



Programme opérationnel Interreg IVA
France-Espagne-Andorre 2007 – 2013



SISPYR

Sistema de Información Sísmica del Pirineo
Systeme d'Information Sismique des Pyrénées
Sistema d'Informació Sísmica dels Pirineus

**Riesgo sísmico de los edificios de vivienda del
municipio de Girona
Action 4.2**



Instituto
Geográfico Nacional



Main contributor: IGC-UPC

2013-04-22

Authors: J. Irizarry¹, S. Vendrell¹, N. Lantada³, L. Pujades³ y X. Goula¹

Keywords: riesgo sísmico, edificios vivienda, daño sísmico, Girona, efecto de suelos, inhabitables

-
1. IGC, Intitut Geològic de Catalunya
 2. OMP, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées
 3. UPC, Universitat Politècnica de Catalunya
 4. IGN, Instituto Geografico Nacional
 5. BRGM

Índice

1	Introducción	9
1.1	Antecedentes	9
1.2	Objetivos y metodología	11
1.3	Contenido de la memoria	12
2	Método de estimación del daño físico directo	15
2.1	El riesgo sísmico	15
2.1.1	Intensidad macrosísmica	15
2.1.2	Vulnerabilidad	16
2.1.3	El daño	18
2.2	El método del índice de vulnerabilidad	24
2.2.1	Perspectiva general	24
2.2.2	Clases, índices de vulnerabilidad y funciones de daño	25
2.2.3	Directrices de aplicación del método	31
2.3	Análisis de vulnerabilidad	34
2.3.1	Identificación de tipologías	35
2.3.2	Modificadores de vulnerabilidad	36
2.3.3	Evaluación del intervalo de incertidumbre ΔV_f	37
2.4	Daños a la población	38
2.4.1	Víctimas	40
2.4.2	Personas sin hogar	40
3	Girona	43
3.1	Introducción	43
3.2	Geografía y geología	43
3.3	Divisiones administrativas del municipio	44
3.4	Población	47
4	Los datos	51
4.1	Introducción	51
4.2	Base de datos IDESCAT	52
4.3	Base de datos de UMAT	54
4.3.1	Análisis de la base de datos	56
4.3.2	Períodos constructivos	57
4.3.3	Número de Plantas	58
5	Vulnerabilidad de la ciudad de Girona	61

5.1	Introducción	61
5.2	Tipologías constructivas (BTM)	61
5.2.1	Periodo I (≤ 1910)	66
5.2.2	Periodo II (1911–1960)	66
5.2.3	Periodo III (1961–1980)	66
5.2.4	Periodo IV (> 1980)	67
5.3	Clasificación de los edificios de Girona	67
5.4	Índices básicos de Vulnerabilidad	74
5.5	Modificadores	76
5.6	Distribución del índice de vulnerabilidad por barrios	82
6	Peligrosidad sísmica local para la ciudad de Girona	87
6.1	Introducción	87
6.2	Peligrosidad sísmica	87
6.3	Efectos de suelo según la zonación geotécnica de Girona	88
6.4	Efectos de suelo según la microzonación sísmica de Macau et al. (2012)	92
6.5	Comparación de los efectos de suelos considerados	94
6.6	Peligrosidad Local	95
7	Escenarios de daño	99
7.1	Introducción	99
7.2	Escenario de daño basado en la zonación geotécnica de Vendrell (2011)	100
7.2.1	Daños a los edificios de vivienda	100
7.2.2	Daños a la población	105
7.3	Escenario de daño basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012)	109
7.3.1	Daños a los edificios de vivienda	109
7.3.2	Daños a la población	115
7.4	Comparación de los daños obtenidos con los del Plan SISMICAT	118
8	Resumen y conclusiones	123
8.1	Introducción	123
8.2	Vulnerabilidad	124
8.3	Daño físico basado en la zonación geotécnica	126
8.4	Daño físico basado en la microzonación sísmica	128
8.5	Daños a la población	130
8.6	Conclusiones	131
	Referencias	135
	Anexos	139

Lista de Figuras

Figura 2.1. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS-98.	20
Figura 2.2. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS-98 y definición de las funciones de pertenencia.	27
Figura 2.3. Factores de daño medio correspondientes a las matrices de probabilidad de daño definidas funciones de pertenencia.	29
Figura 2.4. Funciones de pertenencia a las clases de vulnerabilidad. Véase también la Tabla 2.10.	30
Figura 2.5. Funciones semiempíricas de vulnerabilidad para las diferentes tipologías de la matriz de tipos de edificios de Risk-UE.	31
Figura 3.1. Situación de la ciudad de Girona.	43
Figura 3.2. Mapa geológico de la ciudad de Girona (Fuente: Institut Cartogràfic de Catalunya)	45
Figura 3.3. Distritos y zonas censales de la ciudad de Girona	46
Figura 3.4. Barrios y sectores de la ciudad de Girona	46
Figura 3.5. Densidad de población del municipio de Girona según el distrito.	49
Figura 3.6. Población flotante versus población real del municipio de Girona.	49
Figura 4.1. Comparación entre el número de edificios de los censos de 1990 y 2001 según año de construcción y ubicación.	54
Figura 4.2. Representación de los edificios residenciales (vivienda), industriales y monumentos del municipio de Girona.	56
Figura 4.3. Número de edificios por periodos constructivos.	57
Figura 4.4. Distribución de edificios por periodos constructivos.	58
Figura 4.5. Número de edificios por barrios en función del número de plantas.	58
Figura 4.6. Distribución de los edificios residenciales según el número de plantas.	59
Figura 4.7. Distribución de los edificios de la ciudad en función del periodo de construcción.	60
Figura 5.1. Identificación de tipologías constructivas de Girona según periodo de construcción.	65
Figura 5.2. Distribución de las tipologías estructurales por barrios (B1: Nord, B2: Montjuïc, B3: Oest, B4: Est, B5: Centre, B6: Eixample, B7: Santa Eugènia, B8: Mas Xirgu y B9: Sud).	73
Figura 5.3. Índices de vulnerabilidad medios por barrio. a) todos los edificios de viviendas. b) edificios de mampostería. c) edificios de hormigón armado. d) edificios con estructura metálica.	81
Figura 5.4. Equivalencia entre las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 y los índices de vulnerabilidad.	83

Figura 5.5. Distribución de edificios en clases de vulnerabilidad asociadas a la distribución del índice de vulnerabilidad obtenida para los barrios del municipio de Girona.	84
Figura 5.6. Distribución de edificios en clases de vulnerabilidad asociados a la distribución del índice de vulnerabilidad obtenida para el municipio de Girona (Total de edificios: 9482).	85
Figura 6.1. Intensidades macrosísmicas para un periodo de retorno de 500 años: a) para un suelo medio y b) con efectos de suelo (Secanell, 1999).	89
Figura 6.2. Microzonación sísmica de Girona. Representación del coeficiente C.	90
Figura 6.3. Zonación geotécnica propuesta por Vendrell (2011).	91
Figura 6.4. Mapa de la microzonación sísmica de la ciudad de Girona.	94
Figura 6.5. Escenario sísmico para un T=500 años con efectos de suelo según la zonación geotécnica de Vendrell (2011).	96
Figura 6.6. Escenario sísmico para un T=500 años con efectos de suelo según la microzonación de Macau et al., (2012).	97
Figura 7.1. Zonas de estudio considerando los efectos de suelo de la zonación geotécnica de (Vendrell, 2011).	101
Figura 7.2. Distribuciones de los índices de vulnerabilidad (números en azul) y de la probabilidad de daño para cada ZDE	102
Figura 7.3. Distribución del grado de daño medio esperado por barrios según la zonación geotécnica de Vendrell (2011).	103
Figura 7.4. Distribución de daños de los barrios del municipio de Girona para el escenario sísmico basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).	104
Figura 7.5. Estimación de los edificios que podrían resultar inhabitables (NEI) en cada barrio según el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).	105
Figura 7.6. Distribución de las personas sin hogar (NPSH) que se esperan según el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).	107
Figura 7.7. Distribución de las (a) personas heridas y las (b) personas fallecidas que se esperan según el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).	108
Figura 7.8. Zonas de estudio considerando los efectos de suelo de la microzonación de Macau et al. (2012).	110
Figura 7.9. a) Distribuciones de los índices de vulnerabilidad (números en azul) y de la probabilidad de daño para cada barrio b) Distribución del grado de daño medio esperado por barrios según la microzonación sísmica de Macau et al. (2012).	111
Figura 7.10. Distribución de daños de los barrios del municipio de Girona para el escenario sísmico basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012).	112
Figura 7.11. Estimación de los edificios que podrían resultar inhabitables (NEI) en cada barrio según el escenario basado en la Microzonación sísmica (Irizarry et al., 2012).	114
Figura 7.12. Comparación del grado de daño medio para los barrios y el municipio de Girona según la microzonación sísmica y la zonación geotécnica.	114
Figura 7.13. Comparación del porcentaje de edificios inhabitables para los barrios y el municipio de Girona según la microzonación sísmica y la zonación geotécnica.	115

Figura 7.14. Distribución de las personas sin hogar (homeless) que se esperan según el escenario basado en la microzonación sísmica (Irizarry et al., 2012). 116

Figura 7.15. Distribución de las (a) personas heridas y las (b) personas fallecidas que se esperan según el escenario basado en la microzonación sísmica (Irizarry et al., 2012). 117

Figura 7.16. Distribución del grado de daño para el municipio de Girona según: (a) el plan SISMICAT, (b) actualización del SISMICAT con datos del 2001, (c) el escenario de Vendrell (2011) basado en la zonación geotécnica y (d) el escenario de Irizarry et al. (2012) basado en la microzonación sísmica. 119

Figura 8.1. Distribución de los edificios de cada barrio en clases de vulnerabilidad desde la menos vulnerable (D) a la más vulnerable (A). 125

Figura 8.2. Comparación del número de personas sin hogar, heridos y fallecidos que se esperan para el municipio de Girona según los escenarios considerados. 131

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Descripción simplificada de la Escala Macrosísmica Europea EMS-98	17
Tabla 2.2. Clasificación de los edificios en la escala MSK	18
Tabla 2.3. Clasificación de los edificios y clases de vulnerabilidad en la escala EMS-98 (Grünthal 1998)	19
Tabla 2.4. Grados de daño en la escala MSK-64	20
Tabla 2.5. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala MSK-64	20
Tabla 2.6. Grados de daño en la escala EMS-98 (Grünthal 1998).	22
Tabla 2.7. Completando una matriz de probabilidad de daño de la escala MSK-64	23
Tabla 2.8. Matriz de probabilidad de daño para edificios tipo A. Escala MSK-64	23
Tabla 2.9. Matrices de probabilidad de daño difusas propuestas en la escala EMS-98 para las clases de vulnerabilidad de edificios tipo C.	26
Tabla 2.10. Límites de las funciones de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad. Se indican los intervalos plausibles y posibles. Véase también Figura 2.4	30
Tabla 2.11. Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de tipologías de Risk-UE (Mouroux et al., 2004).	33
Tabla 2.12. Esquematación del procedimiento de evaluación práctica del índice de vulnerabilidad para edificios individuales y para grupos de edificios	34
Tabla 2.13. Procedimiento para el procesado de los datos.	35
Tabla 2.14. Modificadores de comportamiento para los edificios de mampostería	38
Tabla 2.15. Modificadores de comportamiento para los edificios de Hormigón Armado.	39
Tabla 2.16. Valores sugeridos para los intervalos de confianza del índice de vulnerabilidad ΔV_f .	39
Tabla 2.17. Coeficientes de víctimas humanas por terremotos para cada grado de daño, según el método ATC-13.	40
Tabla 3.1 Barrios y sectores de Girona.	47
Tabla 4.1. Número de edificios por periodo, número de plantas y situación en el territorio de los edificios de Girona. (Fuente: Censo de 2001. IDESCAT).	53
Tabla 4.2. Inventario de datos sobre los edificios de Girona. Fuente: UMAT.	55
Tabla 5.1. Matriz tipológica (BTM) de Girona y su correspondencia con la BTM de Risk-UE.	63
Tabla 5.2. Clasificación en periodos constructivos en base a criterio de experto.	65
Tabla 5.3. Distribución de tipologías en porcentajes para el barrio del Centre, total de edificios 1268.	69
Tabla 5.4. Distribución de edificios de vivienda por barrios según criterios de tipología y de altura.	70

Tabla 5.5. Principales tipologías de Girona con sus correspondientes índices de vulnerabilidad básicos.	76
Tabla 5.6. Valores propuestos para los modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad para las diferentes tipologías de Girona.	77
Tabla 5.7. Índices de vulnerabilidad parciales para cada tipología constructiva definida en el municipio de Girona	79
Tabla 5.8. Índice de vulnerabilidad medio de cada barrio.	80
Tabla 6.1 Rangos de la velocidad de onda de cizalla para las diferentes litologías presentes en el municipio de Girona (Macau et al., 2012).	93
Tabla 6.2 Comparación de las diferentes evaluaciones de los efectos de suelos para el municipio de Girona en términos del incremento de intensidad.	95
Tabla 7.1. Número de edificios de cada ZDE, su porcentaje respecto al total de los edificios de Girona y valor del daño medio esperado para cada ZDE y para el municipio en general (Vendrell, 2011).	102
Tabla 7.2. Población padrón y real de la base de datos de UMAT.	106
Tabla 7.3. Resumen del número de personas sin hogar, heridos y víctimas para el escenario obtenido para el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).	107
Tabla 7.4. Número de edificios, su porcentaje respecto al total de los edificios de Girona y valor del daño medio esperado para cada barrio y para el municipio en general según el escenario sísmico basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012).	112
Tabla 7.5. Resumen del número de personas sin hogar, heridos y víctimas para el escenario obtenido para el escenario basado en la microzonación sísmica (Macau et al., 2012).	118
Tabla 7.6. Comparación de la peligrosidad local, edificios inhabitables, edificios colapsados y personas sin hogar para los escenarios considerados.	120
Tabla 8.1. Edificios (%) según tipología y altura, e índices de vulnerabilidad. V_1 , para cada barrio.	124
Tabla 8.2. Número de edificios, distribuciones de los grados de daño de los edificios de Girona (en%) y valor del daño medio esperado para cada barrio según el escenario basado en la zonación geotécnica. El sumatorio de los valores de cada columna corresponde al 100% de los edificios del barrio.	127
Tabla 8.3. Número de edificios, distribuciones de los grados de daño de los edificios de Girona (en%) y valor del daño medio esperado para cada barrio según el escenario basado en la microzonación sísmica.	129

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La presente memoria muestra los principales resultados de un análisis del riesgo sísmico de la ciudad de Gerona. Se describe también la metodología usada. La evaluación del riesgo sísmico constituido por el análisis de la peligrosidad y de la vulnerabilidad y por la estimación de daños físicos es una herramienta indispensable para la reducción de los efectos que provocan los terremotos en la sociedad. Actualmente, existen diversas metodologías desarrolladas que permiten evaluar la vulnerabilidad y daño sísmico (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004); la aplicación de unas u otras dependerá del nivel de actividad sísmica y de la cantidad y la calidad de la información disponible de la ciudad o región donde se vaya a aplicar.

Este tipo de estudios y trabajos persiguen la simulación del impacto en la ciudad de escenarios sísmicos definidos de acuerdo a su peligrosidad y a su historia sísmica con el objetivo de proporcionar a las instituciones y a los servicios de protección civil conocimientos y elementos sólidos para la prevención y protección frente a terremotos y para la planificación de posibles emergencias sísmicas. La fiabilidad de estos estudios está en relación directa con la cantidad y calidad de datos de edificios y de población actualizados a la fecha del estudio. Cuando estos datos son de buena calidad los resultados pueden representarse a nivel de la división territorial más conveniente y al nivel de detalle que se precise.

En zonas de peligrosidad sísmica entre baja y moderada, como Cataluña, donde no suele haber tradición en el estudio del riesgo sísmico, las metodologías “sencillas” o “simplificadas” adquieren un especial protagonismo a la hora de realizar, con la información disponible, una evaluación preliminar del riesgo. Estas primeras evaluaciones pueden ser de gran utilidad a los responsables de la gestión municipal y, en particular, de los responsables de la protección civil, ya que contienen elementos útiles para el diseño de planes de emergencia sísmica y para definir normativas o medidas de prevención que ayuden a minimizar el riesgo existente.

En los últimos años se han desarrollado diversas herramientas que utilizan estas metodologías. La primera aplicación informática para realizar simulaciones de escenarios de daños en el territorio español se realizó en Cataluña para el Plan de Emergencias Sísmicas de Cataluña, SISMICAT (2003), (Susagna et al., 2006). A nivel nacional, se desarrolló el programa Simulación de Escenarios Sísmicos, SES (2002), utilizado por la Dirección General de Protección Civil, y realizado en colaboración con el Instituto Geográfico Nacional, que se inspiró de los trabajos llevados a cabo en el IGC.

En el ámbito del estudio del riesgo sísmico en Girona, sólo se tiene constancia del trabajo previo realizado por Chávez (1998). El 15 de Mayo del 1995 se produjo, en Catalunya, un terremoto de magnitud 4.3. Éste causó alarma en varias poblaciones de Cataluña, incluyendo Barcelona y estimuló el interés de las autoridades municipales sobre el peligro y riesgo sísmicos. Así, en el 2002, después del pertinente estudio, fue aprobado y homologado el Plan de Emergencia Sísmica de Catalunya (SISMICAT).

A nivel europeo, el proyecto ISARD: Información Sísmica Automática Regional de Daños (Goula et al., 2007) constituyó un proyecto de cooperación transfronteriza entre Francia y España realizado entre los años 2003 y 2007. En él se realizó un estudio conjunto en el Pirineo español y francés, incluyendo la *Cerdanya*, el *Principat d'Andorra*.

Más adelante, en el marco del proyecto europeo Risk-UE (*Advanced approach to earthquake risk scenarios with application to European towns*) (Mouroux et al., 2004), se completaron y mejoraron diversos estudios de riesgo sísmico de Barcelona, culminando en la Tesis Doctoral de Lantada (2007). De esta época son también estudios sobre el riesgo sísmico en la *Cerdanya* (Irizarry et al., 2007).

