneas de investigación para modelar la fragilidad de estos elementos así como su contribución a la funcionalidad de las instalaciones. Al respecto, se resalta la labor desarrollada por el Multidisciplinary Center of Earthquake Engineering Research (MCEER) y se sugiere que estos trabajos sean tomados como referencia para continuar el estudio de la seguridad y riesgo sísmico de edificios esenciales.

En la funcionalidad de las instalaciones, además del daño en los elementos estructurales y no estructurales, influye la capacidad del personal y de las instituciones para organizarse frente a emergencias. Por esta razón, es relevante continuar con la investigación de métodos para evaluar estos aspectos, así como promover el fortalecimiento de la capacidad de respuesta de los edificios y sistemas esenciales. En este trabajo se sugieren métodos simplificados, basados en una escala cualitativa, para evaluar la organización para la respuesta a emergencias de los hospitales. Para refinar su aplicación, hace falta discutir y mejorar la metodología en conjunto con gerentes y personal del sistema sanitario, y así proceder a su aplicación.

- *Discusión e investigación sobre los tiempos de recuperación:* En este estudio se han adoptado valores propuestos por diversos autores para estimar, de acuerdo al daño esperado de los edificios, el tiempo esperado de recuperación. Al respecto, se señala la importancia de la revisión de bases de datos, así como de informes de situaciones de emergencia, en los cuales se puedan identificar los periodos de recuperación asociados al daño de los edificios. También es relevante conocer la opinión y criterio de los responsables de los servicios esenciales, así como de técnicos de la construcción, en cuanto al periodo que puede tardar un determinado tipo de instalación en recuperarse después del daño sufrido por un evento sísmico.



*Recomendaciones respecto a la evaluación de la seguridad y riesgo sísmico de centros educativos de Cataluña*

En la Norma de Construcción Sismoresistente Española NCSE-02 (2002), los centros educativos no se consideran edificios esenciales y por lo tanto, su diseño sismoresistente tiene las mismas restricciones de seguridad que se exigen para una construcción normal. Por otro lado, en las guías para la construcción de nuevos centros educativos (Generalitat de Catalunya. Departament d'Ensenyament 2009) no se consideran los costos asociados a pérdidas por eventos desastrosos (como los sismos) durante la vida útil de la infraestructura. Por estas razones, es relevante continuar con el estudio de la seguridad y riesgo sísmico de la totalidad de los centros educativos de Cataluña. A continuación se señalan algunas alternativas para contribuir a este proyecto:

- En este estudio sobre la seguridad de los centros educativos de Cataluña se encontró que es importante el número de centros construidos con sistemas industrializados. De esta manera, resulta interesante desarrollar modelos estructurales detallados de tipologías constructivas con el fin de elaborar espectros de capacidad y curvas de fragilidad.
- Además de identificar la fragilidad en el estado actual de la infraestructura educativa en Cataluña, conviene evaluar alternativas para la reducción de la vulnerabilidad estructural y no estructural de estas instalaciones y valorar sus costos aproximados.
- En este estudio se realizó una evaluación de los daños y pérdidas en un conjunto de centros educativos. Es necesario ampliar el alcance de este análisis para dar cobertura al total de instalaciones escolares. Para este fin, es de vital importancia contar con la participación de personal responsable del Departament d'Ensenyament de Catalunya, así como de programas y fondos que apoyen y financien este tipo de estudios, cuyo objetivo principal debe ser la seguridad de los estudiantes y de la infraestructura educativa, así como la continuidad de las actividades y programas educativos, que pueden verse interrumpidos por la ocurrencia de terremotos.
- Además de la evaluación de la seguridad sísmica de la infraestructura educativa considerando diferentes periodos de retorno, es importante realizar estudios de riesgo, en los cuales se consideren todos los posibles eventos a los cuales se encuentran potencialmente expuestos los edificios. Esto permite realizar estimaciones robustas de relaciones de beneficio-costos de la reducción de la vulnerabilidad sísmica de las escuelas.
- Con el fin de cuantificar los beneficios de la seguridad sísmica de las escuelas, se sugiere adoptar una metodología para estimar los impactos de los desastres en la educación, en la cual se considere que la educación de la población es el resultado de las inversiones en personal, en la infraestructura escolar, en el uso de nuevas tecnologías, entre otros recursos, que pueden ser disminuidos, deteriorados o afectados durante terremotos.

*Recomendaciones respecto a la evaluación de la seguridad, riesgo y respuesta sísmica de hospitales de Cataluña*

- Evaluar el daño y la funcionalidad de los hospitales bajo un enfoque probabilista a través del cual sea posible identificar, para un evento sísmico determinado, la función de distribución de probabilidad de estos valores.
- Considerar en el modelo de la respuesta sísmica de la red de hospitales, la tasa heridos atendidos por hora, así como los tiempos de supervivencia como variables aleatorias, de tal manera que mediante el desarrollo de simulaciones sea posible evaluar la respuesta de los hospitales bajo un enfoque probabilista.
- Introducir procedimientos que permitan actualizar, en cada intervalo de la gestión de la emergencia, el reparto de los heridos de acuerdo a la funcionalidad, saturación y capacidad de los hospitales. A su

vez, considerar el traslado de pacientes sin atender en hospitales de menor capacidad, a hospitales de mayor capacidad, así como el funcionamiento de hospitales de campaña.

*Recomendaciones respecto a la evaluación de la respuesta sísmica de sistemas esenciales*

En este estudio no se consideran los efectos de los daños en líneas vitales, así como los daños inducidos por fallos en la infraestructura, tales como explosiones, fugas, derrames de sustancias peligrosas. Al respecto se sugiere desarrollar estudios de confiabilidad de las líneas vitales, tales como los sistemas de almacenamiento y abastecimiento de agua, gas, electricidad, en los cuales se realice, desde un enfoque sistémico y probabilista, una evaluación de los daños y de las pérdidas potenciales.

Por otro lado, resulta de interés realizar simulaciones en las cuales se evalúen los efectos de los fallos de las líneas vitales sobre edificios esenciales como los hospitales. Al respecto conviene aplicar estas metodologías a casos específicos, en hospitales ubicados en zonas de alta densidad de población y sobre los cuales se tenga acceso a información detallada, tanto del edificio, como de los elementos no estructurales y de la infraestructura de las líneas vitales.

## Bibliografía

- Achour, N. (2007) "Estimation of Malfunctioning of a Health Care Facility in Case of Earthquake" Ph.D. Thesis, Kanazawa University, Japan.
- ADRC (2003) "Details of Disaster Information. Japan: Earthquake: 2003/07/26" Asian Disaster Reduction Center . [En línea]. Disponible en: [http://www.adrc.asia/view\\_disaster\\_en.php?NationCode=392&lang=en&KEY=618](http://www.adrc.asia/view_disaster_en.php?NationCode=392&lang=en&KEY=618). [última consulta 25/09/2012].
- ADRC (2003 b) "Details of Disaster Information. China: Earthquake: 2003/02/24" [En línea]. Disponible en: [http://www.adrc.asia/view\\_disaster\\_en.php?NationCode=156&lang=en&KEY=552](http://www.adrc.asia/view_disaster_en.php?NationCode=156&lang=en&KEY=552) [Última consulta 25/09/2012].
- AGIES NR-1:2000 (2002) "Normas Estructurales de Diseño Recomendadas para Guatemala". Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica-AGIES. Calle 15-46 Zona 15. Edificio de los Colegios Profesionales. Cuarto nivel. C.P 01015, Guatemala, ciudad. Teléfono (502) 3693693
- Albala-Bertrand, J.M. (1993) "Natural disaster situations and growth: A macroeconomic model for sudden disaster impacts" *World Development*, 21(9), 1417-1434.
- Alesch, D. & Petak, W. (2004). "Seismic Retrofit of California Hospitals: Implementing Regulatory Policy in a Complex and Dynamic Context". *Natural Hazards Review*, 5(2), 89-96.
- Ambraseys, N. N. (1995) "The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 467-490.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. A. and Bommer, J. J. (1996) "Prediction of horizontal response spectra in Europe" *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*,s 25, 371-400.
- AmeriCares (2009) "Emergency Relief Expert Reports from Earthquake Affected Padang, Indonesia." 3 de octubre de 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.americares.org/newsroom/voices-from-the-field/emergency-expert-padang-indonesia-earthquake-relief.html>. [Última consulta 25/09/2012].
- Anderson, E. (1988) "Values, risks and market norms". *Philosophy & Public Affairs*, 17(1), 54-65.
- Ang, A.H.S., Lee, J.C. (2001) "Cost Optimal Design of R/C Buildings". *Reliability engineering and system safety*, 73, 233-238.
- Antara (2009) "Number of fatalities in W Sumatra quake now 1,115" [En línea]. Disponible en: <http://www.antara.co.id/en/news/1255472809/number-of-fatalities-in-w-sumatra-quake-now-1-115>. [Última consulta 25/09/2012].
- Araki, Y. (2008) "A study on transportation activities of mass casualties in earthquake disaster by multi-agent simulation". *14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Aref, A., Bruneau, M., Constantinou, M., Filiatrault, A., Lee, G.C., Reinhorn, A.M., Whittake, A.S. (2004) "Seismic Response Modification of Structural and Nonstructural Systems and Components in Acute Care Facilities". [En línea] University at Buffalo. MCEER Articles on Hospital Research. Disponible en: [http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/04-sp01/08\\_filiatrault.pdf](http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/04-sp01/08_filiatrault.pdf). [última consulta 25/09/2012].

- Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica -AGIES- (2010). “Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la República de Guatemala. AGIES NSE-10”. Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.
- Astrella, M. & Whittaker, A.S. (2004) “Changing the Paradigm for Performance-Based Seismic Design”. [En línea] University at Buffalo. MCEER Student Research Accomplishments Articles. Disponible en: <http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/04-sp06/03astrella.pdf> [última consulta 25/09/2012].
- ATC- 3-06 (1978) “Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings: a cooperative effort with the design professions, building code interests, and the research community. 555 Twin Dolphin Drive, Suite 550. Redwood City, CA 94065 Funded by: National Science Foundation. National Bureau of Standards. Washington, DC.
- ATC-13 (1985) “Earthquake damage evaluation data for California”. Applied Technology Council, Redwood City, California. USA.
- ATC-21 (1988). “Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazard: Volume 1, Handbook. Volume 2, Support Documentation”. Applied Technology Council, Redwood City, California
- ATC-40 (1996) “Seismic evaluation and retrofit of Concrete Buildings”. Vol 1. Applied Technology Council. Redwood City. California.
- ATC (2002) “Commentary on the Use of ATC-13 Earthquake damage Evaluation Data for Probable Maximum Loss Studies of California Buildings”. 201 Redwood Shores Parkway, Suite 240 Redwood City, California 94065.
- ATC 51-1 (2002) “Recommended US – Italy Collaborative Procedures for Earthquake Emergency Response Planning for Hospitals in Italy”. 555 Twin Dolphin Drive, Suite 550. Redwood City, California 94065.
- ATC 51-2 (2002) “Recommended US – Italy Collaborative guidelines for bracing and anchoring nonstructural components in Italian hospitals”. 555 Twin Dolphin Drive, Suite 550. Redwood City, California 94065.
- Augusti, G., & Ciampoli, M. (2008) “Performance-Based Design in risk assessment and reduction”. *Probabilistic Engineering Mechanics* 23(4), 496-508.
- Auster, R., Leveson, I., Sarachek, D. (1969) “The Production of Health, an Exploratory Study”. *The Journal of Human Resources*, 4 (4), 411-436.
- Autran, A., Blès, J. L., Combes, Ph., Cushing, M., Dominique, P., Durouchoux, C., Mohammadioun, B. and Terrier, M. (1998) “Probabilistic seismic hazard assessment in France”, Part 1. Seismotectonic Zonation ECEE’98, Paris
- Aven, T., & Kristensen, V. (2005) “Perspectives on risk: review and discussion of the basis for establishing a unified and holistic approach”. *Reliability Engineering and System Safety*, 90, 1-14.
- Avila-Haro, J.A., González-Drigo, J.R., Vargas, Y.F., Pujades, L.G., Barbat, A.H (2012) “Seismic performance of unreinforced masonry buildings: application to Barcelona, Spain” *15 World Conference on Earthquake Engineering 15WCEE*. 24-28 September, 2012, Lisboa, Portugal.
- Ayuntamiento de Lorca (2012) “Visor Geográfico Seismo Lorca” [En línea]. Disponible en: <http://www.lorca.es/ficheros/file/sitLorcaSeismo/index.asp>. [Última consulta 19/04/2012]