El proyecto SISPyR: Sistema de Información Sísmica para los Pirineos (INTERREG: POCTEFA 2007-2013/ 73/08) (Goula et al., 2010), es un proyecto de investigación europeo en el que, además del Instituto Geológico de Cataluña, coordinador del proyecto, y de la UPC, también participan la universidad de Toulouse III Paul Sabatier, el Centro Nacional de Información Cartográfica del IGN de Madrid y el BRGM de Montpellier. Los objetivos principales de dicho proyecto son el desarrollo de redes transfronterizas de observación sísmica, intercambio de datos e investigación sobre aspectos fundamentales de la sismicidad de los Pirineos y el desarrollo de

herramientas de evaluación del riesgo sísmico desarrolladas de forma conjunta por las partes francesa y española de los pirineos. Así, para desarrollar las herramientas de prevención del riesgo sísmico para las poblaciones que viven en un entorno pirenaico amplio se aplicarán los conocimientos desarrollados en proyectos anteriores, como Risk-UE e ISARD en zonas piloto; a casos como por ejemplo, la comarca de la *Vall d'Aran*, o a escala más local, la ciudad de Girona (objeto de este estudio).

1.2 Objetivos y metodología

El objetivo de este estudio ha sido la realización de la simulación del impacto de un escenario sísmico probabilista sobre los edificios de viviendas de la ciudad y sobre la población en el marco del proyecto SISPYR. El estudio se fundamenta en los datos proporcionados por la *Unitat Municipal d'Anàlisi Territorial (UMAT)* de Girona. La acción sísmica se considera en términos de intensidad macrosísmica, de acuerdo a la escala europea EMS-98 (Grünthal, 1998) y los edificios se caracterizan mediante índices de vulnerabilidad; es decir que se usan los métodos de primer nivel desarrollados en el marco del proyecto Risk-UE (Lantada, 2007; Milutinovic y Trendafiloski, 2003; Mouroux et al., 2004). De acuerdo a las especificaciones de la propuesta del proyecto, se ha considerado el escenario sísmico probabilista con efectos locales de suelo para un periodo de retorno de 500 años. Los resultados se dan a nivel de barrios y, para cada escenario, se efectúan mapas con la distribución geográfica del grado o estado de daño más probable. Los datos de población se usan para estimar escenarios de víctimas, heridos y personas sin hogar.

La metodología se ha implementado mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) que se ha adaptado a las características específicas de este estudio. Una vez identificadas las tipologías constructivas más representativas de la ciudad se ha procedido a la evaluación de la vulnerabilidad de los edificios a nivel de barrio. El método considera 6 grados o estados de daño: 0 Nulo o *No daño*, 1 *Leve*, 2 *Moderado*, 3 *Severo*, 4 *Extensivo* o *Generalizado* y 5 *Total* o *Colapso* y dispone de funciones semiempíricas que permiten relacionar la vulnerabilidad, la intensidad y el daño esperado. Así para cada edificio o conjunto de edificios y escenario se obtiene un grado o estado de daño medio. Hipótesis estadísticas permiten determinar las probabilidades de cada uno de los estados de daño a partir de este parámetro de daño medio. Las probabilidades de que ocurran los estados de daño *Severo*, *Generalizado* y *Colapso* son fundamentales para estimar los efectos del terremoto en la población, así

como para evaluar el volumen de escombros y el impacto económico del daño físico directo que el terremoto produce en los edificios de viviendas, aspectos todos ellos de gran importancia para una eventual planificación y gestión de la emergencia.

Los objetivos específicos de este estudio son los siguientes:

- Recopilar y filtrar la información necesaria para el estudio de riesgo sísmico referente a los censos de viviendas y de población, a partir de una base de datos SIG proporcionada.
- Realizar visitas de campo a la zona de estudio que permitan validar y ampliar la información recopilada anteriormente.
- Identificar las tipologías constructivas más representativas del municipio y adaptarlas a las tipologías Risk-UE, con la colaboración de técnicos locales.
- Asignar a cada tipología los índices de vulnerabilidad según la metodología de Nivel 1 de Risk-UE.
- Determinar la distribución de las tipologías en base a las unidades de estudio, considerando el periodo de construcción y la altura de cada uno de los edificios.
- Obtener y representar la vulnerabilidad para cada una las unidades de estudio y en global para el municipio de Girona.
- Integrar los efectos de suelo de la zonación geotécnica de Soler et al. (2012) usada por Vendrell (2011) y de la microzonación sísmica de Macau et al. (2012) para definir la peligrosidad local de los escenarios considerados.
- Evaluar los escenarios de daño sísmico para obtener la distribución de la probabilidad de daño para cada una las unidades de estudio y en global para el municipio de Girona.
- Integrar y estructurar topológicamente toda la información recopilada y los resultados en un sistema de información geográfica.

1.3 Contenido de la memoria

Se ha estructurado esta memoria técnica en 8 capítulos y 5 anexos. Tras esta breve introducción que constituye el Capítulo 1, el Capítulo 2 se dedica al método de estimación del daño físico directo, los modelos de los daños inducidos y al modelo que permite el impacto sobre la población que conlleva el daño físico esperado en los

edificios. El capítulo 3 y 4 describen respectivamente la ciudad y las bases de datos utilizadas. En el Capítulo 5 se analiza la vulnerabilidad sísmica del municipio de Girona y el capítulo 6 describe la peligrosidad sísmica de la zona de estudio y la obtención de los escenarios de peligrosidad local probabilista para los cuales se evaluarán los escenarios de daño sísmico. Los escenarios de daño sísmico se muestran y analizan en el Capítulo 7 incluyendo la estimación del daño a la población. En el Capítulo 8 se resumen los principales resultados referentes a la vulnerabilidad de los edificios de Girona, al daño esperado y a su impacto sobre la población, y se exponen las principales conclusiones que se derivan de los resultados obtenidos.

Los anexos contribuyen a dar una mayor exhaustividad y completitud a la información disponible. En el Anexo A se describen las tipologías constructivas del proyecto Risk-UE que han servido de base para identificar las tipologías estructurales más representativas del municipio de Girona que se muestran en las fichas del Anexo B. La distribución estadística de los edificios de cada barrio según estas tipologías, el periodo de construcción y el número de plantas se muestran en el Anexo C. En el Anexo D se muestran los porcentajes de cada tipología estructural en cada barrio del municipio. El Anexo E muestra los detalles de la microzonificación de la zona urbana de Girona aplicados para obtener el escenario probabilista con efectos de suelo.

2 Método de estimación del daño físico directo

2.1 El riesgo sísmico

Lantada (2007) describe las palabras y conceptos relacionados con el riesgo, que debe entenderse como la probabilidad de pérdida, en un sentido amplio, aunque, en general, se tiende a definir el riesgo en términos de coste económico. Para efectos de protección civil el análisis de riesgo sísmico debe centrarse en los daños esperados en la población; en cualquier caso el primer paso consiste en la estimación de daños en los edificios y, a partir de aquí, pueden evaluarse los efectos en la población, incluyendo víctimas, heridos y personas sin hogar y otros aspectos relacionados con el impacto socio-económico del terremoto. Así pues el riesgo se define a partir de una composición de probabilidades que se basan en frecuencias de ocurrencia de los fenómenos capaces de causar daño y en la frecuencia de daño causado. En el caso sísmico, el fenómeno es el terremoto. Cuando nos referimos a edificios, la evaluación del valor económico del daño se basa en consideraciones sobre los costes de la reparación y construcción en el lugar de estudio. Los escenarios sísmicos se han convertido en herramientas excelentes de estimación del riesgo en grandes ciudades, pues simulan la situación que se generaría en caso de ocurrir un determinado sismo. En este caso se postula un terremoto posible o probable y se analizan los aspectos de interés relacionados con las pérdidas potenciales. Existen diferentes formas de cuantificar los parámetros involucrados en los estudios de riesgo que, a efectos de este estudio, son el terremoto y el edificio. En este estudio el terremoto se define en términos de intensidad macrosísmica y el edificio en términos de vulnerabilidad.

2.1.1 Intensidad macrosísmica

La intensidad es un concepto que se introdujo antes de que existieran instrumentos capaces de registrar el movimiento del suelo y constituye una regla para medir la capacidad destructiva de un terremoto. Se suele acusar a este parámetro de subjetividad ya que sus grados se establecen a partir de la interpretación por parte del técnico que efectúa la evaluación, de la información recogida por observación directa y a partir de encuestas a la población. Con todo, el uso de la intensidad macrosísmica,

estadísticamente objetivada, es ampliamente aceptado por la comunidad científica. Desde el siglo XVI existen antecedentes de clasificaciones sencillas de los efectos causados por los terremotos. Desde entonces han existido diferentes escalas. Las más recientes de uso en Europa son las escalas MSK-64 y la EMS-98 (Grünthal, 1998). Ambas escalas tienen 12 grados. La Tabla 2.1 muestra una descripción simplificada de los 12 grados de esta escala.

2.1.2 Vulnerabilidad

La capacidad, la vulnerabilidad y la fragilidad son conceptos empleados para caracterizar la resistencia sísmica de los edificios y se suelen definir mediante una cantidad relacionada con el grado de daño que resulta de la ocurrencia de un movimiento sísmico. A pesar de que la vulnerabilidad, de alguna manera, está relacionada con el terremoto y con el daño esperado, ésta suele entenderse como una característica intrínseca del edificio o estructura, que depende únicamente de sus características de diseño y construcción. En este sentido cada estructura (o tipo de estructura) se puede caracterizar mediante un parámetro que cuantifica su capacidad resistente, la cual depende sólo de sus características y es independiente de la peligrosidad del lugar. La escala de intensidad MSK-64 es precursora del concepto de vulnerabilidad ya que, aunque no habla de vulnerabilidad, clasifica los edificios en base a sus características resistentes. La Tabla 2.2 muestra la descripción de las tres clases que van de menor a mayor resistencia sísmica.

La escala MSK-64 es revisada y actualizada mediante la Escala Macrosísmica Europea dando lugar a una versión preliminar publicada en 1992 (EMS-92). Esta primera versión se publica en su forma definitiva (EMS-98) en 1998 (Grünthal, 1998) incorporando sugerencias de la comunidad sismológica internacional. La escala EMS-98 mantiene la clasificación de los edificios pero incorpora, de forma explícita, el concepto de vulnerabilidad. La Tabla 2.3 muestra los tipos de edificios y las clases de vulnerabilidad en la escala EMS-98. Se observa cómo la nueva escala establece clases de vulnerabilidad, que definen clases características pero también admiten intervalos de pertenencia a otras clases de vulnerabilidad, definidos como rangos probables y posibles. Chávez (1998) utilizó clases de vulnerabilidad basadas en la escala EMS-98 para efectuar un estudio del riesgo sísmico de edificios de Cataluña. Este estudio se utilizó para elaborar el SISMICAT.

Tabla 2.1. Descripción simplificada de la Escala Macrosísmica Europea EMS-98

Grado EMS	Definición	Descripción de los efectos típicos observados
I	No sentido	No sentido.
II	Apenas notado	Notado sólo por muy pocas personas en reposo.
III	Débil	Notado por pocas personas en el interior. La gente en posición de reposo nota un bamboleo o temblor suave.
IV	Ampliamente observado	Notado por muchos en el interior de los edificios y por muy pocos en el exterior. Pocas personas se despiertan. Las ventanas y puertas crujen y la vajilla traquetea.
V	Fuerte	Notado en el interior por la mayoría y por pocos fuera. Unos pocos se asustan. Los edificios tiemblan. Los objetos colgados bambolean considerablemente. Se mueven objetos pequeños. Las puertas y ventanas balancean, se abren o cierran.
VI	Causa daños ligeros	Mucha gente se asusta y corre hacia el exterior. Algunos objetos caen. Muchas casas sufren daño ligero no estructural como pequeñas grietas y caída de enlucidos.
VII	Causa Daño	La mayoría de la gente se asusta y corre al exterior. Los muebles se mueven y caen muchos objetos de las estanterías. Muchos edificios ordinarios bien contruidos sufren daños moderados: pequeñas roturas en las paredes, caída de enlucidos, parte de las chimeneas caen; los edificios más antiguos pueden presentar grandes roturas en los muros y caída de tabiques.
VIII	Causa daño severo	Mucha gente tiene dificultad para mantener el equilibrio. Muchas viviendas tienen grandes roturas en las paredes. Unos pocos edificios ordinarios bien contruidos presentan fallos serios de los muros mientras que estructuras más viejas y débiles pueden colapsar.
IX	Destructivo	Pánico general. Muchas construcciones débiles colapsan. Incluso los edificios ordinarios bien contruidos presentan daño severo: fallos serios de los muros y fallo parcial de la estructura.
X	Muy destructivo	Muchos edificios ordinarios bien contruidos colapsan.
XI	Devastador	La mayoría de edificios bien contruidos colapsan y son destruidos incluso algunos con un buen diseño sismorresistente.
XII	Totalmente devastador	Casi todos los edificios sufren destrucción.

Giovinazzi (2005) efectúa un tratamiento matemático riguroso de estas funciones de pertenencia utilizando la teoría de los conjuntos difusos. Esta formulación, permitió caracterizar los edificios mediante un índice de vulnerabilidad único, fue adoptada por el proyecto Risk-UE y se utilizará en este trabajo.

Tabla 2.2. Clasificación de los edificios en la escala MSK

TIPO	DESCRIPCIÓN
A	Con muros de mampostería en seco o con barro, de adobe, de tapial.
B	Con muros de fábrica de ladrillo, de bloques de mortero, de mampostería con mortero, de sillarejo, de sillería, entramados de madera.
C	Con estructura metálica o de hormigón armado.

2.1.3 El daño

Otro concepto fundamental es el daño. La escala MSK-64 considera 5 grados o clases de daño. Si consideramos el grado o estado de daño nulo, resulta en 6 grados de daño que llamamos respectivamente: sin daño (grado 0), ligero (grado 1), moderado (grado 2), grave o severo (grado 3), destrucción o generalizado (4) y colapso (grado 5). La Tabla 2.4 muestra la descripción de los estados de daño en la escala MSK-64 (Mézcuca 1982). La escala EMS-98 usa los mismos grados o estados de daño. La Tabla 2.1 muestra la descripción de los estados de daño en la escala EMS-98. En la descripción de los diferentes grados de intensidad, ambas escalas describen cualitativamente los niveles de daño esperados.

Hay que tener en cuenta que esta descripción del daño esperado se basa en observaciones a lo largo de, por lo menos, más de un siglo. Por lo tanto, ambas escalas proporcionan una buena “instantánea” del escenario sísmico esperado. Una de las mejoras incorporadas por las escalas MSK-64 y EMS-98, respecto a escalas anteriores, consiste en definir también los términos de cantidad “*algunos*”, “*muchos*” y “*la mayoría*”. La Tabla 2.5 muestra las equivalencias entre los términos y las cantidades utilizadas para cuantificar los daños en la escala MSK-64; la Figura 2.1 muestra la propuesta de equivalencias en la escala EMS-98.

Tabla 2.3. Clasificación de los edificios y clases de vulnerabilidad en la escala EMS-98 (Grünthal 1998)

TIPO DE ESTRUCTURA		CLASE DE VULNERABILIDAD					
		A	B	C	D	E	F
Mampostería	Cascotes. Piedras del campo.	○					
	Adobe (ladrillos de barro).	○—					
	Piedras pequeñas, sencillas.	—○					
	Piedras grandes, masivas.		—○—				
	No reforzada, con unidades de piedra manufacturadas.	—○—					
	No reforzada, con forjados de Hormigón armado.		—○—	○—			
	Reforzada o confinada.			—○—	○		
Hormigón Armado	Estructura sin diseño sismorresistente.	—○—					
	Estructura con un nivel moderado de diseño sismorresistente.		—○—				
	Estructura con un nivel alto de diseño sismorresistente.		—○—	—○—			
	Muros sin diseño sismorresistente.			○—			
	Muros con un nivel moderado de diseño sismorresistente.				○—		
	Muros con un nivel alto de diseño sismorresistente.				—○—		
Metal	Estructuras Metálicas.			—○—			
Madera	Estructuras de Madera.		—○—				

○ Clase de vulnerabilidad más probable. — Rango probable.

■ ■ ■ ■ | Rango de casos excepcionales menos probables.

Tabla 2.4. Grados de daño en la escala MSK-64

Daños ligeros:	
Grado 1	<i>fisuras en los revestimientos. Caída de pequeños trozos de revestimiento.</i>
Daños Moderados:	
Grado 2	<i>Fisuras en los muros, Caída de grandes trozos de revestimiento, Caída de tejas, Caída de pretilas, Grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales en las mismas.</i>
Daños graves:	
Grado 3	<i>Grietas en los muros, Caída de chimeneas de fábrica o de otros elementos externos.</i>
Destrucción:	
Grado 4	<i>Brechas en los muros resistentes. Derrumbamiento parcial Pérdida del enlace entre distintas partes de la construcción Destrucción de tabiques y muros de cerramiento.</i>
Colapso:	
Grado 5	<i>Ruina completa de la construcción.</i>

Tabla 2.5. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala MSK-64

Algunos	5%
Muchos	50%
La mayoría	75%

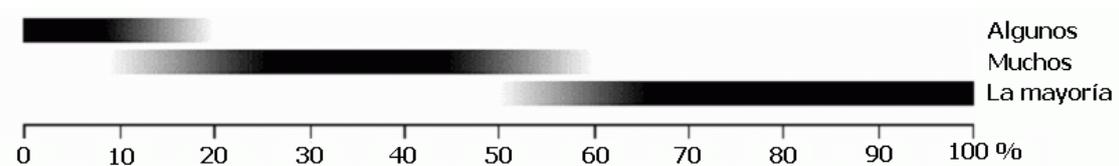


Figura 2.1. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS-98.

La ecuación 2-1) define la distribución binomial que depende del número de estados de daño, N , y de un parámetro, d , que puede tomar valores entre 0 y 1.

$$P_k(N, d) = \frac{(N-1)!}{(N-1-k)!k!} d^k (1-d)^{N-1-k} \quad k = 0 \dots (N-1) \quad (2-1)$$

En nuestro caso, considerando $N=6$, correspondiente al número de estados de daño, incluyendo el estado de daño nulo, la ecuación (2-2) se transforma en:

$$P_k(6, d) = \frac{(5)!}{(5-k)!k!} d^k (1-d)^{5-k} \quad k = 0 \dots 5 \quad (2-2)$$

donde k , indica el grado de daño considerado. Como se ha indicado anteriormente, la distribución de probabilidad, conocido el número de estados de daño, N , queda completamente determinada por el parámetro d . d toma valores entre 0 y 1. Si definimos el parámetro $d^* = (N-1) \times d$, d^* representa el estado de daño medio.

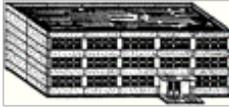
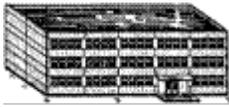
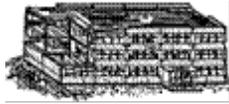
Así, $d=d^*=0$ representa una probabilidad 1 del estado de daño *Nulo* (0) y 0 para los otros estados. Un valor de $d=1$ indica un valor $d^*=5$ y una probabilidad de 1 para el estado de daño de *Colapso* (5) y una probabilidad nula para los otros estados de daño. Valores intermedios entre 0 y 1 para d , y entre 0 y 5 para d^* , indican una distribución de daño. De esta forma d^* determina de forma única la distribución de las probabilidades de daño. La ecuación (2-2) puede, por tanto, utilizarse para completar las matrices que, de una forma incompleta, se deducen de la descripción de los grados de intensidad. Ilustramos el procedimiento con un ejemplo.

Consideremos el grado de intensidad VII y la clase de edificios tipo A. La escala MSK-64 describe de la siguiente manera los daños sufridos:

*“Muchas construcciones del tipo A sufren daños graves (clase 3)
y algunas incluso destrucción (clase 4)”*

La cuantificación de los términos de cantidad de la Tabla 2.5 nos permiten asignar los valores 0.50 y 0.05 a los grados de daño clase 3 y clase 4. Entonces variamos el parámetro d en la ecuación (2-2) hasta que las sumas de las probabilidades de los estados de daño *Grave* y *Destrucción* o coinciden, como en este caso (0.55), o son comparables. Esto ocurre para el parámetro $d=0.5553$. La Tabla 2.7 ilustra este procedimiento. Es importante destacar de nuevo el significado físico del parámetro d^* . Si multiplicamos d por 5, obtenemos $d^*=2.8$. Es decir nos da el grado o estado de daño medio que, en este caso, se sitúa en el estado de daño *grave* (3) ligeramente escorado hacia estados de daño menores.

Tabla 2.6. Grados de daño en la escala EMS-98 (Grünthal 1998).

Clasificación del daño en los edificios de mampostería	Clasificación del daño en los edificios de hormigón armado
<p>Grado 1: daño leve</p> <p><i>(Sin daño estructural; daño no estructural leve).</i> Grietas finas en muy pocas paredes. Caída de pequeños trozos del yeso o enlucido. En muy pocos casos se produce la caída de piedras sueltas de las partes altas del edificio.</p> 	<p>Grado 1: daño leve</p> <p><i>(Sin daño estructural; leve daño no estructural)</i></p> <p>Grietas finas en el yeso sobre los elementos estructurales en la base de las paredes. Grietas en las paredes de separación y de relleno.</p> 
<p>Grado 2: Daño moderado</p> <p><i>(Daño estructural leve; daño no estructural moderado).</i> Grietas en muchas paredes. Caída de trozos bastante grandes del yeso.</p> 	<p>Grado 2: Daño moderado</p> <p><i>(Daño estructural leve; daño no estructural moderado).</i> Grietas en las columnas, vigas y muros estructurales. Grietas en las paredes de relleno. Caída de trozos de yeso y de mortero de las juntas de las paredes.</p> 
<p>Grado 3: Daño severo.</p> <p><i>(Daño estructural moderado, considerable daño no estructural.)</i> Grandes grietas en la mayoría de las paredes. Tejas del tejado sueltas. Rotura de las chimeneas al nivel del suelo. Rotura de elementos no estructurales individuales (particiones, hastiales, etc.)</p> 	<p>Grado 3: Daño severo.</p> <p><i>(Daño estructural moderado, considerable daño no estructural.)</i> Roturas en las columnas y en las juntas viga-columna a nivel del suelo. Deformación del acero de refuerzo. Grandes grietas en las paredes de relleno y caída de paneles de relleno aislados.</p> 
<p>Grado 4: Daño muy severo.</p> <p><i>(Daño estructural severo, daño no estructural muy severo).</i> Roturas graves en los muros. Derrumbe estructural parcial de suelos y techos.</p> 	<p>Grado 4: Daño muy severo.</p> <p><i>(Daño estructural severo, daño no estructural muy severo.)</i> Grandes grietas en los elementos estructurales con fallos a compresión del hormigón; fallo de las uniones de las vigas. Deformación de las columnas. Colapso de algunas columnas o de algún piso superior.</p> 
<p>Grado 5: Destrucción</p> <p><i>(Daño estructural muy severo)</i></p> <p>Colapso total o casi total del edificio.</p> 	<p>Grado 5: Destrucción</p> <p><i>(Daño estructural muy severo)</i></p> <p>Colapso del primer piso o partes del edificio.</p> 

Podemos proceder de manera análoga para completar las matrices de probabilidad de daño correspondientes a todas las tipologías de edificios previstas en la escala MSK-64. La Tabla 2.8 muestra la matriz de probabilidad de daño para los edificios de tipo A. Se han resaltado los campos correspondientes a la información tomada de la escala MSK-64. La escala MSK-64 no describe daños para los edificios tipo C, hormigón armado, para intensidades inferiores a VIII tendiendo a subestimar el daño en este tipo de edificios debido a la novedad constructiva que supuso en su momento y a la escasez de historia sísmica de los mismos.

Tabla 2.7. Completando una matriz de probabilidad de daño de la escala MSK-64

Edificios Tipo A		
Grado de daño	Intensidad	
	VII	VII
Nulo (0)		0.02
Ligero (1)		0.11
Moderado (2)		0.27
Grave (3)	0.50	0.34
Destrucción (4)	0.05	0.21
Colapso (5)		0.05

$d=0.5553, d^*=2.78$

Tabla 2.8. Matriz de probabilidad de daño para edificios tipo A. Escala MSK-64

Edificios Tipo A					
Grado de daño	Intensidad				
	VI	VII	VIII	IX	X
Nulo (0)	0.42	0.02	0.00	0.00	0.00
Ligero (1)	0.40	0.11	0.02	0.00	0.00
Moderado (2)	0.15	0.27	0.12	0.02	0.00
Grave (3)	0.03	0.34	0.30	0.11	0.03
Destrucción (4)	0.00	0.21	0.37	0.37	0.22
Colapso (5)	0.00	0.05	0.18	0.50	0.75
d^*	0.80	2.78	3.55	4.35	4.72

2.2 El método del índice de vulnerabilidad

El proyecto Risk-UE elaboró metodologías de análisis de riesgo específicas para Europa que, aunque tienen aspectos comunes, son diferentes de otros métodos, promovidos y propuestos en otras regiones y países, como por ejemplo Hazus-99 (FEMA/NIBS, 2002) que fue diseñado para ser aplicado en los Estados Unidos. El proyecto Risk-UE contempla dos tipos de aproximación al análisis del riesgo sísmico, el primero, llamado dentro del proyecto como método de nivel I, considera el escenario sísmico en términos de intensidad; mientras que el segundo lo considera en términos espectrales.

El nivel I, al que nos referiremos como *método del índice de vulnerabilidad*, es específico y típico de Europa y recoge la experiencia de los estudios de riesgo sísmico basados en índices de vulnerabilidad, factores de daño y matrices de probabilidad de daño, permitiendo el estudio de escenarios de riesgo, de forma relativamente sencilla, y considerando la intensidad sísmica como parámetro que define la acción sísmica. Este método que se inspira en y desarrolla los métodos basados en las escalas de intensidad es el que se ha aplicado en este estudio y se describe brevemente a continuación

2.2.1 Perspectiva general

Este método se basa en la Escala Macrosísmica Europea, EMS-98 (Grüntal, 1998) que define un modelo de vulnerabilidad implícito al definir matrices de daño cualitativas. Al igual que otras escalas de intensidad, el modelo de la EMS-98 es impreciso e incompleto y usa elementos de la teoría de conjuntos difusos para tratar la ambigüedad y la incompletitud de la información sobre el daño. A partir del daño sísmico observado, los edificios se clasifican en clases de vulnerabilidad de forma que diferentes tipos de edificios pueden presentar comportamiento y daño sísmicos similares. La correspondencia entre las clases de vulnerabilidad y la tipología de los edificios es también difusa y probabilista, en el sentido que cada tipo de edificio se caracteriza mediante la clase de vulnerabilidad más probable y unos intervalos o rangos de vulnerabilidad posible y menos probable (ver Tabla 2.3 que muestra las clases de vulnerabilidad y los tipos de edificios).

El método propuesto en Risk-UE introduce un índice de vulnerabilidad para representar y cuantificar la pertenencia a una determinada clase de vulnerabilidad. Así pues, este método utiliza: 1) matrices de probabilidad de daño (DPM) y 2) funciones de vulnerabilidad semiempíricas medias (MVF). Las DPM definen la probabilidad de ocurrencia de determinado grado de daño, modelando las matrices cualitativas propuestas en la EMS-98 para cada clase de vulnerabilidad mediante distribuciones Beta que se ajustan de forma que sean equivalentes a una distribución binomial. Las MVF relacionan el grado de daño medio para las diferentes clases de vulnerabilidad con la intensidad macrosísmica y el índice de vulnerabilidad. Así pues el método define clases e índices de vulnerabilidad para todos los edificios considerados en la Matriz de tipologías de edificios propuesta por Risk-UE, así como matrices de probabilidad de daño (DPM). El método facilita también directrices y esquemas de modificación de los índices de vulnerabilidad propuestos, atendiendo a la cantidad y calidad de información disponible así como a las características específicas de los edificios analizados.

2.2.2 Clases, índices de vulnerabilidad y funciones de daño

Las clases de vulnerabilidad agrupan tipos de edificios que pueden ser diferentes pero que se caracterizan por un comportamiento sísmico similar. La escala EMS-98 (Grüntal, 1998) define seis clases de vulnerabilidad denotadas con las letras comprendidas entre la A y la F, ambas incluidas, y en orden de vulnerabilidad decreciente. Cada clase de edificio se asocia con una relación entre la intensidad del terremoto y el daño experimentado. Cada tipo de edificio es caracterizado por la clase de vulnerabilidad predominante pero, de acuerdo con las características estructurales de los edificios, se pueden definir otras clases de vulnerabilidad, posibles y menos probables, en el mismo tipo de edificio.

Risk-UE (Mouroux et al., 2004) ha desarrollado un método simplificado que, de alguna manera, contiene los métodos anteriores basados en índices de vulnerabilidad e índices y funciones de daño y los de matrices de probabilidad de daño, que a su vez se basaban en las escalas de intensidad y tipologías de edificios o clases de vulnerabilidad.

Como hemos visto más arriba, las escalas de intensidad en general, y la EMS-98 en particular, definen matrices de probabilidad de daño de forma imprecisa e incompleta. La imprecisión proviene de la definición de las cantidades en forma cualitativa (pocos o algunos, muchos y la mayoría), mientras que la falta de completitud proviene de que los diferentes grados de intensidad no describen los daños esperados para todas las tipologías. Como ejemplo, la Tabla 2.9 muestra la descripción que la escala EMS-98 da de las cantidades de edificios de las clases de vulnerabilidad C que se espera sufran un determinado grado de daño para cada intensidad. Estas descripciones definen matrices de probabilidad de daño incompletas e imprecisas, ya que las cantidades correspondientes a las descripciones: pocos, muchos y la mayoría, se definen de forma difusa.

Tabla 2.9. Matrices de probabilidad de daño difusas propuestas en la escala EMS-98 para las clases de vulnerabilidad de edificios tipo C.

Intensidad	Grado de Daño				
	1	2	3	4	5
V					
VI	Algunos				
VII		Algunos			
VIII		Muchos	Algunos		
IX			Muchos	Algunos	
X				Muchos	Algunos
XI					Muchos
XII					La mayoría

Estas definiciones cualitativas de las cantidades en la escala EMS-98 se interpretan mediante funciones de pertenencia χ que definen la afiliación de cada valor de cantidad individual a una categoría determinada; es decir, para $\chi=1$, la pertenencia es segura o plausible, para χ comprendido entre 0 y 1 el valor del parámetro es raro pero posible y para $\chi=0$, el parámetro no pertenece al conjunto. Estas funciones de pertenencia se definen en base a las recomendaciones de la misma escala EMS-98. La Figura 2.2 muestra estas funciones, que a su vez definen 4 puntos límite de asignación de cantidades.

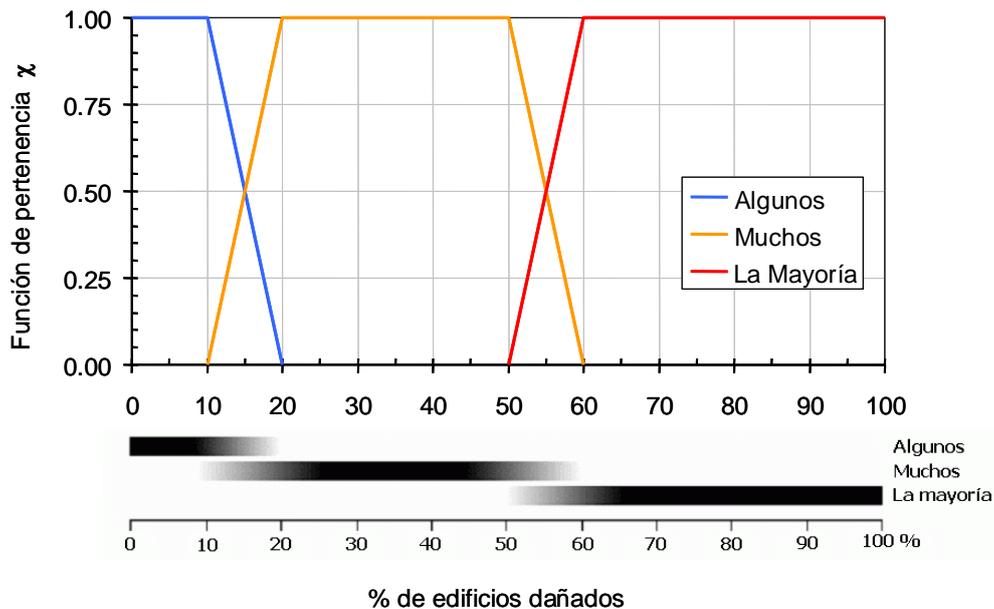


Figura 2.2. Cuantificación de los términos de cantidad en la escala EMS-98 y definición de las funciones de pertenencia.

Por ejemplo en el caso de la función de pertenencia a la categoría *Muchos*, los puntos (10,0), (20,1), (50,1) y (60,0) definen los límites de separación entre la *no pertenencia* por defecto (menos de 10); la *pertenencia* posible pero poco probable por defecto, (entre 10 y 20), la *pertenencia* segura (entre 20 y 50), la *pertenencia* posible pero poco probable por exceso (entre 50 y 60) y la *no pertenencia* por exceso (por encima de 60). De este modo, para cada tipología podemos definir hasta cuatro posibles matrices de probabilidad de daño que ya no son difusas aunque siguen siendo incompletas.

Las matrices de probabilidad de daño se completan haciendo la hipótesis de que siguen alguna distribución de probabilidad, la misma escala EMS-98 indica la binomial, y se representan mediante el factor de daño medio tal como ha sido definido más arriba. Risk-UE adopta la función de distribución Beta por considerar que es una función más versátil, pero ajusta los parámetros de forma que sea equivalente a la distribución binomial. Así, para cada tipología y para cada intensidad, podemos definir hasta cuatro posibles matrices de probabilidad correspondientes a los límites de no pertenencia y de pertenencia posible por defecto, a la pertenencia segura y a la pertenencia posible y a la no pertenencia por exceso.

Por ejemplo, para la clase de vulnerabilidad C podemos denotar estos valores como C--, C-, C+ y C++. Ahora la compleción de la matriz de probabilidad de daño se efectúa considerando que las probabilidades de los estados de daño (0-nulo, 1, 2, 3, 4, 5-destrucción) siguen la distribución continua Beta cuya función de densidad de probabilidad viene dada por:

$$p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q)\Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad \text{para } a \leq x < b \quad (2-3)$$

a , b , t y q son los parámetros de la distribución y x es la variable continua que varía entre a y b . El parámetro t está relacionado con la dispersión de la distribución y se toma $t=8$; ya que para este valor la distribución Beta es compatible con la distribución binomial. Además, es preciso hacer referencia al grado de daño que, en nuestro caso, es una variable discreta caracterizada por 5 valores, además del grado nulo (ausencia de daño). Asignando el valor 0 al parámetro a y 5 al parámetro b , el recorrido de la función va entre 0 y 5 cubriendo el grado de daño nulo y los 5 estados de daño no nulo. Finalmente Milutinovic y Trendafiloski (2003) establecen que los parámetros de la distribución Beta, q y t , y el grado de daño medio $d^*=\mu_D$, están relacionados mediante la ecuación:

$$q = t(0.007\mu_D^3 - 0.052\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad (2-4)$$

La probabilidad, $P_{\beta}(x)$, de que se iguale o exceda el estado de daño x , viene dada por la integral entre a y x de la función $p_{\beta}(x)$, es decir:

$$P_{\beta}(x) = \int_a^x p_{\beta}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2-5)$$

y, finalmente, la probabilidad del estado de daño k ($k=0\dots 5$) se define por la ecuación:

$$p_k = P_{\beta}(k+1) - P_{\beta}(k) \quad k = 0, \dots, 5 \quad (2-6)$$

La Figura 2.3 muestra el daño esperado en función de la intensidad para los edificios tipo A, B, C, D, E y F. Para cada clase se han considerado los límites de definición de los intervalos que definen las funciones de pertenencia de la Figura 2.2.