- Ayyub, B.M (2004) "From dissecting ignorance to solving algebraic problems". *Reliability Engineering & System Safety*, 85(1-3), 223-238.
- Barbat, A.H., Yépez, F. & Canas, J. A. (1996) "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones". *Earthquake Spectra*, 12(3), 371-394.
- Barbat, A.H., Pujades, L.G., Lantada, N., Moreno, R. (2006) "Performance of buildings under earthquakes in Barcelona, Spain". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, 573-593.
- Barbat, A.H., Lagomarsino, S., Pujades, L.G. (2006). Vulnerability assessment of dwelling buildings. *Assessing and Managing Earthquake Risk*. 261 - 286. Springer. Netherlands.
- Barbat, A.H., Pujades, L.G., Lantada, N., Moreno, R. (2008) "Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 851-865.
- Barbat, A.H., Carreño, M.L., Pujades, L.G, Lantada, N., Cardona, O.D., Marulanda, M.C. (2010) "Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area". *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(12): 17-38.
- Barbat, A.H., Carreño, M.L., Cardona, O.D., Marulanda, M.C. (2011) "Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas". *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 27(1), 3-27.
- Baum, S. (2010) "Value typology in Cost-Benefit Analysis". *Environmental Values* (in press). [En línea]. Disponible en: [http://sethbaum.com/ac/fc\\_Value-CBA.pdf](http://sethbaum.com/ac/fc_Value-CBA.pdf). [Última consulta 25/09/2012].
- BBC (2009) "Strong earthquakes hit Indonesia" [En línea]. Disponible en: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/7810106.stm> [Última consulta 25/09/2012].
- BBC (2010) "The challenge of rebuilding Haiti" [En línea]. Disponible en: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/8482237.stm> [Última consulta 25/09/2012].
- Benedetti, D. & Petrini, V. (1984) "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione". *L'industria delle Costruzioni*, 149, 66-74.
- Benito, M.B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, A., Marroquin, G., Molina, E., Rojas, W., Segura, J., Talavera, E. (2008) "A new evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region in the frame of the RESIS II Project" *14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Biondini, F., Toniolo, G., Tsionis, G. (2008) "Seismic design criteria for multi-storey precast structures". *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Biondini, F., Toniolo, G., Tsionis, G. (2010) "Capacity Design and Seismic Performance of multy storey precast structures". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(1), 11-28.
- Blès, J.L., Bour M., Dominique, P., Godefroy, P., Martin, C. and Terrier, M. (1998) "Zonage sismique de la France métropolitaine pour l'application des règles parasismiques aux installations classées". Documents BRGM, n°279, 56 p
- Blong, R. (2003). "A new damage index". *Natural Hazards* 30:1, 1–23

- Bommer, J., Spence, R., Erdik, M., Tabuchi, S., Aydinoglu, N., Booth, E., Del Re, D., Peterken, O (2002) "Development of an earthquake loss model for Turkish catastrophe insurance". *Journal of Seismology*, 6(3), 431–446.
- Bonett, R. (2003) "Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Breyer, S. (1993) "Breaking the vicious circle: Toward effective risk regulation". Cambridge, MA:Harvard University Press, 1993
- BRGM, EDF, IRSN (2004) "SisFrance". Computer file
- Bruneau, M., Chang, S., Eguchi, R., Lee, G., O'Rourke, T., Reinhorn, A., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W., and von Winterfeldt, D. (2003). "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities" *Earthquake Spectra*, 19(4), 733–752.
- Bruneau, M. Reinhorn, A. (2007) "Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities". *Earthquake Spectra* 23(1): 41–62.
- Brzev, S (2003) "Building performance in the Boumerdes, Algeria, earthquake of may 21, 2003". [En línea]. Disponible en: <http://www.cae.uottawa.ca/Newsletter/Newsletter%20-%202004/PDF%20Files/Svetlana.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- BSSC (2001) "NEHRP Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures" Part 1: Provisions (FEMA 368). Building Seismic Safety Council-BSSC. Program on Improved Seismic Safety Provisions. [En línea], Disponible en: <http://www.wbdg.org/ccb/DHS/ARCHIVES/fema368.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- Cagnan, Z., Demircioglu, M.B., Durukal, E., Erdik, M., Hancilar, U., Harmandar, E., Sesetyan, K., Tuzun, C., Yenidogan, C., Zulfikar, A.C. (2009) "Report: Development of ELER (Earthquake Loss Estimation Routine) Methodology: Vulnerability Relationships". NETWORK of Research Infrastructures for European Seismology. [En línea]. Disponible en: [http://www.neries-eu.org/main.php/JRA3\\_D3\\_v2.pdf?fileitem=9502731](http://www.neries-eu.org/main.php/JRA3_D3_v2.pdf?fileitem=9502731) [Última consulta 25/09/2012].
- Canal de Noticias (1 de marzo de 2010). "Angol severamente golpeado por terremoto que causó catástrofe nacional" [En línea] Disponible en: [http://www.canaldenoticias.cl/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5704&catid=5704&Itemid=53](http://www.canaldenoticias.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=5704&catid=5704&Itemid=53) [Última consulta 06/04/2010].
- Cardona, O.D. (1999) "Vulnerabilidad sísmica de hospitales: fundamentos para ingenieros y arquitectos". Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Cardona, O.D, Hurtado, J.E., Duque, G., Moreno, A., Chardon, A.C., Velásquez, L., Prieto, S.D. (2003) [En línea] "Indicadores para la medición del riesgo"- Fundamentos metodológicos IADB/IDEA Programa de Indicadores para la Gestión de Riesgos. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Disponible en: <http://idea.unalmz.edu.co> [Última consulta 10/04/2010].
- Cardona, O.D. (2005) "Indicators of Disaster Risk and Risk Management". Main technical report, Appendix 2.1-8 A few words on the exceedance rate curves and return periods. Interamerican Development Bank. [En línea]. Disponible en: <http://www.preventionweb.net/english/professional/publications/v.php?id=1082> [Última consulta 25/09/2012].

- Cardona, O.D. (2005) "Indicators of Disaster Risk and Risk Management". Main technical report, Appendix 2.1-11 Derivation on the Loss-Aggregation Rules proposed. Interamerican Development Bank. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.preventionweb.net/english/professional/publications/v.php?id=1082>  
[Last checked 25/09/2012].
- Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Reinoso, E., Yamin, L.E., Barbat, A.H. (2010) "Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment (CAPRA): International Initiative for Disaster Risk Management Effectiveness". *14th European Conference on Earthquake Engineering (14ECEE)*. 30 Ago- 3 Sept, 2010, Ohrid, Macedonia.
- Carreño, M.L., Cardona O.D., Barbat A. (2005) "Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos". Colección de Monografías Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería – CIMNE, Barcelona, España.
- Carreño, M. L., Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2007 a) "Urban seismic risk evaluation: A holistic approach". *Natural Hazards*, 40, 137-172.
- Carreño M.L, Cardona, O.D., Barbat, A.H (2007 b) "Disaster risk management performance index". *Natural Hazards* 41, 1-20.
- Carreño, M.L Cardona, O.D, Barbat, A.H (2010) "Computational tool for post-earthquake evaluation of damage in buildings". *Earthquake Spectra*, 26(1): 63–86.
- Carreño, M.L., Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2012) "New methodology for urban seismic risk assessment from a holistic perspective". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2), 547-565.
- Casanovas i Prat, j. Soler i Mata, J., Tort i Bardolet, A. (2006) "L'impuls De L'educació Durant La Segona República: L'ensenyament Públic A Osona (1931-1936)" Patronat d'Estudis Osonencs. AUSA XXII 157. 393-434 [En línea]. Disponible en:  
<http://www.raco.cat/index.php/ausa/article/viewFile/55470/64609> [Última consulta 25/09/2012].
- Casciati, F., Dusi, F., Manzoni, E. (2004) "Seismic risk mitigation for schools and hospitals: some recent italian experiences". *Proceedings of the third European Conference on Structural Control. 3ECSC*. 12-15 July 2004. Vienna University of Technologie, Vienna, Austria.
- Castellaro, S., F. Mulargia, and P. M. Rossi (2008). "VS30: proxy for seismic amplification?", *Seismological Research Letters*. 79, 540-542.
- CERF (2010) "CERF around the World » Chile 2010" [En línea]. Última actualización 19 de marzo de 2010. Disponible en:  
<http://ochaonline.un.org/CERFaroundtheWorld/Chile2010/tabid/6600/language/en-US/Default.aspx> [Última consulta 25/09/2012].
- Chandler, A.M., & Lam, N.T.K (2001) "Performance-based design in earthquake engineering: a multi-disciplinary review". *Engineering Structures*, 23(12), 1525-1543.
- Chávez, J., Goula, X., Roca, A., Mañá, A., Presmanes, J.A., A. López-Arroyo, A. (1999) "Escenarios de daños sísmicos en cataluña". *1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia 1999.
- Cimellaro, G.P., Reinhorn, A., Bruneau, M. (2006) "Quantification of Seismic Resilience". *8th National Seismic Conference*, San Francisco, April 2006.
- Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., Bruneau, M (2010) "Seismic resilience of a hospital system". *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2) 127–144.

- CIRCULAR S-10.4.1.1 mediante la cual se dan a conocer a las instituciones de seguros las bases técnicas que se deberán utilizar para el cálculo de la Pérdida Máxima Probable de los seguros de huracán y/u otros riesgos hidrometeorológicos. Secretaría de Hacienda y Crédito Público.- Comisión Nacional de Seguros y Fianzas.
- Climent, A., Rojas, W., Alvarado, G.E., Benito, B. (2008) “Proyecto Resis II. Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica”. Universidad Politécnica de Madrid. Norsar. CEPREDENAC. [En línea]. Disponible en: [http://www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/Biblioteca/Amenaza\\_CR\\_08.pdf](http://www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/Biblioteca/Amenaza_CR_08.pdf) [Última consulta 10/07/2011].
- Coburn, A. y Spence, R. (1992). “Earthquake Protection”. Jonh Wiley & Sons, Chinchester, England. 355 pp.
- Coca, C. (2006) “Risk management and sustainability in educative sector experience of Bogota, Colombia”. [En línea]. Disponible en: <http://www.preventionweb.net/english/professional/trainings-events/edu-materials/v.php?id=7673> [Última consulta 25/09/2012].
- Comité AIS-300 (1996) “Estudio general de amenaza sísmica de Colombia”. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Colombia.
- Congdon, P (2001) “The Development of Gravity Models for Hospital Patient Flows under System Change: A Bayesian Modelling Approach”. *Health Care Management Science*, 4, 289–304.
- Consorci Hospitalari de Catalunya (2009) “Pla Funcional d’ampliació i millora de l’Espitau Val d’Aran Horitzó 25 anys”. Vielha e Mijaran. Espitau 8.
- Cornell, C. A. (1968) “Engineering Seismic Risk Analysis”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583-1606.
- Cornell CA. (1994) “Risk-Based structural design”. *Proceedings of the symposium on Risk Analysis*. University of Michigan, 1994, p. 37-48.
- Cornell CA, Krawinkler H. (2000) “Progress and challenges in seismic performance assessment” [en línea]. Disponible en: <http://peer.berkeley.edu/news/2000spring/performance.html> [Última consulta 18/11/2012]
- COVENIN 1756-1 (2001) “Norma Venezolana Edificaciones sismoresistentes”. Parte 1: Requisitos. Fundación Venezolana de investigaciones sismológicas (FUNVISIS). Prolongación Calle Mara, El LLanito, Caracas, 1070-A. Venezuela.
- Crowley, H.; Colombi M.; Calvi G.M. Pinho R.; Meroni F.; Cassera A. (2008) “Application of a Prioritisation Scheme for Seismic Intervention in Schools Buildings in Italy”. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China. Paper ID 09-01-0097.
- Dasgupta P., Weale M. (1992) “On measuring the quality of life”. *World Development*, 20(1), 119-131.
- Decanini, L., De Sortis, A., Goretti, A., Langenbach, R., Mollaioli, F.; Rasulo, A. (2003) *Masonry Building Performance in the 2002 Molise Earthquake* [En línea]. Disponible en: <http://www.conservationtech.com/rl%27s%20resume&%20pub%27s/RL-publications/eq-pubs/2003-EERI%28Molise%29/Molise-MASONRY.pdf> [Última consulta 06/04/2010].
- Dell’Acqua, F., Gamba, P., Jaiswal, K. (2012) “Spatial aspects of building and population exposure data and their implications for global earthquake exposure”. *Natural Hazards* DOI: 10.1007/s11069-012-0241-2.