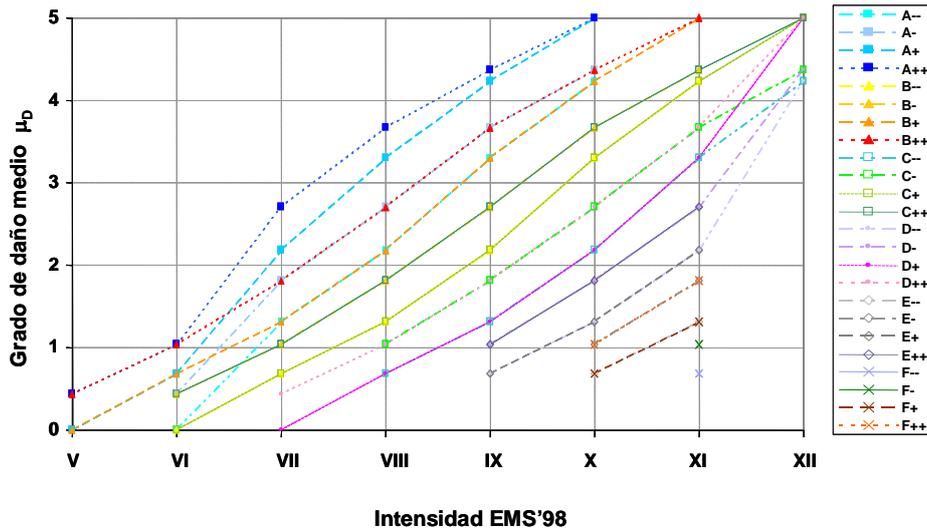


Figura 2.3. Factores de daño medio correspondientes a las matrices de probabilidad de daño definidas funciones de pertenencia.

Giovinazzi (2005) propone una función que relaciona el factor de daño medio $\mu_D=d^*$, la intensidad y un parámetro representativo de la vulnerabilidad y usa las curvas de la Figura 2.3 para calibrar los parámetros de la función, que queda definida mediante la Ecuación 2-7.

$$\mu_D = d^* = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25V_I - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (2-7)$$

donde I es la intensidad macrosísmica, V_I es un índice de vulnerabilidad característico del edificio y $\mu_D=d^*$ es el grado de daño medio definido más arriba.

Ahora, la pertenencia de un edificio a una clase específica de vulnerabilidad se puede definir también mediante un índice de vulnerabilidad. Los valores de este índice representan puntuaciones que cuantifican el comportamiento sísmico del edificio. La Figura 2.4 muestra las funciones de pertenencia de las clases de vulnerabilidad definidas en la escala EMS-98, en términos del índice de vulnerabilidad.

La Tabla 2.10 muestra los límites que definen estas funciones de pertenencia. Se observa cómo el índice de vulnerabilidad oscila entre 0 y 1 siendo los valores cercanos a 1 los que corresponden a los edificios más vulnerables, mientras que los valores cercanos a cero corresponden a los menos vulnerables; es decir a aquellos edificios diseñados con un alto grado de protección macrosísmica.

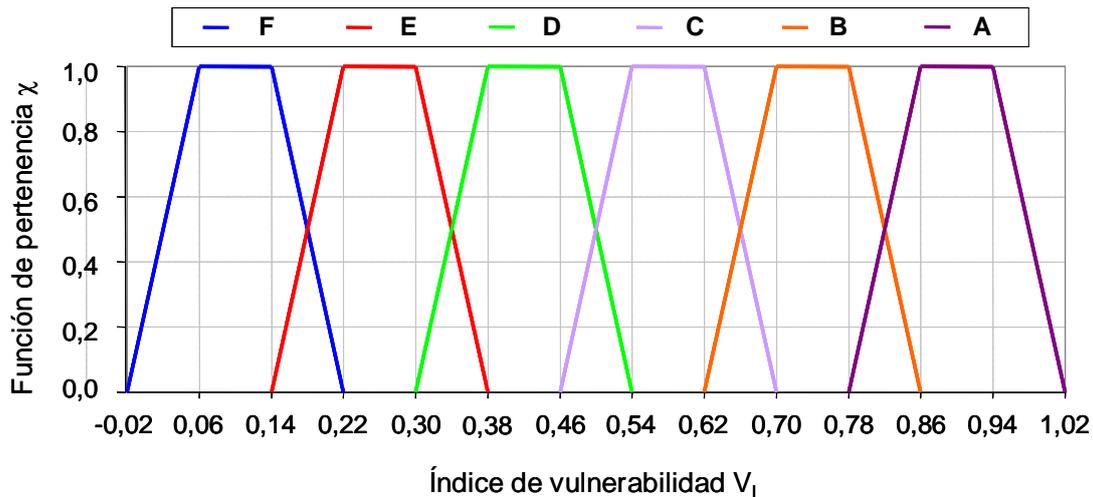


Figura 2.4. Funciones de pertenencia a las clases de vulnerabilidad. Véase también la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Límites de las funciones de pertenencia a cada clase de vulnerabilidad. Se indican los intervalos plausibles y posibles. Véase también Figura 2.4

Clases de vulnerabilidad	Límites del índice de vulnerabilidad V_I			
	V_I^{min}	V_I^-	V_I^+	V_I^{max}
A	0.78	0.86	0.94	1.02
B	0.62	0.70	0.78	0.86
C	0.46	0.54	0.62	0.70
D	0.30	0.38	0.46	0.54
E	0.14	0.22	0.30	0.38
F	-0.02	0.06	0.14	0.22

El manual técnico de Risk-UE propone índices de vulnerabilidad específicos para los edificios considerados en su matriz de tipologías. Para cada tipo de edificio considera hasta 4 índices. El más probable ($\chi=1$), el posible ($\chi=0.6$) y el menos probable ($\chi=0.2$) de esta forma, para cada tipo de edificio se calculan los siguientes índices de vulnerabilidad: V_I^{min} , V_I^- , V_I^* , V_I^+ y V_I^{max} ; V_I^* es el valor más probable, $[V_I^- V_I^+]$ definen el intervalo plausible del índice; estos dos valores suelen ser aquellos en los que la función de pertenencia vale 0.5; finalmente $[V_I^{min} V_I^{max}]$ son los límites inferior y superior de los índices de vulnerabilidad que se consideran posibles. La Figura 2.5 presenta las tipologías de edificios y las funciones de vulnerabilidad correspondientes. La Tabla 2.11 muestra los índices de vulnerabilidad.

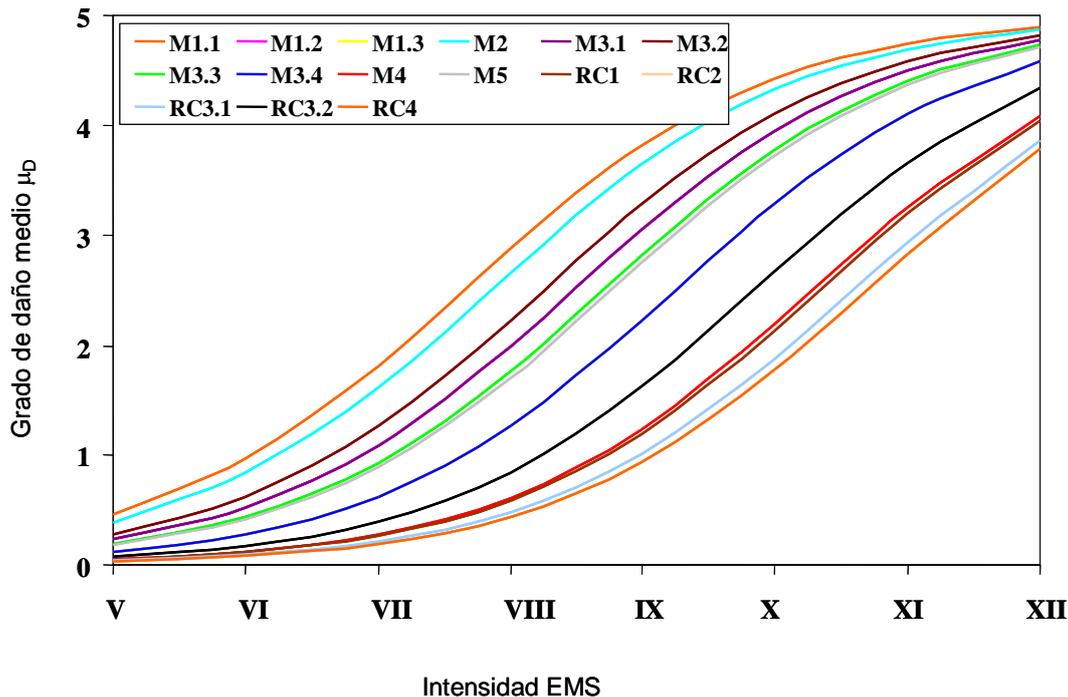


Figura 2.5. Funciones semiempíricas de vulnerabilidad para las diferentes tipologías de la matriz de tipos de edificios de Risk-UE.

2.2.3 Directrices de aplicación del método

A continuación se resume el procedimiento de aplicación de la metodología descrita.

PASO 1 Estimación del índice de vulnerabilidad.

El primer paso del procedimiento, supuesto que se conoce la tipología de cada edificio o su distribución en grupos de vulnerabilidad, consiste en evaluar el índice de vulnerabilidad. El índice final consta de un índice previsto en la Tabla 2.11 para cada tipo de edificio y uso de modificadores que permiten adaptar el método a las peculiaridades de nuestros edificios. La Tabla 2.12 esquematiza el procedimiento.

PASO 2 Evaluación del grado de daño medio μ_D

Conocido el índice de vulnerabilidad V_I^* y la intensidad I , el grado de daño medio μ_D se estima mediante la ecuación (2-7), que se repite aquí para mayor claridad.

$$\mu_D = 2.5 \left[1 + \tanh \left(\frac{I + 6.25\sqrt{V_I} - 13.1}{2.3} \right) \right] \quad (2-7) \text{ repetida}$$

Estimación de la distribución del daño

PASO 3

Conocido el grado de daño medio μ_D se puede estimar la distribución de probabilidad de daño suponiendo que sigue la función Beta mediante las ecuaciones (2-3), (2-4), (2-5) y (2-6), que también se repiten a continuación:

PDF:

$$p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(q)\Gamma(t-q)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{t-q-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad \text{para } a \leq x < b \quad (2-3) \text{ (repetida)}$$

$$a=0; b=6; t=8; \quad q = t(0.007\mu_D^3 - 0.052\mu_D^2 + 0.2875\mu_D) \quad (2-4) \text{ (repetida)}$$

CDF:

$$P_{\beta}(x) = \int_a^x p_{\beta}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2-5) \text{ (repetida)}$$

La función de densidad de probabilidad discreta Beta se calcula a partir de las probabilidades asociadas a los grados de daño k y $k+1$ ($K=0,1,2,3,4,5$) mediante la siguiente ecuación. La función de densidad de probabilidad discreta Beta se calcula a partir de las probabilidades asociadas a los grados de daño k y $k+1$, mediante la siguiente ecuación:

$$p_k = P_{\beta}(k+1) - P_{\beta}(k) \quad k = 0, \dots, 5 \quad (2-6) \text{ (repetida)}$$

Finalmente, puede también calcularse la curva de fragilidad que define la probabilidad de que se alcance o exceda un determinado grado de daño directamente a partir de la distribución de probabilidad Beta acumulativa mediante la siguiente ecuación:

$$P(D \geq D_k) = 1 - P_{\beta}(k) \quad (2-8)$$

Tabla 2.11. Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de tipologías de Risk-UE (Mouroux et al., 2004).

Tipología	Descripción	Índices de vulnerabilidad representativos				
		V_I^{min}	V_I^-	V_I^*	V_I^+	V_I^{max}
M1.1	Cascotes y piedras (Rubble stone, fieldstone)	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
M1.2	Piedra sencilla (Simple stone)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M1.3	Sillería (Massive stone)	0.30	0.49	0.616	0.793	0.86
M2	Adobe (Adobe)	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
M3.1	Suelos de madera (Wooden slabs)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
M3.2	Paredes de mampostería (Masonry vault)	0.46	0.65	0.776	0.953	1.02
M3.3	Forjados mixtos de acero y mampostería (Composite steel and masonry slabs)	0.46	0.527	0.704	0.83	1.02
M3.4	Forjados de losas de hormigón armado (Reinforced concrete slabs)	0.30	0.49	0.616	0.793	0.86
M4	Muros de mampostería confinados o reforzados (Reinforced or confined masonry walls)	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
M5	Totalmente reforzada (Overall strengthened)	0.30	0.49	0.694	0.953	1.02
RC1	Estructura de Hormigón (Concrete Moment Frames)	-0.02	0.047	0.442	0.8	1.02
RC2	Muros de cortante de hormigón (Concrete shear walls)	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC3.1	Muros de relleno regulares (Regularly infilled walls)	-0.02	0.007	0.402	0.76	0.98
RC3.2	Estructuras irregulares (Irregular frames)	0.06	0.127	0.522	0.88	1.02
RC4	Sistemas duales de Hormigón armado (RC Dual systems - RC frame and wall)	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC5	Hormigón pre-colado (Precast Concrete Tilt-Up Walls)	0.14	0.207	0.384	0.51	0.7
RC6	Estructuras de hormigón pre-colado, muros de contante de homigón (Precast C. Frames, C. shear walls)	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
S1	Estructuras de acero (Steel Moment Frames)	-0.02	0.467	0.363	0.64	0.86
S2	Estructuras atirantadas de acero (Steel braced Frames)	-0.02	0.467	0.287	0.48	0.7
S3	Metálicas con relleno de mampostería (Steel frame unreinf. mas. infill walls)	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
S4	Metálicas con muros de cortante de hormigón (Steel frame+cast-in-place shear walls)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
S5	Sistemas compuestos de metal y Hormigón armado (Steel and RC composite system)	-0.02	0.257	0.402	0.72	1.02
W	Estructuras de madera (Wood structures)	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Tabla 2.12. Esquematización del procedimiento de evaluación práctica del índice de vulnerabilidad para edificios individuales y para grupos de edificios

	Edificio único		Conjunto de edificios
V_I^*	Tipología V*I BTM	Valores de la Tabla 2.12	$V_{I_{BTM}}^* [Grupo] = \sum_t q_t \cdot V_{I_{BTM}}^* [S.b.]$ <p>q_t es la proporción de edificios dentro del grupo de edificios suponiendo que pertenecen a cierto tipo de edificios. $V_{I_{BTM}}^* [S.b.]$ es el índice de vulnerabilidad del edificio solo.</p>
	Categoría V*I C	$V_{I_{cat} i}^* = \sum_t p_t \cdot V_{I_{BTM} t}^*$ <p>p_t es la proporción de edificios dentro de la categoría C_i suponiendo que pertenece a cierto tipo de edificio.</p>	$V_{I_{cat}}^* [Set] = \sum_c q_c \cdot V_{I_{cat}}^* [S.b.]$ <p>q_c es la proporción de edificios dentro del conjunto suponiendo que pertenecen a cierta categoría de edificios.</p>
ΔV_m	Tipología / Categoría	$\Delta V_m = \sum V_m$	$\Delta V_m = \sum_k r_k V_{m,k}$ <p>r_k es la proporción de edificios caracterizados por el factor modificador k, con puntuación $V_{m,k}$</p>
ΔV_R	Tipología / Categoría	ΔV_R Establecido sobre la base de un juicio experto o a partir de de datos de vulnerabilidad observada.	$\Delta V_R = \sum_t r_t \Delta V_{Rt}$ <p>donde r_t es la proporción de edificios reconocidos como pertenecientes a la tipología específica afectada por el ΔV_{Rt} correspondiente..</p>
$\bar{V}_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m$			

2.3 Análisis de vulnerabilidad

Cada edificio (tipología) o conjunto de edificios (categoría) se caracteriza mediante un índice de vulnerabilidad total al que contribuyen un índice básico que se modifica para tener en cuenta las peculiaridades específicas de la región (modificador regional) y las del edificio (modificador de comportamiento). Así pues el índice de vulnerabilidad se calcula como sigue:

$$V_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_c \quad (2-9)$$

V_I^* es el índice básico, ΔV_R es el modificador regional y ΔV_C es el modificador de comportamiento. Un buen análisis de vulnerabilidad requiere considerar todas las bases de datos disponibles que hagan referencia a los edificios, clasificando la información disponible desde un punto de vista geográfico y consistente. La Tabla 2.13 esquematiza el procedimiento para la recopilación y procesado de los datos y para la asignación de la vulnerabilidad. Debe considerarse todo el conocimiento sobre vulnerabilidad observada así como sobre las técnicas de construcción tradicional. La distribución regional y la cantidad y la calidad de la información disponible influyen en todos los parámetros involucrados en el análisis de vulnerabilidad.

Tabla 2.13. Procedimiento para el procesado de los datos.

Características de los datos disponibles			Consecuencias
Geográfica	Unidad mínima del levantamiento	Edificio único	Unidad mínima de referencia para la evaluación de V_I^*
		Conjunto de edificios	
	Unidad mínima geocodificada.	Edificio único.	Unidad mínima para la representación del daño y de los escenarios.
		Conjunto de edificios.	
Calidad	Origen de los datos.	Levantamiento específico con el propósito de análisis de vulnerabilidad.	ΔV_f
		Otros orígenes	
	Consistencia de los datos.	Identificaciones tipológicas.	V_I
		Identificación de modificadores de comportamiento	ΔV_m
Conocimiento preexistente	Vulnerabilidad observada.		ΔV_r
	Juicio experto.		

2.3.1 Identificación de tipologías

Cuando se pueda identificar directamente la tipología de un edificio dentro de la BTM, los valores del índice de vulnerabilidad (V_I^* , V_I^- , V_I^+ , V_{Imin} , V_{Imax}) se asignan de forma unívoca de acuerdo a la propuesta de la Tabla 2.11.

Si los datos disponibles no son suficientes para realizar una identificación individual de la tipología de cada edificio, se suelen definir categorías más generales, basándose en la experiencia y en el conocimiento de las costumbres y tradiciones constructivas. En cualquier caso se supone conocida la distribución de la tipología dentro de las categorías. Entonces, para cada categoría, los valores del índice de vulnerabilidad (V_I^* , V_I^- , V_I^+ , V_I^{\min} , V_I^{\max}) se evalúan conociendo el porcentaje de los diferentes tipos de edificios que se consideran en la categoría considerada.

$$V_{I_{CAT}i}^* = \sum_t p_t V_{I_{BTM}i}^* \quad (2-10)$$

donde p_t es la razón de edificios incluidos dentro de la categoría C_i , supuesto que pertenecen a un determinado tipo de edificio.

2.3.2 Modificadores de vulnerabilidad

Una vez definido el índice de vulnerabilidad típico del edificio o clase de edificios, se puede modificar en función de las características específicas del edificio o conjunto de edificios considerado. Risk-UE propone dos tipos de modificadores: el modificador regional y el modificador de comportamiento.

El Factor de Vulnerabilidad Regional, ΔV_R , considera la calidad particular de determinados tipos de edificios a nivel regional. Este factor modifica el índice de vulnerabilidad V_I^* basándose en el juicio experto o considerando la vulnerabilidad observada. La corrección regional ΔV_R puede introducirse haciendo referencia a un edificio concreto o a un conjunto de edificios.

Existen diversos métodos que evalúan un edificio mediante un valor medio ponderado de la suma de puntuaciones parciales que califican su resistencia sísmica. En la práctica estos métodos equivalen a la propuesta de un índice de vulnerabilidad. Risk-UE propone un procedimiento similar, introduciendo modificadores por comportamiento. La Tabla 2.14 y la Tabla 2.15 muestran las propuestas de modificadores del índice de vulnerabilidad respectivamente para edificios de mampostería y de hormigón armado.

La puntuación total que modifica el índice de vulnerabilidad característico V_i^* puede evaluarse, para cada edificio, sumando todas las puntuaciones de los modificadores; es decir:

$$\Delta V_m = \sum V_m \quad (2-11)$$

Para un conjunto de edificios, suponiendo que pertenecen a una cierta tipología, las contribuciones de cada factor individual se suman, ponderando con la razón de edificios del conjunto:

$$\Delta V_m = \sum r_k V_{m,k} \quad (2-12)$$

donde r_k es la razón de edificios caracterizado por el factor modificador k con una puntuación $V_{m,k}$.

2.3.3 Evaluación del intervalo de incertidumbre ΔV_f

El conocimiento de información adicional limita la incertidumbre del comportamiento del edificio. Por lo tanto es aconsejable no solo modificar el valor más probable sino también reducir el intervalo de valores representativos. Este objetivo se alcanza modificando las funciones de pertenencia mediante una función de filtro (f) centrada en el valor más probable (V_{Idef}), dependiendo de la anchura de la función filtro ΔV_f . La anchura ΔV_f depende del tipo de datos disponibles para el análisis de la vulnerabilidad (ver Tabla 2.16).

Los límites superior e inferior del rango significativo de comportamiento pueden evaluarse como sigue:

$$V_{Isup} = \overline{V_I} + \Delta V_f \quad (2-13)$$

$$V_{Iinf} = \overline{V_I} - \Delta V_f \quad (2-14)$$

entonces V_{Idef} se calcula como sigue:

$$V_{Idef} = \max(V_{Iinf}; V_i^{\min} + \Delta V_f) \quad (2-15)$$

$$V_{Idef} = \min(V_{Isup}; V_i^{\max} - \Delta V_f) \quad (2-16)$$

donde V_i^{\min}, V_i^{\max} son los límites de las funciones de pertenencia.

Tabla 2.14. Modificadores de comportamiento para los edificios de mampostería

Factores de comportamiento	Parámetros	Puntuaciones
Estado de conservación	Buen mantenimiento	-0.04
	Mal mantenimiento	+0.04
Altura o número de pisos	Bajo (Low) (1 or 2)	-0.02
	Mediano (Medium) (3, 4 or 5)	+0.02
	Alto (High) (6 o más)	+0.06
Sistema estructural	Espesor de los muros	-0.04 ÷ +0.04
	Distancia entre paredes	
	Conexión entre las paredes (Barras de unión (tie-rods), soportes en las esquina (angle bracket))	
	Conexión horizontal estructura-muros	
Piso blando	Demolición/ Transparencia, diáfana	+0.04
Irregularidad en planta	...	+0.04
Irregularidad en altura	...	+0.02
Pisos superpuestos		+0.04
Tejado	Peso del tejado y acometida del tejado	+0.04
	Conexiones con el tejado	
Intervenciones de Reparación		-0.08 ÷ +0.08
Dispositivos antisísmicos	(Barbican), Láminas de refuerzo (Foil arches), Contrafuertes (Buttresses)	
Edificios en conjuntos: posición	Medio	-0.04
	Esquina	+0.04
	Frontal (Header)	+0.06
Edificios en conjuntos: elevación	Pisos escalonados	+0.02
	Edificios de altura diferente	-0.04 ÷ +0.04
Fundamentos	Fundamentos a diferentes niveles	+0.04
Morfología del suelo	Pendiente	+0.02
	Acantilado	+0.04

2.4 Daños a la población

Como consecuencia del deterioro y daño físico causado por el terremoto en los edificios se produce daño a la población que los habita, se generan escombros que dificultan la movilidad de personas y vehículos y se inducen considerables pérdidas económicas que lastran la recuperación de la sociedad. Para estimar el número de víctimas se utiliza el modelo propuesto por ATC-13 (ATC, 1985) y el número de personas sin hogar se estimará a partir del número esperado de edificios inhabitables y la ocupación media de los edificios.

Tabla 2.15. Modificadores de comportamiento para los edificios de Hormigón Armado.

Factores de comportamiento	Nivel de diseño sismo resistente		
	Pre o código de bajo nivel (Pre or Low Code)	Código de nivel medio. (Medium code)	Código de alto nivel (High Code)
Nivel de Código	+0.16	0	-0.16
Mal mantenimiento	+0.04	+0.02	0
Número de pisos	Bajo (1 ó 2)	-0.04	-0.04
	Medio (3, 4 ó 5)	0	0
	Alto (6 ó más)	+0.08	+0.06
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	+0.02
	Torsión	+0.02	+0.01
Irregularidad vertical	+0.04	+0.02	0
Columna corta	+0.02	+0.01	0
Ventanas en arco (Bow windows)	+0.04	+0.02	0
Edificios en conjuntos (con juntas asísmicas insuficientes)	+0.04	0	0
Fundamentos	Vigas (Beams)	-0.04	0
	Vigas conectadas (Connected Beams)	0	0
	Apoyo aislado (Isolated Footing)	+0.04	0
Morfología del suelo	Pendiente	+0.02	+0.02
	Acantilado	+0.04	+0.04

Tabla 2.16. Valores sugeridos para los intervalos de confianza del índice de vulnerabilidad ΔV_f .

ΔV_f	Tipología/ Categoría	Edificio	Grupo de
		aislado	edificios
	No existe una base de datos específica	0.08	0.08
	Datos levantados con el propósito de análisis de vulnerabilidad sísmica	0.04	0.04

En este apartado se describen los modelos de daño a la población, empezando con la estimación de lesiones producidas por el terremoto en las personas. Entre las personas dañadas, el modelo de lesiones que se presenta permite diferenciar cuatro categorías de víctimas: 1) heridos leves, 2) heridos graves y 3) víctimas mortales.

2.4.1 Víctimas

La ocurrencia de víctimas humanas, como consecuencia de la acción de terremotos, está directamente relacionada con el daño físico sufrido por los edificios en los que reside la población. Por lo tanto, los datos básicos para su estimación, son las probabilidades de ocurrencia de los estados de daño así como la densidad y distribución de la población en el instante en que ocurre el terremoto. Es muy importante conocer o estimar el número de personas que hay en cada edificio afectado, lo que a su vez depende no sólo del número de habitantes y del número de viviendas sino también de la estación del año, del día de la semana y de la hora en la que ocurre el terremoto. Detalles sobre la estimación de la distribución de víctimas en función del tipo de edificio, del tipo de terremoto y del momento en que éste ocurre, están bien descritos en Vacareanu *et al.* (2004). La metodología ATC-13 estima el porcentaje de víctimas para un escenario sísmico; es decir, para cada grado de daño experimentado por las edificaciones (Tabla 2.17). Los escenarios tienen en cuenta sólo la población residente y se considera que el terremoto ocurre de noche de un día laborable, es decir, que la población se halla en sus lugares de residencia.

Tabla 2.17. Coeficientes de víctimas humanas por terremotos para cada grado de daño, según el método ATC-13.

Grado de daño	Coeficientes del estado físico de las víctimas		
	Heridos leves	Heridos graves	Víctimas mortales
1	3.3/10000	1.1/25000	1.1/100000
2	3/1000	1/2500	1/10000
3	3/100	1/250	1/1000
4	3/10	1/25	1/100
5	2/5	2/5	1/5

2.4.2 Personas sin hogar

Otro de los aspectos importantes de una catástrofe, además de las personas que pueden resultar muertas o heridas de diversa gravedad, es el número de personas que quedan sin hogar, NPSH. Este número es una cifra que debe tenerse muy en cuenta a la hora de diseñar estrategias y planes de emergencia, ya que será necesario habilitar espacios para alojarlas durante un determinado período de tiempo.

Una vivienda se considera arruinada o inhabitable cuando su nivel de degradación impide su uso normal como hogar por lo que se asume que todos los edificios con grados de daño 4 y 5 son inhabitables así como la mitad de los que pueden presentar grado de daño 3.

El número de personas sin hogar depende directamente de la relación entre la población total de la unidad de trabajo y del total de edificios en la misma según la ecuación que se muestra a continuación:

$$NPSH = NEI \left[\frac{\text{habitan tes}}{\text{edificios}} \right] \quad (2-17)$$

donde NEI es el número de edificios inhabitables y que se estima de la siguiente manera:

$$NEI = NE [p_5 + p_4 + 0.5p_3] \quad (2-18)$$

Donde NE es el numero de edificios en la unidad de trabajo y p_k representa la probabilidad de daño para el grado de daño k.

3 Girona

3.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar el ámbito del estudio, el municipio de Girona. No obstante cabe destacar que no se pretende hacer una descripción exhaustiva de sus características geográficas, geológicas, sino que, de forma sintética, se presentan los factores más característicos que permitan contextualizar el estado del municipio como sus características morfológicas, la organización del territorio y su población. Estos factores pueden ser de gran utilidad para poder interpretar los resultados obtenidos posteriormente en el estudio de vulnerabilidad.

3.2 Geografía y geología

La ciudad de Girona, capital de la provincia homónima, está situada en el nordeste de España, en Catalunya (Figura 3.1). En la ciudad, confluyen cuatro ríos (Ter, Onyar, Güell y Galligans), encajado en el único paso que las formaciones montañosas de las Guillerries y las Gavarres dejan entre las comarcas de La Selva y del Empordà.



Figura 3.1. Situación de la ciudad de Girona.

El municipio tiene una extensión de 39.2 km² que se caracteriza por un relieve irregular donde la parte más antigua de la ciudad se emplaza sobre un terreno considerablemente accidentado y la parte más moderna en la llanura fluvial. La altura de Girona sobre el nivel del mar varía según el lugar de la ciudad en que nos encontremos de forma considerable.

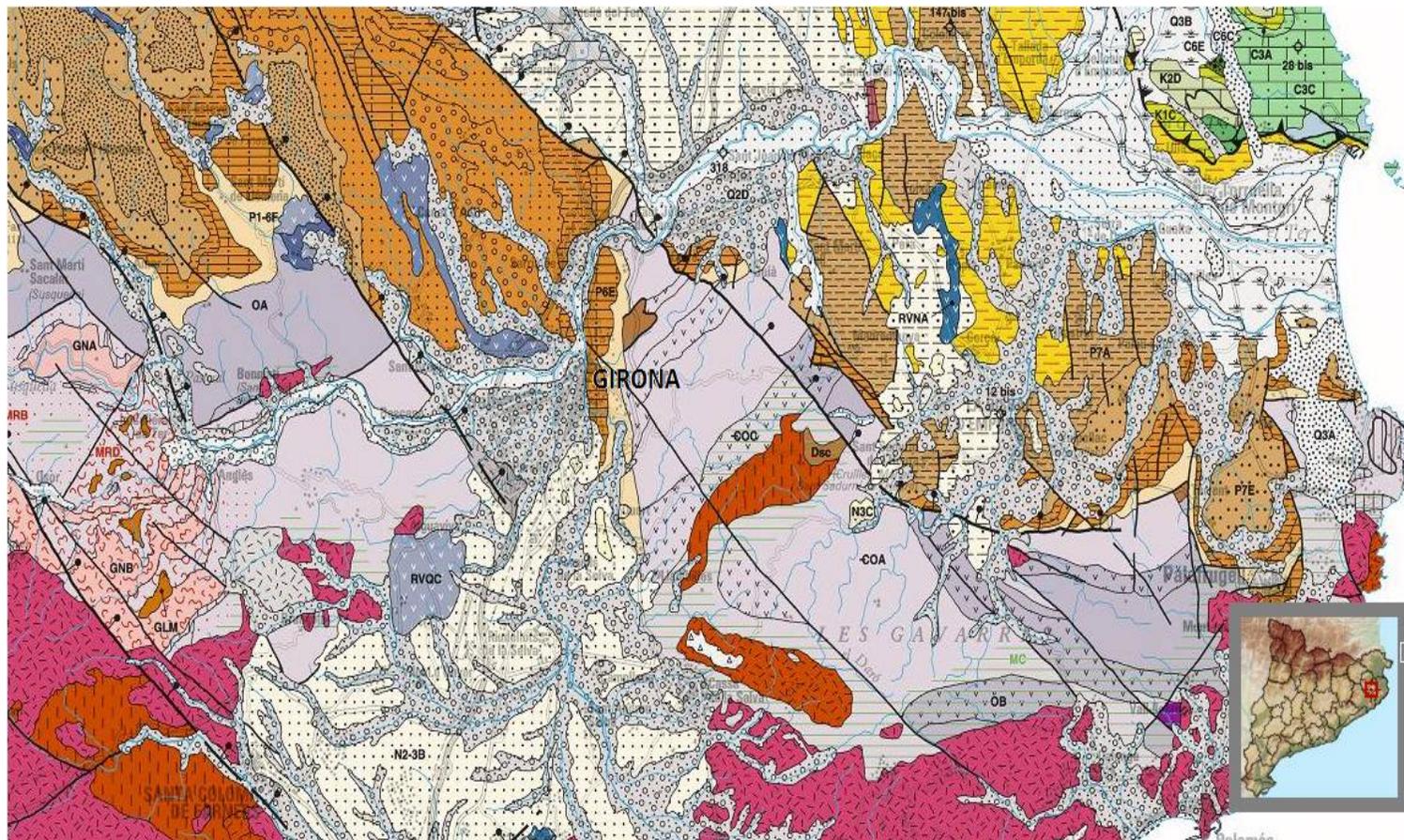
En referencia a la geología, el *Gironès* contiene una llanura central, donde está situada la ciudad de Girona, y como se comentaba anteriormente, rodeada al noroeste por la sierra de *Rocaborda*, al sureste por las *Gavarres* y la Sierra Litoral y al suroeste por las planas que se extienden hasta el río Ter. Al sureste aparecen unas rocas paleozoicas constituidas por esquistos. Las fallas de dirección NW-SE delimitan una serie de bloques sucesivamente más hundidos en dirección levante. A través de las fallas afloran materiales volcánicos que forman parte del grupo de Olot. Al Sur del Valle del Ter se extiende la prolongación de la llanura del *Baix Empordà*, constituida por flysch. Las fallas ocasionan la formación de pequeños afloramientos basálticos (Figura 3.2). En esta llanura hay el macizo de les *Gavarres*, constituido por materiales paleozoicos, fundamentalmente esquistos silurianos i algún afloramiento de calcárea devónica (Soler et al., 2012).

3.3 Divisiones administrativas del municipio

UMAT clasifica territorialmente la ciudad de Girona siguiendo dos criterios básicos:

1. Desde el punto de vista del censo poblacional (Figura 3.3): en 4 distritos, subdivididos en secciones o zonas censales.
2. Desde el punto de vista de evolución en la construcción: en 9 barrios, subdivididos en 31 sectores (Figura 3.4).

La división en distritos y secciones no es homogénea en cuanto a tipologías estructurales. Para la realización de este estudio, interesa encontrar criterios que unifiquen los edificios en tipologías estructurales, por lo que hay que tomar un tipo de división para facilitar el trabajo. Por este motivo, se ha preferido considerar la segunda división administrativa, es decir considerando los barrios y sectores. Así, se consideran 9 unidades de estudio coincidentes con los nueve barrios definidos (Figura 3.6): *Nord*, *Sud*, *Est*, *Oest*, *Centre*, *Montjuic*, *Eixample*, *Santa Eugènia* y *Mas Xirgu*. Además, en la Tabla 3.1 se indican los diferentes sectores en los que se subdividen los barrios.