- Departament de Sanitat i Seguretat Social (2001) “Evolució de la mortalitat a Catalunya, 1983-1998”. Servei d’Informació i Estudis. Direcció General de Recursos Sanitaris. [En línia]. Disponible en: [http://www20.gencat.cat/docs/salut/Home/EI%20Departament/Indicadors%20de%20salut/Indicadors%20generals/Mortalitat/Estudis%20espec%20C3%ADfics/documents/evolucio\\_1983\\_1998\\_pdf.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/salut/Home/EI%20Departament/Indicadors%20de%20salut/Indicadors%20generals/Mortalitat/Estudis%20espec%20C3%ADfics/documents/evolucio_1983_1998_pdf.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- Departament de Sanitat i Seguretat Social (2011) “Anàlisi de la mortalitat a Catalunya, 2009. Avanç de resultats”. Servei d’Informació i Estudis. Direcció General de Recursos Sanitaris. [En línia]. Disponible en: [http://www20.gencat.cat/docs/salut/Home/EI%20Departament/Indicadors%20de%20salut/Indicadors%20generals/Mortalitat/documents/analismortalitat\\_2009.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/salut/Home/EI%20Departament/Indicadors%20de%20salut/Indicadors%20generals/Mortalitat/documents/analismortalitat_2009.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- Di Pasquale, G., Orsini, G., and Romeo, R. (2005) “New developments in seismic risk assessment in Italy”. *Bulletin of Earthquake Engineering* 3(1), 101–128.
- Dominique, P., Autran, A., Blès, J.L., Fitzenz, D., Samarcq, F., Terrier, M., Cushing, M., Gariel, J.C., Mohammadioun, B., Combes, Ph. and Durouchoux, C. (1998), “Probabilistic seismic hazard assessment in France, Part 2”. Probabilistic approach: seismic hazard map on the national territory (France), Seismotectonic Zonation, ECEE’98, Paris.
- Doorn, N., Hansson, S.O (2010) “Should Probabilistic Design Replace Safety Factors”. *Philosophy Technology*. Volume: 24, Issue: 2, Pages: 151-168.
- Dymiotis, C., Kappos, A.J., Chryssanthopoulos, M.K. (1999) “Seismic reliability of RC frames with uncertain drift and member capacity”. *Journal of structure engineering ASCE*, 125(9),1038-47.
- ECLAC (2003) “Handbook for Estimating the Socio-economic and Environmental Effects of Disasters”. Economic Commission for Latin America and the Caribbean [En línia]. Disponible en: <http://www.preventionweb.net/english/professional/publications/v.php?id=1099> [Última consulta 25/09/2012].
- EERI (2003) “Preliminary Observations on the October 31–November 1, 2002 Molise, Italy, Earthquake Sequence”. EERI Learning from Earthquakes. Special Earthquake Report — January 2003. [En línia]. Disponible en: [http://www.eeri.org/lfe/pdf/italy\\_molise\\_eeri\\_report.pdf](http://www.eeri.org/lfe/pdf/italy_molise_eeri_report.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- EERI (2003 b) “Preliminary Observations on the Tecoman, Colima, Mexico, Earthquake of January 21, 2003”. EERI Learning from Earthquakes. Special Earthquake Report — March 2003. [En línia]. Disponible en: [http://www.eeri.org/lfe/pdf/mexico\\_colima\\_EERI\\_preliminary.pdf](http://www.eeri.org/lfe/pdf/mexico_colima_EERI_preliminary.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- EERI (2004) “Preliminary Observations on the Bam, Iran, Earthquake of December 26, 2003” EERI Learning from Earthquakes. Special Earthquake Report — April 2004. [En línia]. Disponible en: [https://www.eeri.org/lfe/pdf/iran\\_bam\\_eeri\\_preliminary\\_report.pdf](https://www.eeri.org/lfe/pdf/iran_bam_eeri_preliminary_report.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- EERI (2004 b) “The Boumerdes, Algeria, Earthquake of May 21, 2003” EERI Learning from Earthquakes Reconnaissance Report ISBN # EERI Publication Number 2003-04. [En línia]. Disponible en: [http://www.eeri.org/site/images/lfe/pdf/algeria\\_20030521.pdf](http://www.eeri.org/site/images/lfe/pdf/algeria_20030521.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- EERI (2005) “The Northern Sumatra Earthquake of March 28, 2005”. EERI Learning from Earthquakes Special Earthquake Report — August 2005. [En línia]. Disponible en: [http://www.eeri.org/lfe/pdf/indonesia\\_sumatra\\_northern\\_report.pdf](http://www.eeri.org/lfe/pdf/indonesia_sumatra_northern_report.pdf) [Última consulta 25/09/2012].

- EERI (2006) “The Mw 6.3 Java, Indonesia, Earthquake of May 27, 2006”. EERI Learning from Earthquakes Special Earthquake Report — August 2006. [En línea]. Disponible en: [http://www.eeri.org/lfe/pdf/indonesia\\_java\\_eeri\\_prelim\\_report.pdf](http://www.eeri.org/lfe/pdf/indonesia_java_eeri_prelim_report.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- EERI (2006 b) “The Kashmir Earthquake of October 8, 2005: Impacts in Pakistan”. EERI Learning from Earthquakes Special Earthquake Report — February 2006. [En línea]. Disponible en: [http://www.eeri.org/lfe/pdf/kashmir\\_eeri\\_2nd\\_report.pdf](http://www.eeri.org/lfe/pdf/kashmir_eeri_2nd_report.pdf) [Última consulta 25/09/2010].
- EERI (2007) “The Pisco, Peru, Earthquake of August 15, 2007”. EERI Learning from Earthquakes Special Earthquake Report. October 2007. [En línea]. Disponible en: [http://www.eeri.org/lfe/pdf/peru\\_pisco\\_eeri\\_preliminary\\_reconnaissance.pdf](http://www.eeri.org/lfe/pdf/peru_pisco_eeri_preliminary_reconnaissance.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- EERI (2009) “The M7.3 Honduras Earthquake of May 28, 2009. EERI Learning from Earthquakes Special Earthquake Report — August 2009”. [En línea] Disponible en: [http://www.eeri.org/site/images/eeri\\_newsletter/2009\\_pdf/Honduras-eq-report.pdf](http://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2009_pdf/Honduras-eq-report.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- EERI-IAEE (2012) “World Housing Encyclopedia”. Earthquake Engineering Research Institute. International Association of Earthquake Engineering. [En línea]. Disponible en: <http://www.world-housing.net>. [Última consulta 25/04/2012].
- Ekeland, I (1992) Al Azar. La probabilidad, la ciencia y el mundo. ISBN 84-7432-432-7. Editorial Gedisa. Muntaner 401 entlo. 1a 08006, Barcelona, España.
- Clarín (08/09/2004) “Un sismo en Catamarca hizo temblar a la mitad del país” [En línea]. Disponible en: <http://www.clarin.com/diario/2004/09/08/sociedad/s-02615.htm> [Última consulta 25/09/12].
- Ellingwood, B.R (2001 a) “Acceptable risk bases for design of structures”. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(2), 170 – 179.
- Ellingwood, B.R (2001 b) “Earthquake risk assessment of building structures”. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(3), 251-262.
- Ellingwood, B.R (2005) “Risk-benefit-based design decisions for low-probability/high consequence earthquake events in Mid-America”. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(2), 56–70.
- Ellingwood, B.R., Kinali, K (2009) “Quantifying and communicating uncertainty in seismic risk assessment”. *Structural Safety*, 31, 179–187.
- Ellul, F.; D’Ayala, D. (2003) “The Bingol, Turkey earthquake of the 1st of may 2003”. University of Bath. Architecture and civil engineering department. [En línea]. Disponible en: <http://www.istructe.org/eefit/files/BingolFieldReport.pdf> [Última consulta 05/04/2010].
- Elms, D.G (2004) “Structural safety-issues and progress”. *Structural Safety and Reliability*, 6(2), 116 – 126.
- elPeriodico (16/05/2011) “ Los daños colaterales del terremoto” Lunes, 16 de mayo del 2011 - 09:08h. [En línea]. Disponible en: <http://www.elperiodico.com/es/noticias/sociedad/mas-6600-alumnos-vuelven-clase-lorca-1007347> [Última consulta 20/10/2012]
- Embajada de China (2003) “At Least 260 Killed in Xinjiang Earthquake -2003/02/25”- [En línea]. Disponible en: <http://mu.china-embassy.org/eng/zt/sgxwfb/t152583.htm> [Última consulta 25/04/2012].

- EN-1998-1 (2004) "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 1 General rules, seismic actions and rules for buildings". English version. 232 pp.
- Erdik, M., Fahjan, Y. (2006) "Damage scenarios and damage evaluation". *Assessing and Managing Earthquake Risk* Springer. P 213 - 237.
- ERN-AL (2009) "Evaluación de riesgo específico de Bolivia, Guatemala, Jamaica y Perú". Banco Interamericano de Desarrollo Washington, D. C. Contrato BID C0009-08. . Carrera 20, No 84-14. Bogotá, Colombia.
- ERN-AL (2010) "Nicaragua. Tomo I. Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura" . Informe técnico ERN CAPRA -T1-5. Carrera 20, No 84-14. Bogotá, Colombia.
- ERN-AL (2010) "Seismic risk assessment of schools in the Andean Region in South America and Central America". International Labor Office -ILO/ CRISIS. External collaboration contract 40062342/0. Route des Morillons 4 CH 1211 Geneva 22. Suiza. [En línea]. Disponible en: [http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/ERN-AL\\_2010.pdf](http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/ERN-AL_2010.pdf) [Última consulta 25/04/2012].
- Escobar, J.J., Molina, E., Marroquín, G., Talavera, E., Rojas, W., Climent, A., Camacho- Astigarrabia, E., Benito, B., Lindholm, C. (2008) "Proyecto Resis II. Evaluación de la amenaza sísmica en Honduras". [En línea]. Disponible en: [http://www.norsar.no/images/Marketing/Projects/RESIS/Amenaza\\_Honduras\\_ES.pdf](http://www.norsar.no/images/Marketing/Projects/RESIS/Amenaza_Honduras_ES.pdf). [Última consulta 25/04/2012].
- Estevez, R., Schubert, C. (1993) "Sismotectónica y prevención sísmica en los Andes venezolanos" *Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismoresistente*. Volúmen 1. Mérida. Venezuela 5-8 julio 1993. pp 55-65.
- Estrada, M.D., Parada, I. (2004) "Registre d'equipaments de tecnologia mèdica a Catalunya (31 d'octubre de 2004)". Agència d'Avaluació de Tecnologia i Recerca Mèdiques. Breus (BR01/2006). [En línea]. Disponible en: <http://www.gencat.cat/salut/depsan/units/aatrm/pdf/br0601ca.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- Fajfar P, Krawinkler H, (1997). *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*. Rotterdam: AA Balkema.
- Faleiro, J., Oller, S., Barbat, A.H (2008) "Plastic-damage seismic model for reinforced concrete frames". *Computers and Structures*, 86(7-8), 581-597.
- Fawcett, W., Sousa-Oliveira, C (2000) "Casualty Treatment after Earthquake Disasters: Development of a Regional Simulation Model". *Disasters*, 24(3): 271–287.
- FEMA 227 (1992) "A benefit/cost model for the seismic rehabilitation of buildings". Federal Emergency Management Agency, Vols 1, 2. VSP Associates, Sacramento, California.
- FEMA 156 (1994) "Typical costs for seismic rehabilitation of existing buildings. Second edition". Earthquake hazards reduction series 39. Federal Emergency Management Agency. Issued by FEMA in furtherance of the Decade for Natural Disaster Reduction. Earthquake hazards reduction series 39. [En línea]. Available at: <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1630> [Última consulta 25/09/2012].
- FEMA 157 (1994) "Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Second edition. Volume 2 -Supporting Documentation". Federal Emergency Management Agency [En línea]. Disponible en: <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1631>

- [Última consulta 25/09/2012].
- FEMA 255 (1994) “Seismic Rehabilitation of Federal Buildings: A Benefit/Cost Model. Volume 1 - A User's Manual”. Prepared for the Federal Emergency Management Agency Under Contract No. EMW-92-6-3976 by VSP Associates, Inc. 455 University Avenue, Suite 340 Sacramento, CA 95825 June 30, 1994.
- FEMA 256 (1994) “Seismic Rehabilitation of Federal Buildings: A Benefit/Cost Model. Volume 2 - Supporting Documentation”. Prepared for the Federal Emergency Management Agency Under Contract No. EMW-92-6-3976 by VSP Associates, Inc. 455 University Avenue, Suite 340 Sacramento, CA 95825 June 30, 1994.
- FEMA 273 (1997) “NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings” (FEMA Publication 273). Informe preparado por el Building Seismic Safety Council. [En línea]. Disponible en <http://www.wbdg.org/ccb/DHS/ARCHIVES/fema273.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- FEMA 395 (2003) “Incremental seismic rehabilitation of school buildings (K-12) - Providing protection to people and buildings”. Risk Management Series. Federal Emergency Management Agency. [En línea]. Disponible en: <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1980>. [Última consulta 11/11/2012]
- FEMA 396 (2003) “Incremental seismic rehabilitation of Hospital buildings - Providing protection to people and buildings”. Risk Management Series. Federal Emergency Management Agency [En línea]. Disponible en: <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=1981>. [Última consulta 11/11/2012]
- FEMA 356 (2000) “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”. [En línea]. Informe preparado por Federal Emergency Management Agency y American Society of Civil Engineers Disponible en: [http://www.fema.gov/library/file;jsessionid=F7FEA142417F630D5FC19FC7A769E41C.WorkerLibrary?type=originalAccessibleFormatFile&file=fema\\_356\\_1\\_.txt&fileid=14a09980-7056-11dc-8099-000bdba87d5b](http://www.fema.gov/library/file;jsessionid=F7FEA142417F630D5FC19FC7A769E41C.WorkerLibrary?type=originalAccessibleFormatFile&file=fema_356_1_.txt&fileid=14a09980-7056-11dc-8099-000bdba87d5b) [Última consulta 25/09/2012].
- FEMA/NIBS (1999). “Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS® 99”. Federal Emergency Management Agency – FEMA. Washington, D.C.
- FEMA/NIBS (2003) “Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Earthquake Model HAZUS®MH MR4” Technical Manual. Department of Homeland Security, Emergency Preparedness and Response Directorate, Mitigation Division and National Institute of Building Sciences Washington, D.C.
- Ferreira M.A., Proença J.M., Oliveira C.S. (2008) “Vulnerability Assessment in Educational Buildings– Inference of Earthquake Risk. A Methodology Based on School Damage in the July 9, 1998, Faial Earthquake in the Azores”. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China. Paper ID 09-01-0014.
- Ferreira M.A., Proença J.M. (2008) “Seismic Vulnerability Assessment of the Educational System of Bucharest”. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China. Paper ID 09-01-0110.
- Fierro, E., Perry, C. (2010) “Preliminary Reconnaissance Report: 12 January 2010 Haiti Earthquake”. Reconnaissance and Report partially supported by: The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). [En línea] Disponible en: [http://peer.berkeley.edu/publications/haiti\\_2010/documents/Haiti\\_Reconnaissance.pdf](http://peer.berkeley.edu/publications/haiti_2010/documents/Haiti_Reconnaissance.pdf) [Última consulta 25/09/2012].

- Flessa, S. (2007) "Investing in health Overcoming the poverty trap by effective and efficient health care". *Journal of Public Health* 15(6), 415-421.
- Fleta, J., Escuer, J., Goula, X., Olivera, C., Combes, Ph., Grellet, B. and Granier, Th. (1996) "Zonación Tectónica, primer estadio de la zonación sismotectónica del NE de la Península Iberica (Catalunya)". *Tectonic zoning, first stage of seismotectonic zoning of NE Iberian Peninsula (Catalonia)*, GEOGACETA, 20, pp. 853-856.
- Foo S., Davenport A. (2003) "Seismic Hazard Mitigation for Buildings". *Natural Hazards*, 28 (2-3), 517-536.
- Free, M., Rosseto, T., Peiris, N., Taucer, F., Zhao, B., Koo, R., Wang, J., Ma, X., Verrucci, E. (2008) "The Wenchuan, China earthquake of 12 may 2008 a preliminary field report by EEFIT" [En línea]. Disponible en: [http://www.istructe.org/knowledge/EEFIT/Documents/Wenchuan\\_Preliminary\\_Report.pdf](http://www.istructe.org/knowledge/EEFIT/Documents/Wenchuan_Preliminary_Report.pdf) [Última consulta 05/04/2010].
- Freire J.M (2007), "School Map for the Municipality of Bucharest. Volume I. Survey and analysis report". European Investment Bank. Consultancy for a School Rehabilitation Strategy.
- Fujieda A., Pandey B., Ando, S. (2008) "Safe Schools to Reduce Vulnerability of Children to Earthquakes". *The 14th World Conference on Earthquake Engineering* October 12-17, 2008, Beijing, China. Paper ID 09-01-0081.
- Gallego, M. (1999) "Estimación del riesgo sísmico en la república de Colombia". Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, UNAM.
- Ganzerli, S., Pantelides, C.P., Reaveley, L.D (2000) "Performance-based design using structural optimization". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(11), 1677 – 1690.
- GAR (2011) "Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2011. Revealing Risk, Redefining Development". Chapter 5, Investing today for a safer tomorrow. [En línea]. Disponible en: [http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/GAR-2011/GAR2011\\_Report\\_Chapter5.pdf](http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/bgdocs/GAR-2011/GAR2011_Report_Chapter5.pdf). [Última consulta 25/09/2012].
- Generalitat de Catalunya. Departament d'Ensenyament (2003) "Arquitectura escolar a Catalunya 1990-2001". ISBN 84-393-6299-4.
- Generalitat de Catalunya. Departament d'Ensenyament (2009). "Criteris per a la construcció de nous edificis per a centres docents públics"[En línea]. Disponible en: <http://www20.gencat.cat/docs/Educacio/Documents/ARXIUS/LLIBRE%20DE%20CRITERIS%2025%20juny%202009.pdf>. [Última consulta 25/09/2012].
- Generalitat de Catalunya. Departament de Salut (2003) "Els equipaments de la Xarxa Sanitaria Pública de Catalunya". Servei Català de la Salut. Travesera de les Corts, 131-159. Edifici Olímpia. 08028. Barcelona, España.
- Generalitat de Catalunya. Departament de Salut (2008) "Els Serveis per a la Salut: mirant cap al futur: mapa sanitari, sociosanitari i de salut pública". [En línea]. Disponible en: [http://www20.gencat.cat/docs/salut/Home/Ambits%20tematicas/Linies%20dactuacio/Planificacio/Planificacio\\_serveis\\_i\\_mapa%20sanitari/Mapa\\_sanitari\\_sociosanitari\\_i\\_salut\\_publica/Que\\_es/Documents/ms001.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/salut/Home/Ambits%20tematicas/Linies%20dactuacio/Planificacio/Planificacio_serveis_i_mapa%20sanitari/Mapa_sanitari_sociosanitari_i_salut_publica/Que_es/Documents/ms001.pdf). [Última consulta 25/09/2012].
- Generalitat de Catalunya. Departament de Salut (2010) "Arquitectura para la Salud. 18 años de arquitectura sanitaria en Cataluña. CatSalut 1991-2009". ISBN 978-84-96842-50-2. Servei Català

- de la Salut. Travessera de les Corts, 131-159. Edificio Olímpia. 08028 Barcelona. Tel +34 93 403 8585.
- Generalitat de Catalunya Departament de Salut (2011) “Tercer informe de la Central de Resultats” Agència d’Informació, Avaluació i Qualitat en Salut. Servei Català de la Salut. Barcelona. [En línia]. Disponible en: [http://www20.gencat.cat/docs/canalsalut/Minisite/ObservatoriSalut/osscc\\_Central\\_resultats/Informes/Fitxers\\_estatics/Central\\_resultats\\_tercerinforme\\_2011.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/canalsalut/Minisite/ObservatoriSalut/osscc_Central_resultats/Informes/Fitxers_estatics/Central_resultats_tercerinforme_2011.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- GeoHazards International, Escuela Politécnica Nacional (1995) “Invirtiendo en el futuro de Quito. Proyecto de Seguridad Sísmica de las edificaciones escolares de Quito, Ecuador”. [En línea] Disponible en: <http://www.geohaz.org/news/images/publications/QuitoSchoolProjectSpanish.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- GEOTER (2008) “Calcul probabilista de la perillositat sísmica a Catalunya en acceleracions espectrals” Document GTB/IGC/0508-001. Institut Geològic de Catalunya. C/Balmes, 209-211 08006 Barcelona, España.
- GFRRD (2009) “Guidance Notes on Safer School. Construction Global Facility for Disaster Reduction and Recovery”. [En línea]. Disponible en: [http://www.gfdr.org/docs/Guidance\\_Notes\\_Safe\\_Schools.pdf](http://www.gfdr.org/docs/Guidance_Notes_Safe_Schools.pdf). [Última consulta 25/09/2012].
- Ghobarah, A. (2001) “Performance-based design in earthquake engineering: state of development”. *Engineering Structures*, 23(8), 878-884.
- Giovinazzi, S. Lagomarsino, S. (2004) “Macro seismic Method for the Vulnerability Assessment of Buildings”. *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Vancouver, Canada.
- Giovinazzi, S (2005) “The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis”. Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Braunschweig. Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. Tesis doctoral. 222pp.
- Goda K., Hong, H.P. (2006) “Optimal seismic design for limited planning time horizon with detailed seismic hazard information”. *Structural Safety*, 28(3), 247-260
- González, M., Irizarry, J., Susagna, T., Goula, X., Pujades, L.G (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*. Girona, Mayo 8-11 de 2007
- Goula, X., Susagna, T., Fleta, J., Secanell, R. (1998) “Informació territorial i anàlisi del risc pel Pla SISMICITAT. Part I: perillositat sísmica”. Instituto Cartográfico de Cataluña. Barcelona.
- Graf, W.P., Lee, Y. (2009) “Code-Oriented Damage Assessment for Buildings”. *Earthquake Spectra* 25(1), 17-37.
- Grant, D.N., Bommer, J.J., Pinho, R., Calvi, G.M., Goretti, A. and Meroni, F. (2007) “A prioritization scheme for seismic intervention in school buildings in Italy”. *Earthquake Spectra*, 23(2), 291-314.
- Grases, G.J (1991) “Seismic hazard, zonation and importance factors: A proposal for selecting design ground motions”. *Proceedings of the International Workshop on Seismology and Earthquake Engineering*, México, 1991. Conferencia: México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Apr. 1991. México. MX. Disponible en: <http://www.eird.org/cd/building-codes/pdf/eng/doc4552/doc4552.htm> [Última consulta 25/09/2012].

- Great Britain. Health and Safety Executive (1992) "The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations". London: HMSO.
- Grossi, P., Kunreuther, H. (2005) "Catastrophe modeling: a new approach to managing risk". Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- Grossi P (2008) "Modeling Seismic Mitigation Strategies". *Risk Assessment, Modeling and Decision Support*. Springer Berlin Heidelberg P 227-245.
- Grünthal, G. (1998). "European Macroseismic Scale 1998. EMS-98". Conseil de L'Europe. Cahiers du centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15
- Hadjian, A.H., (2002) "A general framework for risk-consistent seismic design". *Earthquake engineering and structural dynamics*, 31, 601-626.
- Haldar, A. (2005) "Simulation in Risk-Based Codified Engineering Design". *International Series in Intelligent Technologies*, 20, 443-458.
- Hansson, S.O (2007) "Philosophical problems in cost-benefit analysis". *Economics and Philosophy*, 23, 163-183.
- Hamburger, R.O. (2003) "A vision for performance based earthquake engineering". Unpublished report for the ATC-58 project. ATC; Redwood City (CA, USA); 2003.
- Hill M., Rossetto T. (2008 a) "Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modeling in Europe". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6, 335-365.
- Hill M., Rossetto T. (2008 b) "Do existing damage scales meet the needs of seismic loss estimation?" *14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China,
- Holmes, W (2009) "Evolution of Building Code Seismic Performance Standards for New and Existing Buildings". Risk Reduction Standards. *EERI Annual Meeting Rutherford & Chekene San Francisco Salt Lake City-2009*. [En línea]. Disponible en: <http://www.wsspc.org/Events/2009ac/Holmes.pdf> [Última consulta 07/04/2010].
- Hwang, H-H.M., Jaw, J-W. (1990) "Probabilistic damage analysis of structures". *Journal of structural engineering ASCE*, 116(7),1992-2007
- Idescat (2010) Base de dades municipals [En línea]. Disponible en: <http://www.idescat.cat/territ/BasicTerr?TC=9> [Última consulta 12/05/2011].
- Idescat (2010 a) Base de dades municipals. Edificis segons el seu nombre de plantes Val d'Aran. Any 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.idescat.cat/territ/BasicTerr?TC=5&V0=2&V1=39&V3=183&V4=184&ALLINFO=TRUE&PARENT=25&CTX=B> [Última consulta 23/11/2011].
- Idescat 2010. Anuario estadístico de Cataluña [En línea] Disponible en: <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&lang=en> [Última consulta 08/11/2010].
- Idescat (2010 b) Base de dades municipals. Unitats i alumnes d'educació infantil, per sectors. Val d'Aran. Any 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.idescat.cat/territ/BasicTerr?TC=5&V0=2&V1=39&V3=332&V4=70&ALLINFO=TRUE&PARENT=25&CTX=B> [Última consulta 23/11/2011].