Llegenda

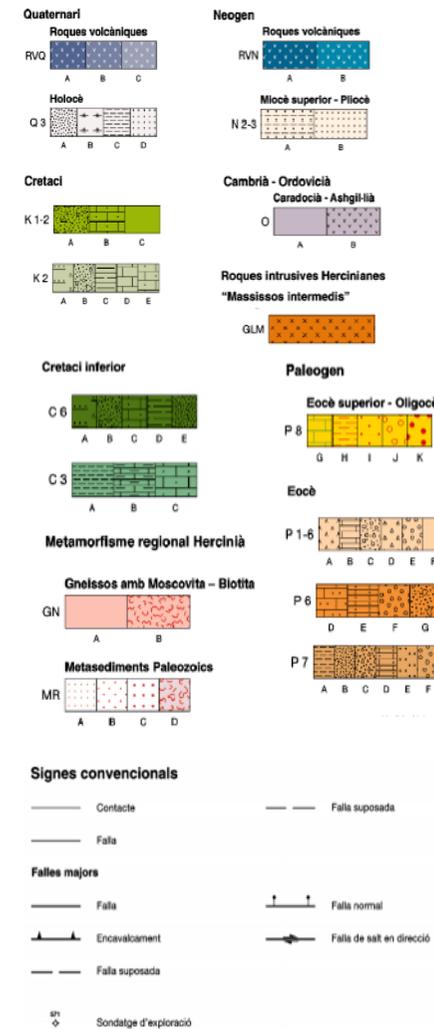


Figura 3.2. Mapa geològic de la ciutat de Girona (Fuente: Institut Cartogràfic de Catalunya)

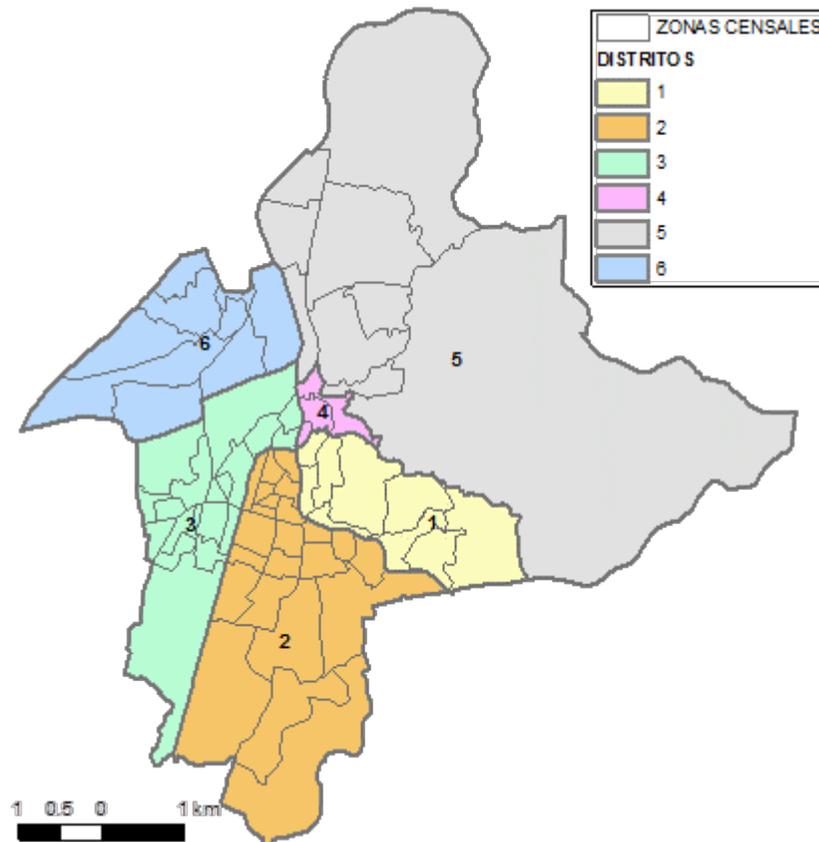


Figura 3.3. Distritos y zonas censales de la ciudad de Girona

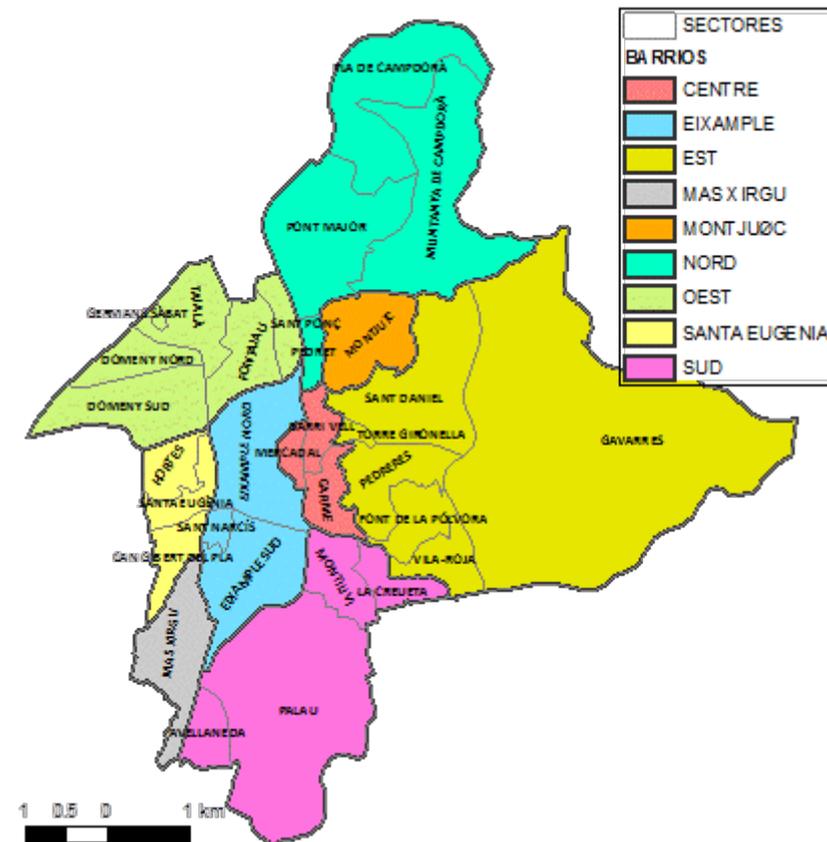


Figura 3.4. Barrios y sectores de la ciudad de Girona

Tabla 3.1 Barrios y sectores de Girona.

BARRIO:	SECTOR
Nord	<i>M. de Campdorà</i>
	<i>Pont Major</i>
	<i>Pedret</i>
	<i>Pla Campdorà</i>
Montjuïc	<i>Montjuïc</i>
Oest	<i>Sant Ponç</i>
	<i>Germans Sàbat</i>
	<i>Taialà</i>
	<i>Fontajau</i>
	<i>Domeny Nord</i>
	<i>Domeny Sud</i>
Mas Xirgu	<i>Mas Xirgu</i>
Est	<i>Font de la Pólvora</i>
	<i>Vila-Roja</i>
	<i>Sant Daniel</i>
	<i>Torre Gironella</i>
	<i>Pedrerres</i>
	<i>Gavarres</i>
Centre	<i>Barri Vell</i>
	<i>Carme</i>
	<i>Mercadal</i>
Eixample	<i>Eixample Nord</i>
	<i>Sant Narcís</i>
	<i>Eixample Sud</i>
Sud	<i>Montilivi</i>
	<i>Palau</i>
	<i>La Creueta</i>
	<i>Avellaneda</i>
Santa Eugènia	<i>Santa Eugènia</i>
	<i>Can Gibert del Pla</i>
	<i>Hortes</i>

3.4 Población

El análisis de la población de la zona de estudio es uno de los parámetros básicos para comprender su situación social y económica. Además el conocimiento de la población y de su distribución sobre el territorio es indispensable para llevar a cabo uno de los objetivos principales de cualquier estudio de riesgo: salvar vidas humanas.

La estimación del número de víctimas, entendiendo como víctimas tanto las personas heridas como fallecidas o del número de personas que podrían perder su vivienda a causa de un terremoto, es clave en el diseño de los planes de emergencia. No obstante, en general, la documentación existente sobre el número de víctimas en terremotos pasados es limitada y poco precisa. Por otro lado, la información existente resulta de difícil comparación, debido a que las consecuencias de un terremoto dependen del lugar y del momento en que éste se produce.

Para una correcta evaluación del daño a la población es necesario que la información referente a ésta se corresponda con la información del parque de edificios. En este sentido, la información sobre edificios es actualizada cada diez años; siendo la actualización vigente la realizada el año 2001. Como consecuencia de ello, la información sobre la población necesaria se ha obtenido del censo de este año 2001 (*Institut d'Estadística de Catalunya, IDESCAT*).

En la Figura 3.5 se muestra la densidad de población en (hab/ km²) de los distintos barrios que forman la ciudad de Girona. La densidad media de habitantes de Girona es de 3000hab/km². Por otra parte, se ha planteado un escenario con información más actualizada facilitada por UMAT. A continuación se expone la población permanente según el censo del 2001, así como también el flujo poblacional según los datos facilitados por UMAT.

Según el censo del 2001, la población censada en el municipio de Girona es de 95.674 personas, siendo los barrios de *Centre*, *Eixample* y *Santa Eugènia*, los más poblados, con unas densidades entre 10000 y 20000 hab/km². Mientras que la población flotante asciende a 122267 personas, entendido como tal, el contingente demográfico compuesto por aquellas personas que, aun no estando oficialmente inscritas en el censo de población, reside, de forma temporal o permanente provoca un aumento del 28%. En la Figura 3.6 se indica la diferencia entre ambos parámetros y se observa el fuerte impacto de la población flotante en barrios como por ejemplo, *Oest*, *Centre* y *Eixample*.

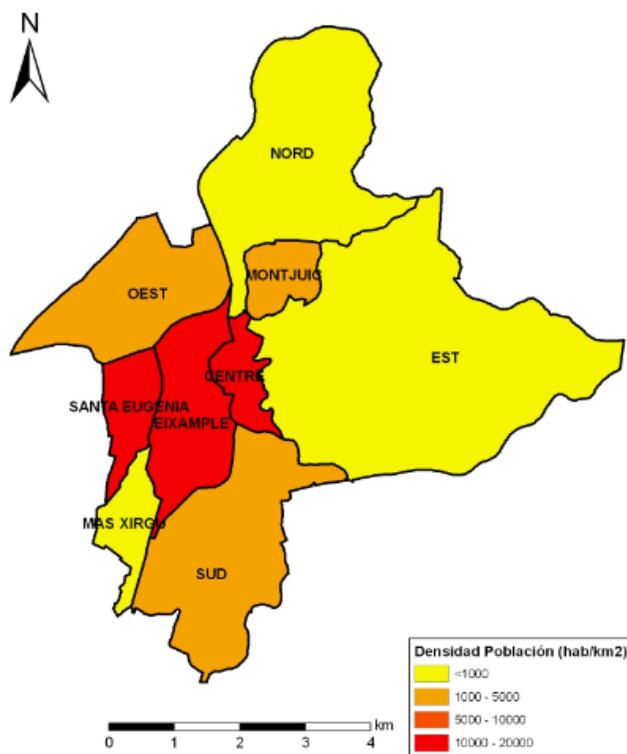


Figura 3.5. Densidad de población del municipio de Girona según el distrito.

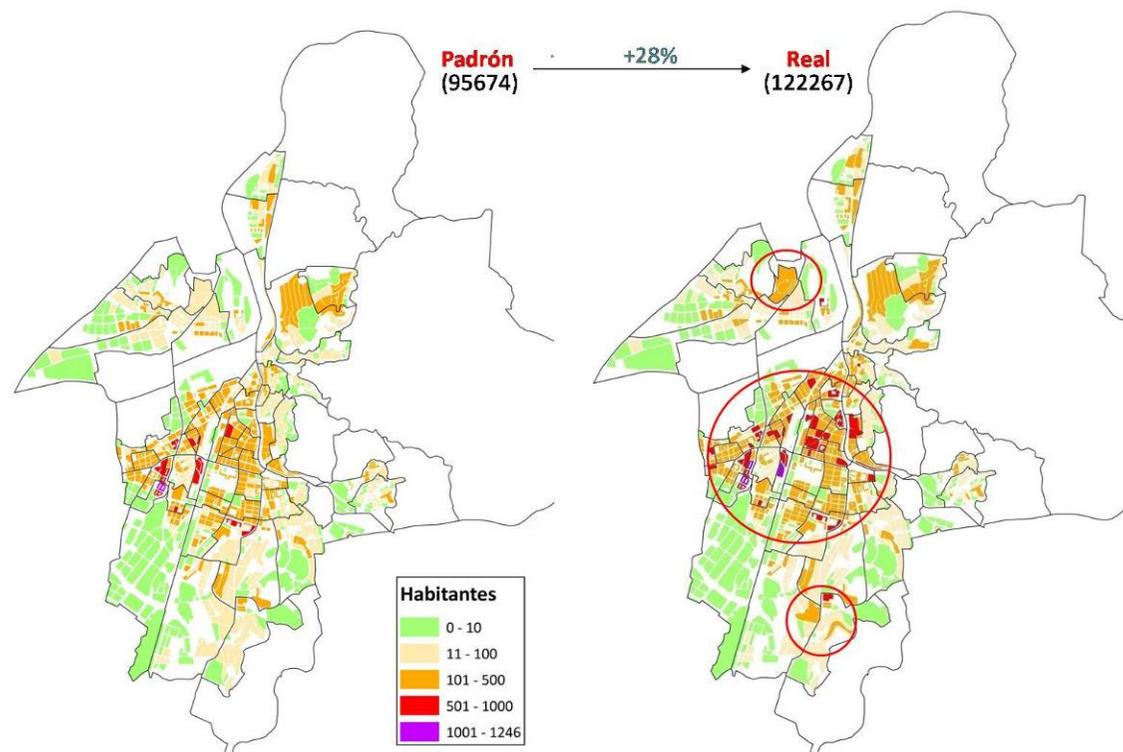


Figura 3.6. Población flotante versus población real del municipio de Girona.

4 Los datos

4.1 Introducción

Los resultados de un estudio de riesgo son altamente sensibles, dado que éstos afectan a la población en general, pero también a todo el tejido socioeconómico, cultural y político. Sin duda que este tipo de estudios son necesarios y oportunos pero deben basarse en metodologías contrastadas y, sobre todo, en información y datos de calidad. Así lo entienden los autores de este informe, quienes, además de usar las metodologías más avanzadas existentes en la actualidad, han procurado proveerse de datos actualizados y de calidad. En este sentido la base de datos sobre la que se realiza el estudio ha sido facilitada por UMAT, considerando que está actualizada al mes de marzo de 2010. A pesar de usar información fiable, hay también que tener en mente que el terremoto es un fenómeno de una complejidad extraordinaria, sujeto a grandes incertidumbres, incertidumbres que afectan a las características de los terremotos, a la respuesta sísmica de los edificios y a la resiliencia de la sociedad para recuperarse. Es por ello que no se debe perder nunca de vista el carácter probabilista de este tipo de trabajos. Los resultados indican probabilidades de ocurrencia, y deben interpretarse como valores medios de posibles crisis sísmicas. Este capítulo se dedica a la descripción de los datos que sustentan este estudio. Se dispone de información sobre un total de 10239 parcelas de la ciudad de Girona, de las cuales se han segregado aquellas con edificios que se consideran esenciales o de especial importancia, como hospitales, escuelas y edificios religiosos, entre otros, realizándose el análisis sobre 9482 parcelas (92.6%) , restringiendo así el estudio a edificios de viviendas. Desafortunadamente, esta base de datos no dispone de la tipología constructiva de los edificios por lo que ha sido necesario identificar las tipologías constructivas más representativas de los edificios de la ciudad, para lo cual se ha contado con la ayuda de los consultores de Estructuras Blázquez-Guanter, SLP, que poseen una gran experiencia en estructuras de edificación y conocimiento de las características estructurales de los edificios residenciales de Gerona (Blázquez y Guanter, 2011).

Para la evaluación del riesgo sísmico es necesaria gran cantidad de información referente a la edificación, población, mapas de peligrosidad, datos geológicos y geotécnicos, entre otros, y al mismo tiempo se necesita una plataforma informática que permita su gestión de forma adecuada. Los SIG permiten integrar y analizar conjuntamente grandes cantidades de información gráfica y alfanumérica de forma conjunta, posibilitando visualizar en forma de mapas tanto los datos como los resultados. Con ellos es posible trabajar con información georeferenciada, que en el caso de este estudio ha sido la base de datos cedida por UMAT, en formato vectorial. La cesión de datos se vehiculó mediante un convenio de colaboración entre el Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la UPC y UMAT. El programa SIG empleado ha sido ArcGis v.9.3 de la casa ESR, sobre plataforma windows-PC. También se ha contado con el censo de edificios del año 2001, último censo realizado al iniciar este estudio. Esta segunda base de datos ha sido proporcionado por el *Institut d'Estadística de Catalunya* (IDESCAT). Además de contrastar la base de datos de UMAT, la disponibilidad de esta información catastral ha permitido cumplir otro de los objetivos del proyecto SISPYR, que consiste en la aplicación de un método más simplificado, denominado como de nivel cero (L0) y que permite comparar los análisis de riesgo sísmico actuales con los realizados por Chávez (1998) y que fueron utilizados en SISMICAT. En Vendrell (2011) puede hallarse los detalles de esta aplicación. Así, en este capítulo se presenta en primer lugar los datos catastrales, a modo de información adicional y de referencia de la evolución del parque de edificios del municipio de Girona. A continuación, y con mayor detalle, se presentan los datos proporcionados por UMAT, así como un análisis preliminar de los mismos, cuya finalidad es la obtención de criterios de agrupación de los edificios en periodos constructivos y número de plantas en los que se basará este estudio. El resultado de este análisis se empleará para la aplicación de la metodología del Índice de Vulnerabilidad o metodología de nivel 1 (L1).

4.2 Base de datos IDESCAT

Todos los países tienen un organismo oficial encargado de crear y gestionar bases de datos para la realización de diferentes análisis sobre el país, como por ejemplo, estadísticas sobre el medio ambiente, censos de población y viviendas e inmigración, entre otros.

En Cataluña el *Institut d'Estadística de Catalunya* (IDESCAT), es el organismo responsable de esta labor. Este Instituto ha proporcionado los datos del censo del 2001, para este estudio. Estos datos, se han agrupado según periodos constructivos, número de plantas y situación en el territorio. El criterio elegido para su clasificación ha sido el mismo que el de Chávez (1998), pues la finalidad para la que se necesitan estos datos ha sido comparar los resultados actuales obtenidos en Girona, con los del estudio citado. Así, los criterios de agrupación han sido (Chávez, 1998):

- **Número de plantas:** < 5 plantas, =5 plantas y > 5 plantas
- **Periodo constructivo:** Hasta 1950, 1951 – 1970, >1970.
- **Situación en el territorio:** Núcleo / Diseminado¹.

El número de edificios del censo de 2001 es de 9126. La Tabla 4.1 muestra las clases definidas de acuerdo a estos criterios.

Tabla 4.1. Número de edificios por periodo, número de plantas y situación en el territorio de los edificios de Girona. (Fuente: Censo de 2001. IDESCAT).

Altura	Hasta 1950		1951 - 1970		> 1970	
	Núcleo	Diseminados	Núcleo	Diseminados	Núcleo	Diseminados
< 5 plantas	1515	61	1782	39	4051	36
= 5 plantas	187	0	163	0	322	0
> 5 plantas	200	0	237	0	533	0

La Figura 4.1 compara la edad de los edificios según los censos de 1990 y de 2001 con datos del IDESCAT. Por una parte, independientemente para cada uno de los censos puede observarse la relación que existe entre los edificios situados en **núcleo** o en **zona diseminada**. En ambos censos, como es de esperar, la mayor parte de las edificaciones se sitúa en **núcleo**, para todos los periodos constructivos. En los dos primeros periodos se mantiene, aproximadamente, el mismo número de edificaciones, pero en el tercero, después de 1970, los edificios crecen de forma importante, indicando un ritmo alto de construcción de nuevos edificios.

¹ Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), se entiende por **Núcleo** (o zona urbana) cualquier área habitable del término municipal, habitada o excepcionalmente deshabitada, claramente diferenciada dentro del mismo. Se entiende por **Diseminado** (zona rural) una edificación o vivienda que no puede ser incluida en el concepto de núcleo de población, es decir, que tiene menos de 10 edificaciones o menos de 50 habitantes.

Por otra parte, haciendo referencia a la comparación entre censos, la cantidad de edificios contabilizados en los diferentes censos y correspondientes a los dos primeros periodos debería ser exactamente igual. Pero se aprecian pequeñas diferencias que pueden ser debidas a variaciones en los criterios de contabilización de las viviendas, como contabilización de viviendas reformadas, crecimiento del núcleo y por tanto, variaciones entre edificios pertenecientes a éste o a zona diseminada, entre otras posibles causas.