- IFRC (2004) “Iran: Bam Earthquake Revised Emergency Appeal 25/2003”. [En línea]. Disponible en: <http://www.reliefweb.int/w/rwb.nsf/0/A8056AC1068AD1B4C1256E15003D62B3?> [Última consulta 12/04/2010].
- IFRC (2005 a) “Iran: Qeshm Earthquake 29 november 2005” [En línea]. Disponible en: <http://www.ifrc.org/docs/appeals/rpts05/Iranqk%20Nov%202.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- IFRC (2005 b) “Iran: Qeshm earthquake” 28 November 2005. [En línea]. Disponible en: <http://www.ifrc.org/docs/appeals/rpts05/Iranqk%20Nov1.pdf> [Última consulta 20/10/2012].
- IFRC (2005 c) “Iran: Earthquake 28 February 2005 IFRC The Situation”. [En línea]. Disponible en: <http://www.ifrc.org/docs/appeals/rpts05/irqk6.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- IFRC (2006) “Iran: Doroud Earthquake Information Bulletin no. 5/2006 7 April 2006” [En línea]. Disponible en: <http://www.ifrc.org/docs/appeals/rpts06/DoroudIB5.pdf> [última consulta 25/09/2012].
- IGC (2010) “Formularis per a l’avaluació de la vulnerabilitat sísmica d’edificis essencials”. Informe IGC GS-11/2010. Institut Geològic de Catalunya. C/Balmes, 209-211 08006 Barcelona, España.
- IGC (2011) “Mapa de mesozonació sísmica de Catalunya ( 1:100.000), adaptat a la classificació EC-8”. Informe IGC GS-008/11. Institut Geològic de Catalunya. C/Balmes, 209-211 08006 Barcelona, España.
- IGN (2003) Instituto Geográfico Nacional. Computer file
- Intercomuna (2 de marzo de 2010) “Entregan nuevo informe del terremoto en la Araucanía” [En línea]. Disponible en: <http://www.intercomuna.cl/entregan-nuevo-informe-del-terremoto-en-la-araucania/> [Última consulta 25/09/2012].
- Irizarry, J., Lantada, N., Pujades, L.G., Barbat, A.H., Goula, X., Susagna, T., Roca, A. (2010) “Ground-shaking scenarios and urban risk evaluation of Barcelona using the Risk-UE capacity spectrum based method”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(2), 441-466.
- ISDR (2005) “Hyogo Framework for Action 2005-2015. Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters”. *World Conference on Disaster Reduction* 18-22 January 2005, Kobe, Hyogo, Japan.
- ISDR (2010) “Reseña de la estrategia de la Campaña Mundial de la UNISDR para la Reducción de Desastres 2010-2011 para desarrollar ciudades resilientes y abordar el riesgo urbano”. [En línea]. Disponible en: <http://www.eird.org/camp-10-11/index.htm> [Última consulta [25/04/2010].
- ITeC (1983) “Cap a una nova normativa d’edificació escolar” [En línea]. Disponible en: [http://www.itec.es/nouPDF.e/pdfs/Cap%20a%20una%20normativa%20d%20E2%80%99edificaci%20C3%B3%20escolar\\_ITeC\\_1983.pdf](http://www.itec.es/nouPDF.e/pdfs/Cap%20a%20una%20normativa%20d%20E2%80%99edificaci%20C3%B3%20escolar_ITeC_1983.pdf) ISBN 84 398 0201-3 [Última consulta 18/04/2011].
- Jablonowski, M. (2005) “Epistemic Uncertainty and the Management of High Risk Exposures”. *International Series in Intelligent Technologies* (20), 267-281.
- Jaiswal, K., Wald, D., Porter, K. (2010) “A Global Building Inventory for Earthquake Loss Estimation and Risk Management”. *Earthquake Spectra*, 26 (3), 731–748.
- Kappos, A.J., Dimitrakopoulos, E.G. (2008) “Feasibility of pre-earthquake strengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis, with the aid of fragility curves”. *Natural Hazards*, 45(1), 33-54.



- Karimi, I., Hüllermeier, E., Meskouris, K. (2007) "A fuzzy-probabilistic earthquake risk assessment system". *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 11(3), 229-238.
- Keipi, K., Tyson, J. (2002) "Planning and Financial Protection to Survive Disasters". Catalog in Publication provided by Inter-American Development Bank. Felipe Herrera Library p.cm. Sustainable Development Department Technical studies series; ENV-139.
- Kelen, G.D., McCarthy, M.L., Kraus, C.K., Ding, R., Hsu, E.B., Li, G., Shahan, J.B., Scheulen, J.J., Green, G.B (2009) "Creation of surge capacity by early discharge of hospitalized patients at low risk for untoward events". *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 3(S-1) S10-S16.
- Kleindorfer P.; Grossi P.; Kunreuther H. (2000) "The impact of Mitigation on Homeowners and Insurers: An Analysis of Model Cities". *Catastrophe Modeling: A New Approach To Managing Risk*, 168-188. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA.
- KOERI (2002) "Earthquake Risk Assessment for Istanbul Metropolitan Area" Kandilli Observatory And Earthquake Research Institute-KOERI, Department of Earthquake Engineering. Informe preparado para American Red Cross and Turkish Red Crescent, Bogazici Univeristy, Estambul, Turquía.
- Krawinkler H (1996) "A few basic concepts for performance based seismic design". *Proceedings of 11 th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, México. Paper no. 1133. Oxford Pergamon, 1996.
- Krawinkler, H., Zareian, F., Medina, R. Ibarra, L (2004) "Contrasting performance-based design with performance assessment". *Performance Based seismic design: concepts and implementation. Proceedings of an international workshop*. Bled, Slovenia, June 28. July 1, 2004.
- Lantada, N (2007) "Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona." Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 350pp [En línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/6259> [Última consulta 13/11/2012]
- Lantada, N., Pujades, L.G., Barbat, A.H. (2009) "Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison". *Natural Hazards*, 51, 501-524.
- Lantada, N., Irizarri, J., Barbat, A.H., Goula, X., Roca, A., Pujades, L.G (2010) "Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the vulnerability index method", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 201-229.
- La crónica de hoy (4 de abril de 2010). "Estima Piñera en 30 mil millones de dólares costo de reconstrucción" [En línea] . Disponible en: [http://www.cronica.com.mx/nota.php?id\\_notas=491158](http://www.cronica.com.mx/nota.php?id_notas=491158) [última consulta 25/09/2012].
- La Vanguardia (12/05/2011) "El 17% de los edificios analizados en Lorca tienen daños estructurales". [En línea]. Disponible en: <http://www.lavanguardia.com/sucesos/20110512/54153736043/el-17-de-los-edificios-analizados-en-lorca-tienen-danos-estructurales.html>. [Última consulta 14/06/2011]
- Lee G.C., Tong M., Okuyama Y. (2001) "Retrofit Strategies For Hospitals in the Eastern United States". University at Buffalo. MCEER Articles on Hospital Research. Disponible en: [http://mceer.buffalo.edu/publications/resacom/01-sp01/rpa\\_pdfs/12lee-hosp\\_graphics.pdf](http://mceer.buffalo.edu/publications/resacom/01-sp01/rpa_pdfs/12lee-hosp_graphics.pdf) [Última consulta 25/09/2012].

- Lee, T.H., Mosalam, K.M. (2006) Probabilistic Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Structural Components and Systems. Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley. [En línea]. Disponible en:  
[http://peer.berkeley.edu/publications/peer\\_reports/reports\\_2006/PEER\\_604\\_MOSALAM\\_Lee.pdf](http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2006/PEER_604_MOSALAM_Lee.pdf)  
[Última consulta 25/09/2012].
- Levret, A., Cushing, M. and Peyridieu, G. (1996), "Recherche des caractéristiques de séismes historiques en France", Atlas de 140 cartes macrosismiques., IPSN. 2
- Li, P.; Tao, X.; (2005) "Quantitative Earthquake Damage Detection from Changes in Remote Sensing Images– A case study". *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1026-1029.
- Liel, A.; Lynch, K. (2009) "Vulnerability of reinforced concrete frame buildings and their occupants in the 2009 L'Aquila, Italy Earthquake. Quick Response Report. October 2009." Number 213. Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering University of Colorado Boulder, Colorado. [En línea] Disponible en:  
<http://www.colorado.edu/hazards/research/qr/qr213.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- Liu, S.C., Neghabat, F. (1972) "A cost optimization model for seismic design of structures". *The Bell System Technical Journal*, 51(10) 2209-2225. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.alcatel-lucent.com/bstj/vol51-1972/articles/bstj51-10-2209.pdf>  
[Última consulta 25/09/2012].
- Liu, M., Y. K. Wen, Y.K., Burns, S.A (2004) "Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference". *Engineering Structures*, 26(10), 1407-1421.
- López, O.A., Hernandez, J.J., Del Re, G., Puig, J., Espinosa, L. (2007). "Reducing seismic risk of schools in Venezuela". *Earthquake Spectra*, 23(4), 771-790.
- Lopez O.A.; Hernandez, J.J.; Marinilli A.; Bonilla R.; Fernandez N.; Dominguez J.; Baloa T.; Coronel G.; Safina S.(2008) "Seismic Evaluation and Retrofit of School Buildings in Venezuela". *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China. Paper ID 09-01-0041.
- Lupoi, G., Franchin, P., Lupoi, A., Pinto, P.E., Calvi, G.M (2008) "Probabilistic Seismic Assessment for Hospitals and Complex-Social Systems". Centre for Post Graduate Training and Research in Earthquake Engineering and Engineering Seismology. Research Report No. ROSE -2008/2. ROSE School. C/O EUCENTRE, Vía Ferrata 1, 27100, Pavia, Italia.
- Macintyrea, M.G., Barbera, J.A., Smith, E.R. (2006) "Surviving collapsed structure entrapment after earthquakes: a "time-to-rescue" analysis" *Prehospital and Disaster Medicine*, 21(1),4-17.
- Martin, Ch., Combes, Ph., Secanell, R., Lignon, G., Firavanti, A., Carbon, D., Monge, O. and Grellet B. (2002 a) "Revision du zonage sismique de la France. Etude probabiliste". Rapport GEOTER GTR/MATE/0701-150.
- Martin, Ch., Secanell, R. and Lignon, G (2002 b) "Automation of the seismic hazard calculation by means of probabilistic approaches. Preliminary results in France". *Proc. III asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Valencia, 2002.
- Martinelli A., Mannella A., Milano L., Cifani G., Lemme A., Miozzi C., Mancini C. (2008) "The Seismic Vulnerability of School Buildings in Molise (Italy): The "Safe School Project", from Seismic Vulnerability Studies to an Intervention Classification". *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China. Paper ID 09-01-0086.

- Mata, P., Oller, S., Barbat, A.H (2008) “Dynamic analysis of beam structures considering geometric and constitutive nonlinearity”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(6-8) 857-878.
- May P.J (2007) “Societal Implications of Performance-Based Earthquake Engineering” PEER Report 2006/12 Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley.
- Mc Guire, R., (1976) “EQRISK. Evaluation of earthquake risk to site. Fortran computer program for seismic risk analysis”. Geological. Open File. Report 76-67; 92 pp.
- MCEER (2008) “China (Sichuan Province) Earthquake 2008: News & Statistics” [En línea]. Disponible en: <http://mceer.buffalo.edu/infoService/disasters/china-earthquake-sichuan.asp> [Última consulta 20/10/2012]
- MCEER (2009 a) “L'Aquila Earthquake, Central Italy 2009: News & Images” [En línea]. Disponible en: <http://mceer.buffalo.edu/infoService/disasters/L%27Aquila-Earthquake-News.asp> [Última consulta 25/09/2012].
- MCEER (2009 b) “Major Chinese Earthquakes of the 20th Century” [En línea]. Disponible en: [http://mceer.buffalo.edu/infoService/reference\\_services/major\\_chinese\\_earthquake.asp](http://mceer.buffalo.edu/infoService/reference_services/major_chinese_earthquake.asp) [Última consulta 25/09/2012].
- MCEER (2010) “Haiti Earthquake 2010: Facts, Engineering, Images & Maps” [En línea]. Disponible en: <http://mceer.buffalo.edu/infoService/disasters/Haiti-Earthquake-2010.asp#1> [Última consulta 25/09/2012].
- Menoni, S., Meroni, F., Pergalani, F., Petrini, V., Luzi, L., Zonno, G. (2000) “Measuring the seismic vulnerability of strategic public facilities: response of the health-care system”. *Disaster Prevention and Management*, 9(1) 29 – 38.
- Milutinovic Z.V, Trendafiloski G.S (2003), “WP4: Vulnerability of current buildings”. RISK-UE project Handbook. Sep. 2003. RISK-UE project report.111 pp.
- Ministerio de Salud. Gobierno de Chile (2010) “3º reporte sobre la situación de la red asistencial. Publicada el 02-03-2010” [En línea] Disponible en [http://new.paho.org/disasters/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=1368&Itemid=](http://new.paho.org/disasters/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1368&Itemid=). [Última consulta 20/10/2010].
- Ministerio de Salud de Nicaragua (2005) “Guía para la elaboración de planes de emergencias hospitalarios para situaciones de desastres” Nicaragua. Ministerio de Salud, Unidad Técnica de Enlace para Desastres. Organización Panamericana de la Salud. [En línea]. Disponible en: [http://www.redhum.org/archivos/pdf/ID\\_1354\\_Redhum-NI\\_-\\_Guia\\_para\\_la\\_elaboracion\\_de\\_planes\\_-MINSÁ-\\_2005.pdf](http://www.redhum.org/archivos/pdf/ID_1354_Redhum-NI_-_Guia_para_la_elaboracion_de_planes_-MINSÁ-_2005.pdf) [Última consulta 24/10/2012]
- Miranda, E. (1999) “Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings”. *Journal of Structural Engineering* 125(4), 417-425.
- Miyamoto (2009) “L’Aquila, Italy M6.3 Earthquake April 6 2009. Earthquake field investigation report”. [En línea]. Disponible en: <http://www.grmcat.com/images/Italy-EQ-Report.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- Miyamoto, H.K, Gilani, A.S.J; Chan, T. (2009) “The 2008 Sichuan Earthquake. Assessment of Damage and Lessons Learned”. *Structure Magazine*. January 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=831>. [Última consulta 25/09/2012].

- Molina, E., Marroquín, G., Escobar, J.J., Talavera, E., Rojas, W., Climent, A., Camacho-Astigarrabia, E., Benito, B., Lindholm, C. (2008). “Proyecto Resis II Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica”. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/Biblioteca/evaluacion\\_amenazasismica\\_centroamerica.pdf](http://www.rsn.geologia.ucr.ac.cr/Biblioteca/evaluacion_amenazasismica_centroamerica.pdf).  
[Última consulta 10/07/2011].
- Molina, S., Lang, D. H., Lindholm, C. D. (2009) “User and Technical Manual, SELENA v4.1”. NORSAR. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.eqrisk.info/downloads/manual\\_SELENA\\_v4.1.pdf](http://www.eqrisk.info/downloads/manual_SELENA_v4.1.pdf) [Última consulta 15/11/2012]
- Monfort, D., Lantada, N., Goula, X., Barbat, A.H., Negulescu, C., Pujades, L.G., Susagna, L.G, Valcarcel, J.A, Rodriguez, J. (2011) “Generación De Escenarios De Riesgo Sísmico En Una Zona Transfronteriza Del Pirineo” *Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (4CNIS)*. Paper No 79. Granada, España. 18-20/05/2011.
- Monti, G., Nuti, C. (1996) “A procedure for assessing the functional reliability of Hospital Systems”. *Structural Safety*, 18(4), 277-292.
- Mora, M.G., Ordaz, M., Yamin, L.E., Cardona, O.D. (2009) “Relaciones beneficio costo probabilistas del refuerzo sísmico de edificios”. *Memorias del IV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Pereira, Colombia mayo 13, 14 y 15 de 2009.
- Mora, M.G., Ordaz, M., Yamin, L.E., Cardona, O.D. (2011) “Relaciones beneficio costo probabilistas de rehabilitación sísmica”. *Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Granada, Spain, 18-20 de mayo de 2011. Paper ID 60.
- Moreno, R. (2006) “Análisis no lineal estático y dinámico para la evaluación del riesgo sísmico en edificios. Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.tdx.cat/TDX-0702107-165654> [última consulta 25/09/2012].
- Mouroux, P. (2003) “RISK-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns”. Final Report. European Commission, Brussels.
- Murachi, Y., Namita, H. (2010) “A case study of seismic risk management of school buildings based on life cycle cost and safety of students”. *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems* – Furuta, Frangopol & Shinozuka (eds) © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47557-0.
- MV-102-1975 (1976) “Norma MV 102-1975: acero laminado para estructuras de edificación”. Ministerio de la Vivienda. 30 pp.
- Nazara, S.; Resosudarmo, B.P (2007) “Aceh-Nias Reconstruction and Rehabilitation: Progress and Challenges at the End of 2006”. [En línea]. Tokyo: Asian Development Bank Institute. Disponible en: <http://www.adbi.org/discussion-paper/2007/06/29/2288.acehnias.reconstruction.rehabilitation/>  
[Última consulta 25/09/2012].
- NCSE-94 (1995) “Real Decreto 2543/1994, de 29 de diciembre, por el que se aprueba la Norma de Construcción Sismorresistente. Parte General y de Edificación (NCSE-94)”. Ministerio de obras públicas, Transportes y Medio Ambiente. Fecha de publicación: 08-02-1995 BOE: 33-1995. Pp. 3935-3980.
- NCSE-02 (2002) “Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismo-rresistente: parte general y edificación (NCSR-02)”. Ministerio de Fomento. Fecha de publicación: 11-10-2002. BOE: 244-2002. Pp. 35898-35966.

- NEC-11 (2011) “Norma ecuatoriana de la construcción “ Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana de la construcción. Decreto Ejecutivo No 705 del 6 de abril 2011. Ministerio de Desarrollo urbano y vivienda. Convenio MIDUVI – Cámara de la construcción de Quito.
- NRC-ACRS (1980) “An Approach to Quantitative Safety Goals for Nuclear Power Plants”. NUREG-0739, Part 1 by Greismeyer and Okrent, Washington DC.
- NSR-10 (2010) “Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente”. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) Carrera 20 N° 84-14 Oficina 502. Bogotá, D.C., Colombia.
- Nuti C., Santini S., Vanzi I. (1996) “Seismic risk of the italian hospitals”. Università Roma. Teoria e tecnica delle costruzioni. Ricerca. Design and Retrofitting of Hospitals in Seismic Areas. disponible en:  
[http://host.uniroma3.it/dipartimenti/dis/ricerca/Hospitals/Articoli\\_pdf/nsv.01.eng.pdf](http://host.uniroma3.it/dipartimenti/dis/ricerca/Hospitals/Articoli_pdf/nsv.01.eng.pdf).  
[Última consulta 25/09/2012].
- Nuti, C., Vanzi, I. (1998) “Assessment of post-earthquake availability of hospital system and upgrading strategies”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 1403-1423.
- Nuti, C., Vanzi, I. (2006) “To retrofit or not to retrofit?” *Engineering Structures*, 25(6), 701-711.
- OCHA (2006) “Situation Report No. 16 Indonesia – Earthquake Central Java and Yogyakarta Provinces 29 June 2006”. [En línea]. Disponible en  
<http://ochaonline.un.org/OchaLinkClick.aspx?link=ocha&DocId=1004695>  
[Última consulta 25/09/2012].
- OCHA (2007) “Situation Report 11 – Peru Earthquake – 27 August 2007”. [En línea]. Disponible en:  
<http://ochaonline.un.org/OchaLinkClick.aspx?link=ocha&docId=1062937>  
[Última consulta 20/10/2012].
- OCHA (2008) “Situation Report No. 10 Sichuan Province, China– Earthquake”. [En línea]. Disponible en: <http://www.un.org.cn/public/resource/06c075240c824156c5fda87cb84f5302.pdf>  
[última consulta 25/09/2012].
- OCHA (2008 b) “Situation Report 4 – Earthquake in Pakistan 3 November 2008” [En línea] Disponible en:  
[http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/E9F6C93056C8598E492574F7000B365B-Full\\_Report.pdf](http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/E9F6C93056C8598E492574F7000B365B-Full_Report.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- OCHA (2008 c) “Situation Report 3 – Earthquake in Pakistan 31 Octubre 2008” [En línea] Disponible en:  
[http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/79E802AFC7DFD897492574F40006D1B1-Full\\_Report.pdf](http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/79E802AFC7DFD897492574F40006D1B1-Full_Report.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- OCHA (2009) “Indonesia Earthquake Situation Report No. 14 Date: 13 October 2009” [En línea]. Disponible en:  
<http://ochaonline.un.org/OchaLinkClick.aspx?link=ocha&docId=1127146>  
[Última consulta 25/09/2012].
- OCHA (2010) “Chile Earthquake Situation Report #4 05 March 2010” [En línea]. Disponible en:  
[http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/3CFD62D7030F98F8492576DE0000A055-Full\\_Report.pdf](http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/3CFD62D7030F98F8492576DE0000A055-Full_Report.pdf) [última consulta 25/049/2012].
- OI, W. (1995) “Safety at what price?” *The American Economic Review*, 85(2), 67-71.
- OMS [En línea] “¿Porqué Contar con Hospitales Seguros Frente a Desastres?” Disponible en:

- [http://safehospitals.info/index.php?option=com\\_content&task=view&id=109&Itemid=167&lang=spanish](http://safehospitals.info/index.php?option=com_content&task=view&id=109&Itemid=167&lang=spanish) [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (1983) “Organización de los Servicios de Salud para Situaciones de Desastre Clasificación de los centros asistenciales para casos de desastre” [En línea] Disponible en: <http://cidbimena.desastres.hn/docum/ops/publicaciones/068/index.htm> [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (1995) “Guías de Evaluación de los Preparativos para Desastres en el Sector de la Salud”. [En línea] Disponible en: <http://helid.desastres.net/fr/d/J061/> [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (1996) “Establecimiento de un Sistema de Atención de Víctimas en Masa”. [En línea] Disponible en: [http://www.disaster-info.net/safehospitals\\_refdocs/documents/spanish/estableDeUnSistema.pdf](http://www.disaster-info.net/safehospitals_refdocs/documents/spanish/estableDeUnSistema.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (1999) “Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud”. Washington, D.C.: Organización Panamericana de la Salud, OPS, ©1999, 2004 153 p.—(Serie Mitigación de Desastres). [En línea] Disponible en: <http://www.paho.org/Spanish/PED/fundaspa.htm> [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (2001) “Logística y gestión de suministros humanitarios en el sector salud”. Programa de Preparativos para Situaciones de Emergencia y Socorro en casos de Desastre Departamento de Emergencias y Acción Humanitaria. Desarrollo Sostenible y Entornos Saludables. [En línea] Disponible en: <http://helid.desastres.net/en/d/Js2912s/> [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (2003) “Organización de los Servicios de Salud para Situaciones de Desastre”. Preparativos de Salud para Situaciones de Desastres - Serie Manuales y Guías sobre Desastres, N° 3 - Guía para el Nivel Local [En línea] Disponible en: <http://helid.desastres.net/en/d/Js3072s/11.html> [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (2007 a) “¿Su hospital es seguro? Preguntas y respuestas para el personal de salud” Serie manuales y guías sobre desastres N° 11. [En línea]. Disponible en: <http://www.planeamientohospitalario.info/contenido/referencia/HospitalSeguro.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- OPS (2007 b) “Terremoto en Peru. Informe de la Situación de Salud 24 de agosto de 2007” Organización Panamericana de la Salud. Desastres y asistencia humanitaria. Archivo de desastres. [En línea]. Disponible en: [http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/688447B295F4AE914925734200170778-Reporte\\_completo.pdf](http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/688447B295F4AE914925734200170778-Reporte_completo.pdf) [Última consulta 20/10/2012]
- OPS (2008) “Índice de seguridad hospitalaria: Guía del evaluador de hospitales seguros”. Organización Panamericana de la Salud. Washington, D.C.: OPS, © 2008 114 p.-- (Serie Hospitales seguros frente a desastres, 1) ISBN 978-92-75-33256-6 [En línea]. Disponible en: <http://www.paho.org/spanish/DD/PED/SafeHosEvaluatorGuideSpa.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- Ordaz, M; Miranda, E; Reinoso, E and Pérez-Rocha, L.E. (1998) “Seismic Loss Estimation Model for México City”. Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Ordaz, M; Miranda, E; Reinoso, E and Pérez-Rocha, L.E. (1998 b) “Seismic Loss Estimation Model for México City”. *12 World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand, 30 January - Friday 4 February 2000 Paper No 1902.
- Ordaz, M. (2000) “Metodología para la Evaluación del Riesgo Sísmico Enfocada a la Gerencia de Seguros por Terremoto”. Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.