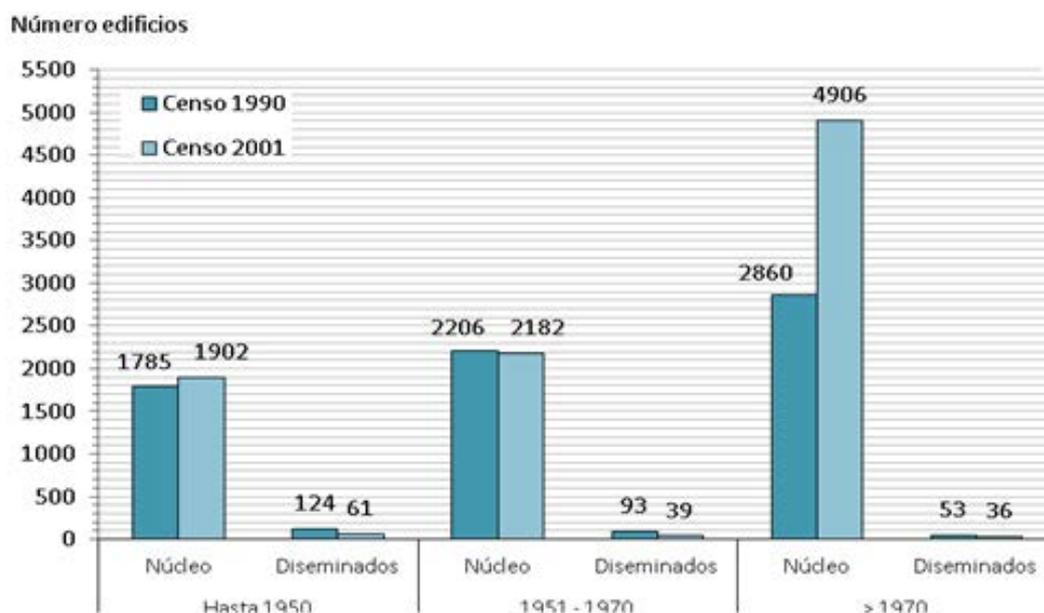


Figura 4.1. Comparación entre el número de edificios de los censos de 1990 y 2001 según año de construcción y ubicación.

En general, se aprecia un fuerte crecimiento en zona **núcleo** a partir de 1970, que pasa de 2860 edificios en 1990 a 4906 en el censo del 2001. Es decir, en un periodo de 11 años, se ha producido un incremento de 2046 edificios, casi doblando así el número de edificios del censo de 1990.

4.3 Base de datos de UMAT

El estudio de Nivel I, se ha basado en la base de datos de UMAT. Se trata de datos georeferenciados y de una fiabilidad alta. La Tabla 4.2 resume el inventario de datos según la información cedida por UMAT. Esta cartografía abarca no sólo el núcleo urbano de la ciudad de Girona, sino también algunas construcciones fuera del núcleo.

No obstante, nos referiremos a los datos completos como *base de datos de la ciudad de Girona*. Toda esta información se ha implementado en el programa *ArcGis* que ha servido para representar, mediante mapas georeferenciados, las conclusiones obtenidas a partir de los diferentes criterios de clasificación así como los resultados de los análisis de peligrosidad sísmica, vulnerabilidad y daños esperados.

En las parcelas se encuentran los edificios de vivienda que interesan y los barrios constituyen la unidad de división territorial que se ha utilizado como criterio de homogeneidad constructiva. Por tanto, de entrada el número de datos que se tiene corresponde a 10239 parcelas. Pero debe hacerse una segregación de estos datos, ya que dentro de este número se incluyen construcciones de diversos tipos como por ejemplo, parkings, servicios técnicos e incluso espacios no construidos. Para separar los edificios de vivienda de los demás se ha realizado una *segregación* de acuerdo al significado de los diferentes campos descriptores de las parcelas y de acuerdo a los siguientes criterios:

- **Categoría:** Sólo se conservan las parcelas identificadas como edificación E (edificación)
- **Volumen:** eliminar las parcelas con campo de máximo volumen nulo.
- **Uso:** identificación de las parcelas que contienen edificios industriales y/o monumentales.
- **Año de construcción:** eliminación de parcelas con este campo igual a 0.

Tabla 4.2. Inventario de datos sobre los edificios de Girona. Fuente: UMAT.

Ficheros de información	Descripción	Total	Atributos principales
Sub-parcelas	Representa los diferentes volúmenes que constituyen los edificios.	53492	Volumen (altura sobre rasante)
Parcelas	Son lo que se entiende por unidades de construcción. Son los edificios, parkings, espacios no construidos, etc.	10239	Categoría, año construcción y de reforma
Manzanas	Se definen a partir de la población empadronada	1181	Población
Barrios / sectores	Divisiones territoriales	9 / 31	Ubicación
Secciones	Divisiones territoriales en función del censo de población.	21	Ubicación

Una vez realizada esta segregación queda una base de datos de 9482 parcelas correspondientes a edificios residenciales. La Figura 4.2 muestra la distribución de los edificios residenciales junto con los identificados como industriales y monumentales. En esta Figura puede observarse cómo la mayoría de edificios residenciales se concentra en los barrios de *Centre* y *Eixample* y que los barrios *Est* y *Nord* son los que tiene una menor densidad de edificios residenciales.

4.3.1 Análisis de la base de datos

En este apartado se realiza un estudio estadístico en base al periodo constructivo y al número de plantas de los edificios de vivienda; se pretende así obtener unos rangos, según periodos constructivos y número de plantas, que se utilizarán para clasificar las edificaciones en la aplicación del método del índice de vulnerabilidad.

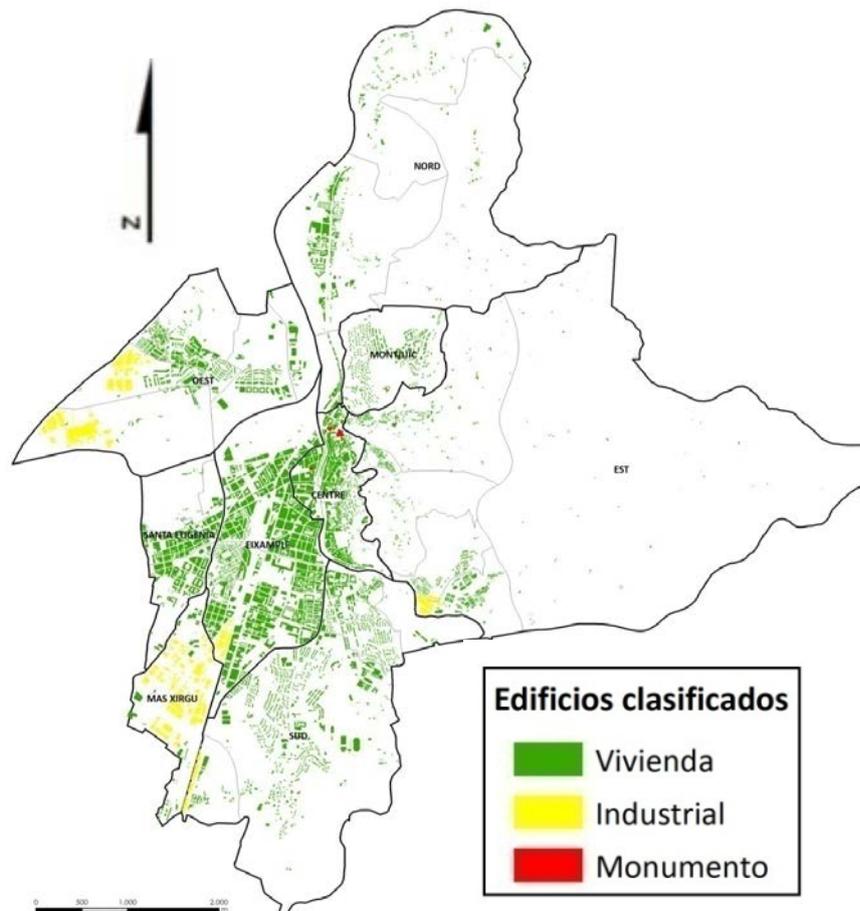


Figura 4.2. Representación de los edificios residenciales (vivienda), industriales y monumentos del municipio de Girona.

4.3.2 Períodos constructivos

Para observar la variación en la construcción de viviendas según el periodo constructivo se realiza un análisis con intervalos de 10 años (Figura 4.3) de los que se deduce que se pueden identificar cuatro grandes periodos: 1) antes de 1910, 2) entre 1910 y 1950, 3) entre 1950 y 1980 y 4) > 1980. En el barrio *Est* se produce un pico en la construcción entre 1950 y 1970. En los barrios *Oest* y *Eixample* comienza el crecimiento a partir de 1950 y el barrio *Sud* se caracteriza por iniciar su crecimiento a partir de 1980. En base a estas características y aplicando criterio de experto (Blázquez, 2011) se obtienen los periodos definitivos:

- <1910
- 1911-1960
- 1961-1980
- >1980

Se deduce de la Figura 4.4 que casi la mitad de los edificios residenciales son posteriores a 1980 y que tan solo un 7% son anteriores a 1910.

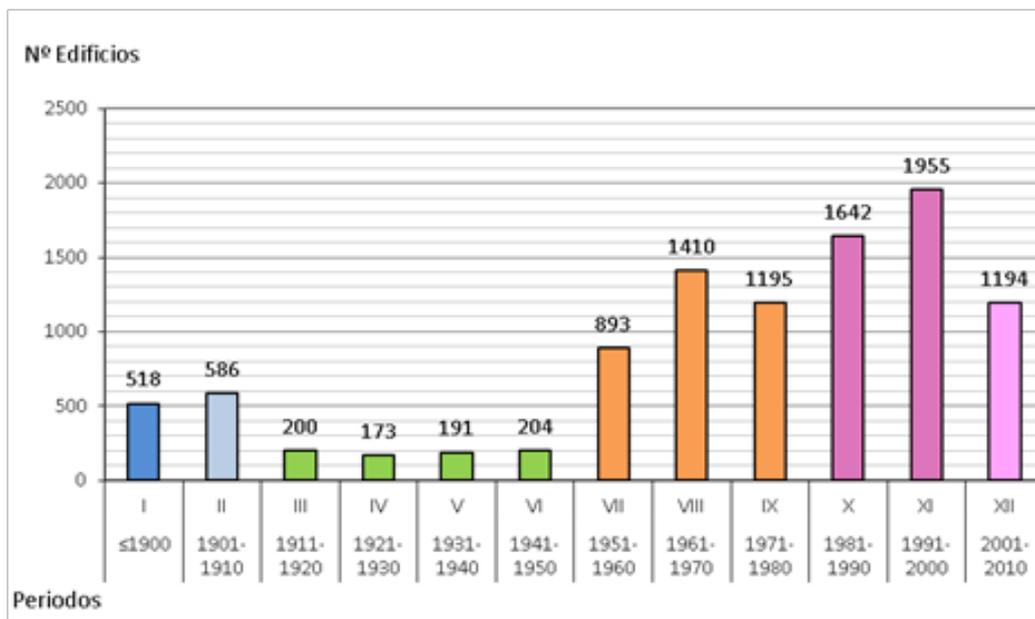


Figura 4.3. Número de edificios por periodos constructivos.

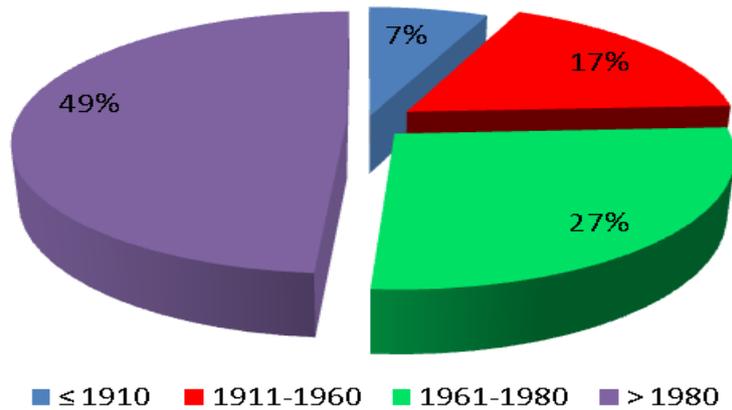


Figura 4.4. Distribución de edificios por periodos constructivos.

4.3.3 Número de Plantas

Haciendo referencia al número de plantas de los edificios, y en función de cada barrio, se deduce de la Figura 4.5 que los barrios *Nord*, *Montjuïc* y *Mas Xirgu* están constituidos, básicamente, por edificios de entre 1 y 3 plantas. Los barrios *Oest* y *Sud* tienen el mayor porcentaje de edificaciones bajas de todo el municipio y un pequeño porcentaje de edificaciones de entre 4 y 6 plantas. Por tanto estos barrios pueden considerarse relativamente homogéneos en cuanto a la altura de sus edificios y constituidos mayoritariamente por viviendas bajas.

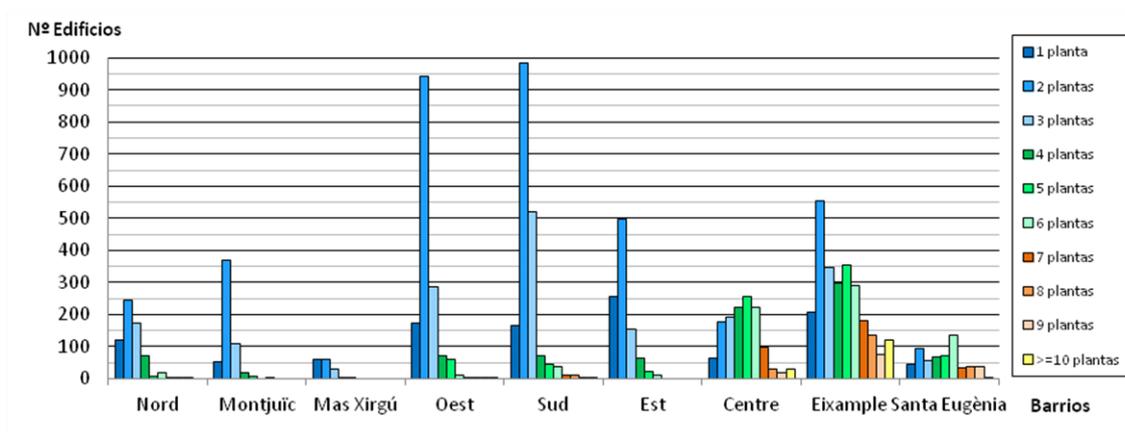


Figura 4.5. Número de edificios por barrios en función del número de plantas.

En cambio, los barrios *Centre*, *Eixample* y *Sta. Eugènia* se caracterizan por ser muy heterogéneos, con edificaciones de todas las alturas. En base a la homogeneidad observada entre rangos de alturas, la clasificación definitiva que se ha tomado es de:

- **Edificios bajos:** entre 1 y 3 plantas
- **Edificios medianos:** entre 4 y 6 plantas
- **Edificios altos:** más de 7 plantas.

La Figura 4.6 muestra la distribución estadística, por barrios, de los edificios residenciales según el número de plantas y la Figura 4.7 muestra su distribución geográfica según los periodos constructivos elegidos.

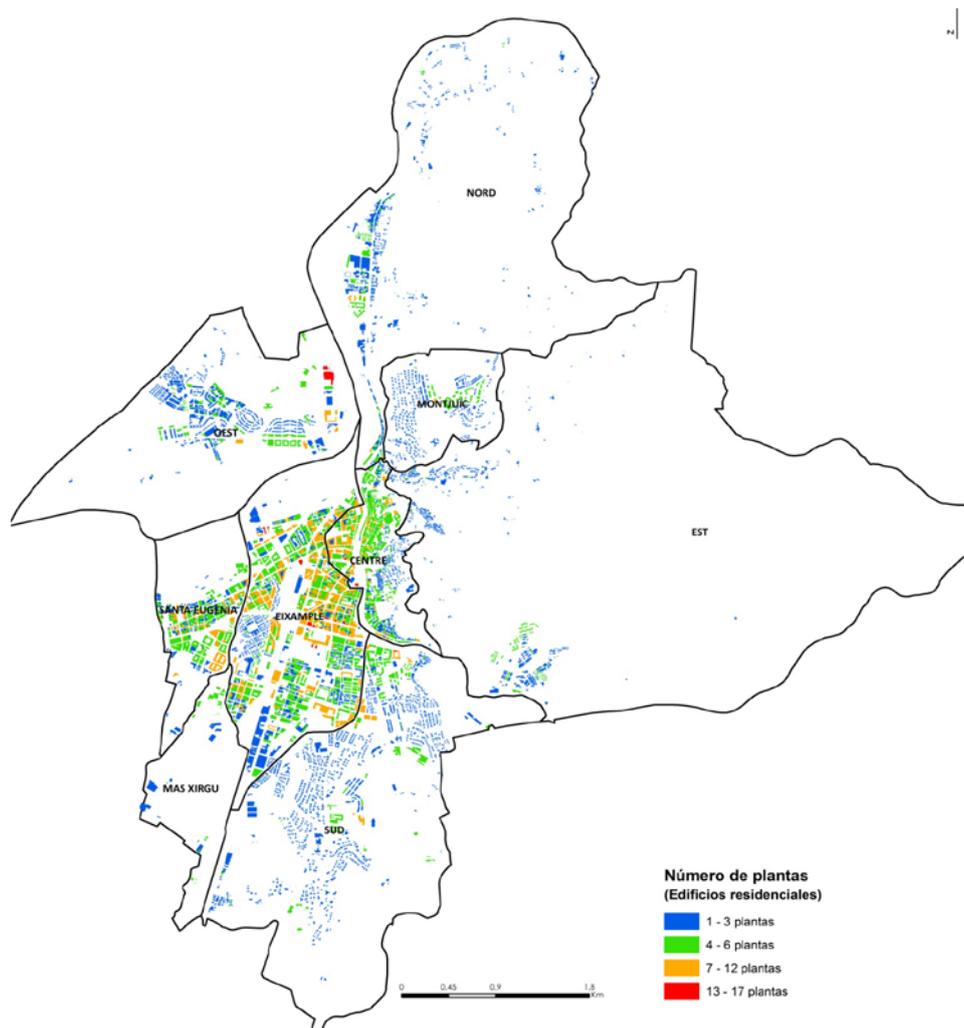


Figura 4.6. Distribución de los edificios residenciales según el número de plantas.