- Ordaz, M., Aguilar, A., Arboleda, J. (2007) "CRISIS2007. Program for computing seismic hazard. (Version 7.2)". Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://ecapra.org/crisis-2007> [Última consulta 25/09/2012].
- PAHO (2003) "Terremoto en Colima, Mexico - 21 de enero de 2003". Informe del 22 de enero de 2003, 8:00 a.m. [En línea] Disponible en: <http://www.paho.org/Spanish/DD/PED/Mexicoeq-03.htm> [Última consulta 25/09/2012].
- PAHO (2007) "Earthquake in Peru Situation Reports August 19/20. Evaluation of Health Situation 20 August 2007" (supersedes the 19 August report). [En línea]. Disponible en: [http://new.paho.org/disasters/index.php?option=com\\_content&task=view&id=771&Itemid=906&lang=es](http://new.paho.org/disasters/index.php?option=com_content&task=view&id=771&Itemid=906&lang=es) [Última consulta 25/09/2012].
- PAHO (2010 a) "Emergency Operations Center Situation Report #2 Haiti Earthquake". For public distribution Thursday, January 14, 2010 6:00 PM, EDT. [En línea] Disponible en: <http://www.who.int/hac/crises/hti/sitreps/14january2010/en/index.html> [Última consulta 25/09/2012].
- PAHO (2010 b) "Informe de situación #2 del Centro de Operaciones de Emergencia Terremoto en Chile". [En línea]. Disponible en: [http://new.paho.org/col/index.php?option=com\\_content&task=view&id=577&Itemid=1](http://new.paho.org/col/index.php?option=com_content&task=view&id=577&Itemid=1) [Última consulta 25/09/2012].
- Paul, J.A., George, S.K., Yi, P., Lin, Li (2006) "Transient Modeling in Simulation of Hospital Operations for Emergency Response" *Prehospital and Disaster Medicine*, 21(4),223-36.
- Paul, J.A & Lin, L. (2009) "Impact of facility damages on hospital capacities for decision support in disaster response planning for an earthquake". *Prehospital Disaster Medicine* 24(4),333-341.
- PDS-1 (1974) "Norma Sismorresistente P.D.S.-1". Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno, Decreto de 30 de agosto de 1974, BOE, 279, 21 de noviembre de 1974. 3723-3740 pp.
- Petal, M. (2008) "Disaster Prevention for Schools Guidance for Education Sector Decision-Makers" Consultation version, November 2008. International Strategy for Disaster Reduction. Thematic Platform for Knowledge and Education. UNISDR Geneva. [En línea]. Disponible en: [http://www.preventionweb.net/files/7344\\_DPforSchoolssm.pdf](http://www.preventionweb.net/files/7344_DPforSchoolssm.pdf) [Última consulta 21/10/2012].
- Pitilakis K., Alexoudi M.; Argyroudis.S; Anastasiadis A. (2006) "Seismic Risk Scenarios For An Efficient Seismic Risk Management: The Case Of Thessaloniki (Greece)" *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*, 66, 229-244. Springer Netherlands, ISBN: 978-1-4020-4571-4.
- Pons, O. (2009) Arquitectura escolar prefabricada a Catalunya. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). [En línea]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/TDX-0219109-114725>.
- Porter K.A. (2003) "An overview of PEER's performance-based engineering methodology". *Proceedings of the ninth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering*. Der Kiureghian A, Madanat S, Pestana JM, editors. Rotterdam: Civil Engineering and Reliability Association (CERRA); Millpress.
- Prat, E., Pesquer, Ll., Olivet, M., Aloy, J., Fuste, J. y Pons, X. (2009): "Metodología para el análisis de accesibilidad a los recursos sanitarios: el caso de Cataluña", *GeoFocus*, 9, 250-269. ISSN: 1578-5157.

- Proyectos y Diseños –P&D (2000) “Evaluación preliminar de vulnerabilidad sísmica centros educativos distritales”. Secretaria De Educación Distrito Capital De Santafé De Bogotá. Bogotá, Colombia.
- Pujades, L.G., Barbat, A.H. (2007) “Estimación de la vulnerabilidad sísmica de las tipologías constructivas más representativas de los edificios de importancia especial en Cataluña”. Segunda versión. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pujades, L.G., Roca, X., Oliveira, C.S., Safina, S. (2007) “Response of hospital systems”. *Assessing and Managing Earthquake Risk*. 261 - 286. Springer. Netherlands.
- Ramírez-Rodríguez, P. A., Toledano Gutiérrez, F. X. (2004). “Bases técnicas para el cálculo de la prima y pérdida máxima probable en los seguros de terremoto en México. Aplicación a estructuras tipo casa de mampostería”. Tesis Licenciatura. Actuaría. Departamento de Actuaría, Escuela de Ciencias, Universidad de las Américas Puebla. Diciembre. [En línea]. Disponible en:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lat/ramirez\\_r\\_pa/indice.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lat/ramirez_r_pa/indice.html).  
[Última consulta 25/09/2012].
- Rasmussen, N. C. (1975). “Reactor safety study. An assessment of accident risks in U.S”. Commercial Nuclear Power Plants (WASH-1400, NUREG 75/014). U.S. Nuclear Regulatory Commission
- Reliefweb (2002) “Afghanistan: Earthquake Appeal No.10/02.” 12 abril 2002. [En línea]. Disponible en:  
<http://js.static.reliefweb.int/report/afghanistan/afghanistan-earthquake-appeal-no1002> [Última consulta 20/10/2012].
- Reliefweb (2006 a) “Indonesia: West Java earthquake and tsunami OCHA Situation Report No. 8” Date: 24 Jul 2006 [En línea]. Disponible en:  
<http://reliefweb.int/report/indonesia/indonesia-west-java-earthquake-and-tsunami-ocha-situation-report-no-8> [Última consulta 25/09/2012].
- Reliefweb (2006 b) “Corrigendum - Islamic Republic of Iran: Earthquake OCHA Situation Report No. 3” 10 Apr 2006. [En línea]. Disponible en:  
<http://reliefweb.int/report/iran-islamic-republic/corrigendum-islamic-republic-iran-earthquake-ocha-situation-report-no-3> [Última consulta 25/09/2012].
- Reliefweb (2009 a) “Sichuan earthquake one year report - May 2009”. [En línea] Disponible en:  
[http://www.unicef.org/eapro/activities\\_10561.html](http://www.unicef.org/eapro/activities_10561.html) [Última consulta 25/09/2012].
- Reliefweb (2009 b) “WHO Director-General visits earthquake-affected health facilities in Indonesia 20/11/09” [En línea]. Disponible en:  
<http://www.reliefweb.int/rw/rwb.nsf/db900sid/EGUA-7XYR2Z?OpenDocument>  
[Última consulta 25/09/2010].
- Reliefweb (2010) “Situación de Hospitales Nivel País”. Source: Government of Chile Date: 02 Mar 2010. [En línea] Disponible en:  
<http://www.reliefweb.int/rw/rwb.nsf/db900SID/VDUX-836T7D?OpenDocument>  
[Última consulta 25/09/2012].
- Renn, O., Klinke, A. (2002) “A new approach to risk evaluation and management: risk-based, precaution-based and discourse-based strategies”. *Risk Analysis*, 2002 (6), 1071-1094.
- Reyes-Santías, F., Cadarso-Suárez, C., Rodríguez-Álvarez, M.X. (2011) “Estimating hospital production functions through flexible regression models”. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(7-8), 1760–1764.



- Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chavez, J., Gonzalez, M., y Reinoso, E. (2006) "A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Catalonia". *Bulletin of Earthquake Engineering* 4(2), 141-158.
- Rodríguez Pereira, J. (2010) "Creación de una base de datos SIG de la Val d'Aran, orientada a la evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas". PFC Escola Tècnica Superior de Camins, Canals i Ports.
- Rose A., Benavides J., Chang S.E., Szczesniak P. and Lim, D. (1997) "The regional economic impact of an earthquake: direct and indirect effects of electricity lifeline disruptions". *Journal of Regional Science*. 37 (3), 437-458.
- Rose, A. (2004) "Defining and measuring economic resilience to earthquakes." *Disaster Prevention and Management*, 13(4), 307-314.
- Rose, A., Liao, S. (2005), "Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions". *Journal of Regional Science*, 45, 75-112.
- Rossetto, T., Elnashai, A. (2003) "Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data". *Engineering Structures*, 25, 1241-1263.
- Royuela, V., & Suriñach, J. (2005) "Constituents of Quality of Life and Urban Size". *Social Indicators Research*, 74(3), 549-572.
- Ruiz-García, J. Terán-Gilmore, A., Zuñiga-Cuevas, O. (2010) "Simplified drift-based fragility assessment of confined masonry buildings". *Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Compte Rendu de la 9ième Conférence Nationale Américaine et 10ième Conférence Canadienne de Génie Parasismique. July 25-29, 2010, Toronto, Ontario, Canada. Paper No 1240.
- Safina, S. (2003) "Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 271 pp. [En línea] Disponible en: < <http://www.tdx.cat/TDX-0225103-164824>>. [Última consulta 25/09/2012].
- Saleh, J.H., Marais, K. (2006) "Reliability: How much is it worth? Beyond its estimation or prediction, the (net) present value of reliability". *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 665-673.
- Sarewitz, D., Pielke, R., Keykhan, M. (2003) "Vulnerability and risk: some thoughts from a political and policy perspective". *Risk analysis*, 23(4), 805-810.
- SB 1953 (1994) Senate Bill 1953, California State Senate, 9 Sept 1994.
- Schulze, W. D., Brookshire, D.S., Tschirhart, J., Hageman, R. K. (1982) "The benefits and costs of seismic building codes". Ljubljana, Yugoslavia. Institute for Testing and Research in Materials and Structures U.S. Cornell University. Program in Urban and Regional Studies, 1982, -graf. [En línea]. Disponible en: <http://www.eird.org/cd/building-codes/pdf/eng/doc13408/doc13408.htm>. [Última consulta 25/09/2012].
- SEAOC (1968) "Recommended Lateral Force Requirements and Commentary" Structural Engineering Association of California. Sacramento, CA
- SEAOC (1995) "Performance based seismic engineering of buildings". VISION 2000 Committee. Structural Engineering Association of California. Sacramento, CA.
- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. and Roca, A. (1999) "Mapa de zonas sísmicas de Cataluña". *Ier Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Murcia, pp. 251-259

- Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. y Roca, A. (2004) "Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties". *Journal of Seismology* 8, 25–40
- Secanell, R., D. Bertil, D., C. Martin, C., Goula, X., Susagna, T., Tapia, M., Dominique, P., Carbon, D. Fleta, J (2008) "Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region". *Journal of seismology*, 12,323–341.
- Secretaría de Educación del Distrito Capital (SED) (2004) REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL SED.xls. [Excel workbook].
- Secretaría de Educación del Distrito Capital (SED) (2006) "Bogotá sin indiferencia refuerza sus colegios". Información institucional. Comité Distrital de Reforzamiento SED. Avenida El Dorado No. 66-63, de Bogotá.
- Şenel Ş.M., Kayhan A.H. (2010) "Fragility based damage assessment in existing precast industrial buildings: a case study for Turkey". *Structural Engineering and Mechanics*, 34 (1), 39-60.
- Sexsmith R.G (1999) "Probability-based safety analysis value and drawbacks". *Structural Safety*, 21(4), 303-310.
- SGC (2003) "Servei Geològic de Catalunya". Computer file.
- Shinozuka, M., Grigoriu, M., Ingraffea, R.A, Billington, S.A., Feenstra, P., Tsu T. Soong. T.T., Reinhorn, A.M., Maragakis, E. (2008) "Development of Fragility Information for Structures and Nonstructural Components" [En línea]. Disponible en: <http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/00-sp01/chapter2.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- Shuhaibar, C. (1999) "Risk Analysis and Probable Maximum Loss". SEAOC 1999 Convention. San Francisco. California.
- Singhaal, A., Kiremendjian, A. (1996) "Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage" *Journal of structures and engineering ASCE*, 122(12), 1459-1467.
- SISpyr - Sistema de Información Sísmica del Pirineo [En línea] Disponible en: <http://www.sispyr.eu/?lang=es> [Última consulta 25/09/2012].
- Smyth, A.W., Deodatis, G., Franco, G., He, Y., Gurvich, T. (2004). "Evaluating earthquake retrofitting measures for schools: a cost-benefit analysis". School Safety and Security. *Keeping Schools Safe in Earthquakes. Proceedings of the ad hoc Experts' Group Meeting on Earthquake Safety in Schools*, Paris, 9 to 11 February 2004. Disponible en: [http://www.oecd.org/document/61/0,3746,en\\_2649\\_39263294\\_34748797\\_1\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/document/61/0,3746,en_2649_39263294_34748797_1_1_1_1,00.html) [Última consulta 07/02/2010].
- Smyth, A.W., Altay, G., Deodatis, G., Erdick, M., Franco, G., Gülkan, P., Kunreuther, H., Luş, H., Mete, E., Seeber, N., Yüzügüllü, Ö. (2004). "Probabilistic Benefit-Cost Analysis for Earthquake Damage Mitigation: Evaluating Measures for Apartment Houses in Turkey". *Earthquake Spectra* 20(1), 171-203.
- Souriau, A. y Pauchet, H. (1998), "A new synthesis of Pyrenean seismicity and its tectonic implications". *Tectonophysics*, 290, pp. 221-244
- Spence, R. (2007) "Earthquake Disaster Scenario Predictions and Loss Modelling for Urban Areas". LESSLOSS – Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides; LESSLOSS report No 2007/07. [En línea]. Disponible en:

- [http://www.lessloss.org/main/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=318](http://www.lessloss.org/main/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=318)  
[Última consulta 15/11/2012]
- Starr, C.(2003) “The precautionary principle versus risk analysis”. *Risk Analysis*; 23(1), 1-3.
- Stepp, J.C. (1972) “Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard”. *Proceedings 2 International Conference on Microzonation*, pp. 897 – 910.
- Susagna, T. y Goula, X. (1999), "Catàleg de sismicitat", Atlas Sísmic de Catalunya, Vol. 1, Institut Cartogràfic de Catalunya, 436 pp
- Susagna, T., Goula, X., Roca, A., Pujades, L., Gasulla, N. and Palma, J.J. (2006). “Loss scenarios for regional emergency plans: application to Catalonia, Spain”. *Assessing and Managing Earthquake Risk*, 463 - 478, Springer.
- Takahashi, Y., Kiureghian, A.D., Ang, A.H.S. (2004) “Life-cycle cost analysis based on a renewal model of earthquake occurrences”. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(7), 859 – 880.
- Takahashi, A., Shii, N., Kawashima, T., Nakao, H. (2007) “Assessment of Medical Response Capacity in the time of Disaster: the Estimated Formula of Hospital Treatment Capacity (HTC), the Maximum Receivable Number of Patients in Hospital”. *Kobe Journal of Medical Science*, 53(5), 189-198.
- Tapia, M., Susagna, T., Goula, X. and Irizarry, J. (2004) “Ley de atenuación del suelo en el noreste de España”, *4ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*.
- Tapia, M. (2006) “Desarrollo y aplicación de métodos avanzados para la caracterización de la respuesta sísmica del suelo a escala regional y local.” Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 355 pp
- Tarque, N., Crowley, H., Pinho, R., Varum. (2010) “Seismic risk assessment of adobe dwellings in Cusco, Peru, based on mechanical procedures”. *14 European Conference on Earthquake Engineering* (14ECEE). Ohrid. Macedonia. 30-08; 03-09 2010.
- The Disaster Control Research Center (2003) “July 26, 2003 northern Miyagi (Japan) earthquake”, Graduate School of Engineering, Tohoku University. Earthquake Disaster Research Laboratory. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.disaster.archi.tohoku.ac.jp/eng/topicse/030726htm/030726e.htm>  
[Última consulta 25/09/2012].
- Timchenko, I. (2002). “Seismic Vulnerability Assessment of Buildings on the Basis of Numerical Analyses”. *The proceedings from the 12<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, 9-13th September 2002, London, UK. Paper Reference 734.
- Trendafiloski, G., Wyss, M., Rosset, P., Marmureanub, G. (2009) “Constructing City Models to Estimate Losses Due to Earthquakes Worldwide: Application to Bucharest, Romania”. *Earthquake Spectra* 25 (3), 665–685.
- UNESCO (2010) “Reaching the marginalized”. EFA Global Monitoring Report. Education For All 2010. Oxford University Press. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 7, Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2010) “World Urbanization Prospects : The 2009 Revision”. CD-ROM Edition - Data in digital form (POP/DB/WUP/Rev.2009). También en línea. Disponible en:  
[http://esa.un.org/unpd/wup/CD-ROM\\_2009/WUP2009-F03-Urban\\_Population.xls](http://esa.un.org/unpd/wup/CD-ROM_2009/WUP2009-F03-Urban_Population.xls)

[Última consulta 19/10/2012]

- United Nations (2010) “Haiti Earthquake. 2010 Appeal. Version 1.1 – 16” January 2010 [En línea]. Disponible en: [http://ochadms.unog.ch/quickplace/cap/main.nsf/h\\_Index/Flash\\_2010\\_Haiti/\\$FILE/Flash\\_2010\\_Haiti\\_SCREEN.pdf?OpenElement](http://ochadms.unog.ch/quickplace/cap/main.nsf/h_Index/Flash_2010_Haiti/$FILE/Flash_2010_Haiti_SCREEN.pdf?OpenElement) [Última consulta 25/09/2012].
- USGS (2008) “Magnitude 7.9 - Eastern Sichuan, China” [En línea]. Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/Quakes/us2008ryan.php#summary> [Última consulta 25/09/2012]
- Vacareanu, R., Lungu, D., Aldea, D., Arion, C. (2004) “Seismic Risk Scenarios Handbook”. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. RISK-UE project Handbook. Sep. 2003. 51pp.
- Valcárcel, J.A., Mora, M.G., Cardona, O.D., Pujades, L.G., Barbat, A.H., Bernal, G.A. (2011) “Análisis de beneficio costo de la mitigación del riesgo sísmico de las escuelas de la Región Andina y de Centro América”. *Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica (4CNIS)*. - paper ID 59. Granada, Spain. 18-20/05/2011.
- Vargas, Y.F., Pujades, L.G., Barbat, A.H., Hurtado, J.E. (2010) “Probabilistic assessment of the global damage in reinforced concrete structures”. *14th European Conference on Earthquake Engineering*. Ohrid: 30th August – 3rd Septiembre, 2010.
- Vargas Y.F., Pujades LG, Barbat AH, Hurtado JE. (2011) “Pushover analysis and incremental dynamic analysis. A probabilistic comparison”. *Proceeding 3rd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece; 2011.
- Vargas Y.F., Barbat, A.H., Pujades, L.G., Hurtado, J.E. (2012) “Probabilistic vulnerability assessment of a reinforced Concrete structure by using a 3-D model” *15 World Conference on Earthquake Engineering 15WCEE*. 24-28 Septiembre, 2012, Lisboa, Portugal.
- Vargas Y.F., Barbat, A.H., Pujades, L.G., Hurtado, J.E. (2013) “Incremental Dynamic Analysis and Pushover Analysis of Buildings. A Probabilistic Comparison”. *Computational Methods in Applied Sciences Volume (26)*, 2013, 293-308.
- Vielma, J.C., Barbat, A.H., Oller, S. (2010) “Seismic safety of limited ductility buildings”. *Bulletin of Earthquake Engineering* 8(1), 135-155.
- Vrijling, J.K., Van Hengel, W., & Houben, R.J (1998) “Acceptable risk as a basis for design”. *Reliability Engineering and System Safety*, 59, 141-150.
- Vrouwenvelder, T., Lovegrove, R., Holicky, M., Tanner, P., Canisius, G. (2001) “Risk Assessment and Risk Communication in Civil Engineering”. *Safety, Risk, Reliability - Trends In Engineering*. Malta (2001). [En Línea]. Disponible en: <http://web.cvut.cz/ki/710/pdf/1812.pdf> [Última consulta 25/09/2012].
- Wen, Y.K. (2001) “Minimum lifecycle cost design under multiple hazards”. *Reliability Engineering & System Safety*, 73(3) , 223-231.
- White, G.; Kates, R. W.; Burton, I. (2001) “Knowing better and losing even more: the use of knowledge in hazards management”. *Environmental Hazards*, 3, 81–92.
- WHO (2005) “Earthquake at Zarand 22 February 2005 Preliminary Situation Report 1” [En línea]. Disponible en: [http://www.who.int/hac/crises/irn/kerman\\_jan05/sitrep\\_1/en/index.html](http://www.who.int/hac/crises/irn/kerman_jan05/sitrep_1/en/index.html) [Última consulta 25/09/2012].

- WHO (2006) “Health Cluster Bulletin Indonesia Earthquake – 27 May 2006” [En línea]. Disponible en: [http://www.searo.who.int/linkfiles/indonesia\\_-\\_emergency\\_situation\\_report\\_bulletin\\_no\\_9\\_java\\_earthquake\\_nov-dec-06.pdf](http://www.searo.who.int/linkfiles/indonesia_-_emergency_situation_report_bulletin_no_9_java_earthquake_nov-dec-06.pdf) [Última consulta 25/09/2012].
- WHO (2008 a) “2008-2009 World Disaster Reduction Campaign. Hospitals Safe from Disasters. Reduce Risk, Protect Health Facilities, Save Lives” [En línea] .Disponible en: [http://safehospitals.info/index.php?option=com\\_content&task=view&id=30&Itemid=1](http://safehospitals.info/index.php?option=com_content&task=view&id=30&Itemid=1) [Última consulta 25/09/2012].
- WHO (2008 b) “Hospital Safety Index. Guide for Evaluators”. Washington, D.C.: PAHO, © 2008 107 p.- - (Series Hospitals Safe from Disasters, 1) ISBN 978 92 75 13256 2.
- WHO (2008 c) “Why a Safe Hospitals Initiative in South-East Asia” [En línea]. Disponible en: [http://www.searo.who.int/LinkFiles/Hospitals\\_Safe\\_from\\_Disasters\\_SafeHospitalInitiative.pdf](http://www.searo.who.int/LinkFiles/Hospitals_Safe_from_Disasters_SafeHospitalInitiative.pdf). [Último consulta 25/09/2012].
- Wilson, J.L., Robinson, A.J., Balendra, T. (2008) “Performance of precast concrete load-bearing panel structures in regions of low to moderate seismicity”. *Engineering Structures* 30, 1831–1841.
- Woo, G., (1996) “Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modelling”. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(2), 353-362
- Yakut A., Tonguc Y., Gülkan P. (2008) “A Comparative Seismic Performance Assessment and Rehabilitation of Existing School Buildings”. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. October 12-17, 2008, Beijing, China. Paper ID 09-01-0143.
- Yamín, L.E., Phillips, C.A., Reyes, J.C., Ruiz, D.M. (2004) “Seismic behavior and rehabilitation alternatives for adobe and rammed earth buildings”. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C, Canada. August 1-6, 2004. Paper No 2942.
- Yamín, L.E., Phillips, C.A., Reyes, J.C., Ruiz, D.M. (2007) “Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada”. *Apuntes en ingeniería*, 20, 286-303.
- Yavari S., Chang, S. (2010) “Modeling Post-Earthquake Functionality of Regional Health Care Facilities”. *Earthquake Spectra* 26(3), 869- 892.
- Yépez, F. (1996). “Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC. Barcelona. España
- Yi, P., George, S.K., Paul, J.A., Lin, L. (2010) “Hospital capacity planning for disaster emergency management”. *Socio-Economic Planning Sciences*, 44 (3), 151–160
- Zeckhauser R.; Keeler E. (1970) “Another type of risk aversion” *Econometrica*, 38(5).
- Zonno, G., García-Fernández, M., Jiménez, M.J., Menoni, S., Meroni, F., Petrini, V. (2003) “The SERGISAI procedure for seismic risk assessment”. *Journal of Seismology*, 7, 259–277.