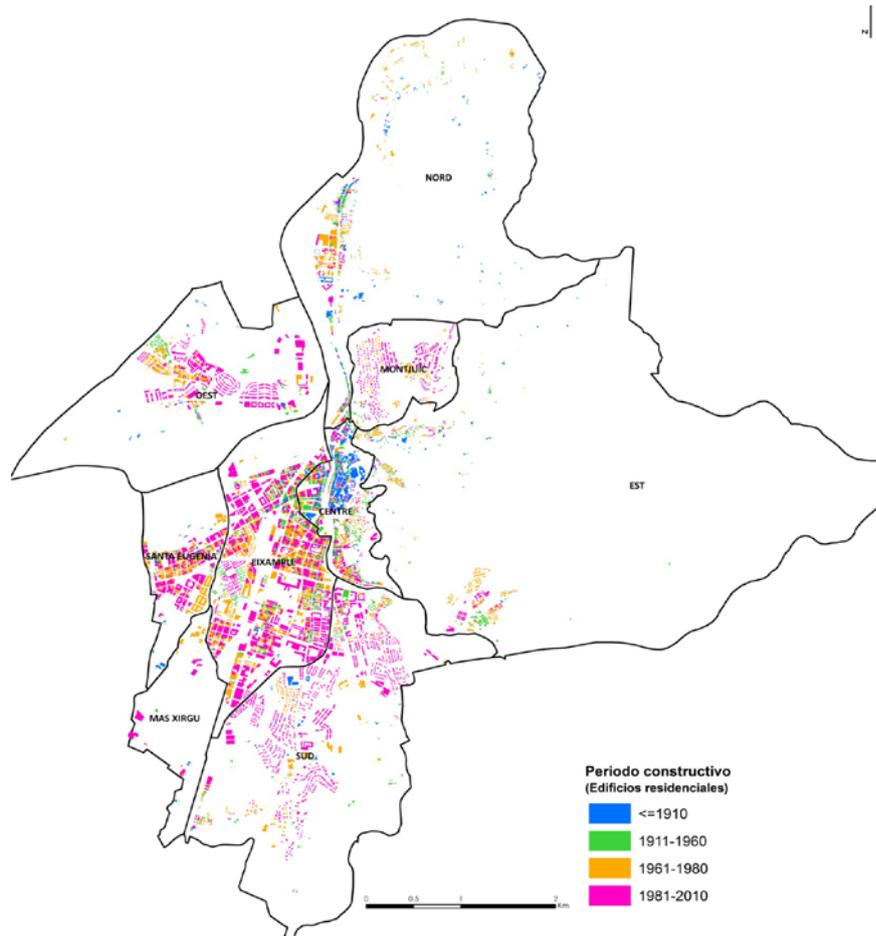


Figura 4.7. Distribución de los edificios de la ciudad en función del periodo de construcción.

5 Vulnerabilidad de la ciudad de Girona

5.1 Introducción

A partir de la base de datos preparada específicamente para este estudio, la opinión de expertos y la incorporación del conocimiento de las características específicas de las tipologías de los edificios de Girona, se ha construido la Matriz de Tipologías de Edificios, que clasifica la vulnerabilidad de los edificios de la ciudad. Siguiendo las directrices del proyecto Risk-UE, se han establecido los índices de vulnerabilidad básicos y sus rangos de variabilidad (véase la Tabla 2.11). Estos índices de clase se adecuan a los edificios específicos mediante el uso de modificadores.

5.2 Tipologías constructivas (BTM)

La definición de las tipologías constructivas se realiza en base a una la matriz de clasificación de edificios (Building Typology Matrix, BTM) como la propuesta en el proyecto Risk-UE (Milutinovic and Trendafiloski, 2003) con la finalidad de agrupar en clases los edificios con las mismas características estructurales y comportamientos similares (Anexo A). La BTM final de Risk-UE contiene 65 clases de tipologías diferentes de acuerdo a algunas de sus propiedades consideradas como factores clave en el comportamiento del edificio.

Para representar la variación del periodo propio del modo fundamental de vibración del edificio, y de otros parámetros de diseño con la altura de la vivienda (número de plantas) dentro de cada clase de la BTM, en el proyecto Risk-UE se han definido 3 subclases en función de la altura:

- **Baja, L** (Low-rise): de 1 a 2 plantas para las estructuras de mampostería y las de madera y de 1 a 3 plantas para edificios de hormigón armado y estructuras metálicas.
- **Media, M** (Mid-rise): de 3 a 5 plantas para las estructuras de mampostería y las de madera y de 4 a 7 plantas para edificios de hormigón armado y estructuras metálicas.

- **Alta, H (High-rise):** con 6 o más plantas para las estructuras de mampostería y las de madera y con 8 o más plantas para edificios de hormigón armado.

Uno de los principales objetivos de este trabajo es la agrupación y clasificación de los edificios de Girona en las tipologías mencionadas. Para ello, se ha clasificado el parque de edificios en tipologías propias del municipio de Girona para, posteriormente, asociarlas a las definidas por Risk-UE. De esta forma, se obtiene un método de clasificación de edificaciones común para diferentes municipios, que permite unificar criterios y comparar resultados.

Las tipologías propias de Girona se han definido en base a la información proporcionada por UMAT. Esta información se ha clasificado según criterios de localización, año de construcción (teniendo en cuenta el año de reforma, en caso de haberlo) y el número de plantas. Como se expuso en los resultados del Capítulo 4, los periodos en los que se clasifican los edificios de Girona son: <1910, entre 1910 y 1960, entre 1960 y 1980 y >1980; y que se considerarán como edificios bajos aquellos que tienen entre 1 y 3 plantas, medios los de 4 a 6 plantas y altos, los de 7 o más plantas. En base a la información de la que se dispone y mediante trabajo de campo y reuniones con arquitectos expertos en la construcción de viviendas en el municipio (Blázquez, 2011), se ha conseguido definir una BTM específica para Girona, en la que se definen las diferentes tipologías constructivas propias del municipio, definidas en base a los siguientes criterios:

- Sistema estructural base (material y estructura)
- Ubicación en el territorio
- Edad de las edificaciones
- Número de plantas del edificio
- Normativas constructivas.

La Tabla 5.1 muestra los tipos de edificios de Girona y su relación con las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 empleada en Risk-UE (Tabla 2.3). En el Anexo B pueden consultarse fichas específicas para cada una de estas tipologías. A cada una de estas tipologías se les ha dado una nomenclatura que después se ha asociado a la definida en Risk-UE para los casos de tipologías coincidentes.

En los demás casos, en que la tipología de Girona es una variante de alguna de las tipologías de Risk-UE, se ha buscado una nomenclatura que las caracterice, basada en los criterios de Risk-UE. En adelante se hará referencia a las tipologías según esta nomenclatura asociada (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Matriz tipológica (BTM) de Girona y su correspondencia con la BTM de Risk-UE.

TIPOLOGÍA		TIPOLOGÍA Risk-EU		DESCRIPCIÓN
MAMPOSTERÍA	Piedra	A 1.1	M 1.1	Muros de carga de piedra no labrada. Bóveda en PB. Forjado de viguetas de madera en PP.
		A 1.2	M 1.2	Muros de carga de piedra labrada. Bóveda en PB. Forjado de viguetas de madera en PP.
		A 1.3	M 1.3	Muros de carga de sillería. Forjados de madera.
	Cerámica	A 2.1	M 3.3	Paredes de carga de obra de fábrica sin reforzar. Forjado mixto de bovedilla cerámica y viguetas metálicas.
		A 2.2	M 3.4C	Paredes de carga de obra de fábrica sin reforzar. Forjado de bovedilla cerámica y viguetas de hormigón armado (Caso particular de la tipología M.3.4. de Risk-UE)
		A 2.3	M 3.4T	Paredes de fábrica sin reforzar. Forjados de bóveda cerámica en todas las plantas con tirantes sobre las paredes (absorber empujes) (Caso particular de la tipología M.3.4. de Risk-UE)
HORMIGÓN ARMADO (HA)	HA irregular	B 1	RC 3.2	Estructura irregular de HA. Cerramientos de obra de fábrica no reforzada.
		B2	RC 2	Pilares y forjados de losa maciza o aligerada. Muros de cortante alrededor de escaleras y ascensores (Posteriores a norma 1994-criterios sismoresistentes)
ACERO	Metálica	C 1	S 3	Estructura metálica mixta con cerramientos de obra de fábrica sin reforzar.
		C2	S2	Estructura metálica con cruces de San Andrés (arriostrada)

Así, los edificios de mampostería se clasifican en 6 tipos: 3 con muros de carga de piedra (M1.1, M1.2 y M1.3) y 3 con paredes de obra de fábrica sin reforzar (M3.3, M3.4C y M3.4T). Las tipologías M3.4C y M3.4T se diferencian en que la primera está constituida por forjados de bovedilla cerámica y viguetas de hormigón, mientras que la M3.4T presenta forjados de bóveda cerámica con tirantes sobre las paredes utilizados para absorber los esfuerzos horizontales en casos de bóvedas con poca curvatura. La finalidad de estos tirantes es rigidizar la estructura evitando el empuje sobre los pilares por efecto de las cargas actuantes sobre la bóveda (Blázquez, 2011).

Las tipologías de hormigón armado (HA) son, junto con las de mampostería, las predominantes en Girona (en igual proporción); ambas tipologías contienen el 96% de los edificios del municipio. De entre éstas, la tipología RC 3.2 es la más frecuente. Es importante remarcar que, en este estudio, se ha tomado la nomenclatura RC2 para definir las estructuras de HA que poseen muros de cortante únicamente alrededor de escaleras y huecos de ascensores. En Risk-UE esta nomenclatura se refiere a tipologías con muros de cortante en toda la estructura, no sólo en escaleras y ascensores. Esta diferenciación hace que no sea adecuado tomar el índice de vulnerabilidad definido en Risk-UE para esta tipología. El índice de vulnerabilidad elegido se explica más adelante en el apartado 5.4 y ha sido definido como menos vulnerable a partir del índice de vulnerabilidad correspondiente a la tipología RC3.2.

En cuanto a los edificios de estructura metálica, representan un porcentaje muy bajo dentro del municipio; cerca del 4% de la totalidad de los edificios. Aunque se trata de un porcentaje muy bajo, es relevante en este estudio por tratarse de edificios altos en los que viven un número importante de personas. La mayoría de estas estructuras corresponden a edificaciones mixtas con cerramientos de obra de fábrica sin reforzar (S3). Estos edificios se encuentran concentrados, mayoritariamente, en los barrios del *Eixample* y de *Santa Eugènia*. Por su parte, la tipología S2 define estructuras metálicas como las de la tipología S3 pero reforzadas con pórticos arriostrados.

A modo de resumen (Figura 5.1) puede decirse que en el municipio de Girona hasta aproximadamente 1910, sólo se construían edificaciones de piedra (M1); a partir de esta fecha el sistema de construcción cambió a estructuras de mampostería cerámica (sistema catalán) aunque su utilización masiva no se dio hasta entrados los años 40.

El periodo 1955-1960 se empezaron a construir estructuras de hormigón con pórticos con pilares y vigas de HA y forjados de viguetas unidireccionales. El cuarto y último periodo considerado comienza en 1980 y está caracterizado por la utilización de forjados reticulares de HA y por la construcción de estructuras metálicas. A continuación se describe, con más detalle, cada uno de los periodos considerados para la clasificación de los edificios. En la Tabla 5.2 puede observarse también la normativa existente relacionada con criterios sísmicos y su posible aplicación al municipio estudiado.

	1910				1960				1980			
	PERIODO I		PERIODO II		PERIODO III		PERIODO IV		PERIODO III		PERIODO IV	
M 1.1												
M 1.2												
M 1.3												
M 3.3												
M 3.4 C												
M 3.4 T												
RC 3.2												
RC 2												
S 3												
S 2												

Figura 5.1. Identificación de tipologías constructivas de Girona según periodo de construcción.

Tabla 5.2. Clasificación en periodos constructivos en base a criterio de experto.

Periodo	Periodo Constructivo	Normativa española	Aplicación Girona
I	≤1910	----	----
II	1911-1960	----	----
III	1961-1980	1963. Recomendación NV-101, 1962	----
		1968. Normativa sísmica PGS-1, 1968	----
		1974. Normativa sísmica PDS-1, 1974	----
		1975. Normativa acero NV-102, 1975	✓
IV	> 1980	1994. Normativa sísmica NCSE-94	✓
		2002. Normativa sísmica NCSE-02	✓

5.2.1 Periodo I (≤1910)

El primer periodo, nombrado como Periodo I, se caracteriza por una ausencia de normativas y una nula consideración de cualquier precaución sísmica. El final de este periodo se ha fijado en el inicio del año 1910, de acuerdo a opiniones de expertos en la historia y costumbres constructivas de la ciudad. Este periodo se caracteriza por la construcción de edificios con muros portantes de piedra, techo de bóveda en planta baja y el resto de forjados de viguetas de madera (Blázquez, 2011).

5.2.2 Periodo II (1911–1960)

Se construyen, principalmente, estructuras con muros portantes de obra de fábrica y viguetas metálicas aunque es posible que en algunas zonas se sigan construyendo edificios de piedra. El final de este periodo se ha fijado en 1960 ya que, según opinión de experto, a partir de este momento se empiezan a utilizar estructuras de hormigón con pórticos de pilares y vigas de HA y forjados unidireccionales. Por otra parte, según un artículo publicado en la *Revista de Girona* la utilización de viguetas de hormigón data de 1955. Esta información corrobora que su utilización masiva pueda corresponder a 1960. Durante este periodo tampoco existía ningún tipo de normativa sismorresistente en España, aunque es posible que en la práctica constructiva se tuviese en cuenta algún criterio sismorresistente, que probablemente no aseguraba la ausencia de daños en la estructura por efectos sísmicos.

5.2.3 Periodo III (1961–1980)

Durante este periodo predomina la utilización de forjados unidireccionales de viguetas de hormigón armado. Se trata de un periodo corto debido a que pronto se empieza a utilizar el forjado reticular. Se considera, según juicio de experto, que su utilización generalizada se dio a partir de 1980, fecha que cierra este periodo. Al inicio de este periodo se publica la norma MV-101-1962 (MV-101, 1963) que considera la acción sísmica y establece acciones específicas a tener en cuenta en la edificación.

Más adelante, en 1968, se aprueba la primera normativa sísmica explícita de España (PGS-1, 1968) provisional que permanece durante siete años hasta que se aprueba, en 1974, la norma (PDS-1, 1974) de obligado cumplimiento para determinado tipo de estructuras. Esta normativa determina el cálculo sistemático de estructuras frente acciones sísmicas. La aprobación de esta última normativa, junto con la publicación, en 1975, de la norma NBE *MV 102-1975* “acero laminado para estructuras de edificación” pueden suponer un punto de inflexión en las tipologías constructivas de la ciudad de Girona y llevar a la aparición de un nuevo periodo (asociado al cambio de 1980). Debido a que no se tiene constancia de la utilización de la normativa sísmica mencionada, no se considerará como factor determinante en el estudio de vulnerabilidad de los edificios construidos durante este periodo.

5.2.4 Periodo IV (>1980)

Este periodo se caracteriza, por una parte, por la construcción de edificios con forjados reticulares y, por otra, edificios de estructura metálica, aunque un pequeño porcentaje de estas últimas se empezaron a construir sobre 1970. La mayoría de edificios de acero son de estructura metálica mixta y representan un bajo porcentaje dentro del parque de edificios de Girona. Las construcciones llevadas a cabo durante estos años se rigen por un mayor control y calidad en la ejecución del cálculo estructural. Esto es debido a la aprobación, en 1994, de la “Norma de Construcción Sismorresistente Española” (NCSE-94, 1994) que amplía el ámbito de aplicación y establece parámetros de cálculo y diseño frente a fenómenos sísmicos. Es en 2002 cuando se aprueba la (NCSE-02, 2002), actualización de la norma anterior.

5.3 Clasificación de los edificios de Girona

A partir de la base de datos proporcionada por UMAT y con la ayuda de la opinión de expertos y de arquitectos de la zona (Blázquez Guanter SLP, 2011) se han asignado los edificios de Girona a los tipos constructivos definidos en la BTM incluyendo los porcentajes de viviendas pertenecientes a cada tipología en función del periodo de construcción y el número de plantas. La distribución se realiza a nivel de barrio, pues siguen criterios constructivos con cierta homogeneidad.

A modo de ejemplo, la Tabla 5.3 muestra la distribución de las tipologías estructurales del barrio del *Centre* (en el Anexo C se pueden consultar las distribuciones de edificios según tipologías, alturas y periodo de construcción para el resto de barrios del municipio). Se ha elegido representar éste ya que es, junto con el barrio del *Eixample*, uno de los más heterogéneos y que contiene más edificios (1268 edificios de vivienda).

La información sobre el número de edificios total de cada periodo es la facilitada por UMAT, en base al registro catastral que posee el Ayuntamiento de Girona. Por otra parte, los porcentajes de cada tipología constructiva se han definido en base al estudio previo de las características constructivas de la zona, de su evolución con el tiempo y de la situación de las edificaciones en el territorio. Este estudio, realizado con la ayuda de Blázquez Guanter SLP (2011), ha proporcionado los porcentajes de edificaciones definitivos para cada tipología en cada uno de los barrios. Para la obtención de estos porcentajes se han utilizado las siguientes herramientas:

- Información del catastro.
- Experiencia en el ámbito de la construcción para la identificación de las tipologías.
- *Street View* de Google, para observar el aspecto de las diferentes viviendas.
- En algunos casos, la estructura se conocía perfectamente por motivos de intervención en el edificio.

Como resumen de todos los barrios, la

Tabla 5.4 muestra los edificios agrupados en las tres grandes clases de tipologías: mampostería, hormigón armado y acero, separando los porcentaje de edificios según altura: bajos, medios y altos. Para la agrupación en alturas se ha tomado el siguiente criterio:

- Bajos: 1 – 3 plantas
- Medios: 4 – 6 plantas
- Altos: ≥ 7 plantas

Tabla 5.3. Distribución de tipologías en porcentajes para el barrio del Centre, total de edificios 1268.

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1	52%	13%		
	M 1.2	15%	8%		
	M 1.3	8%	5%		
	M 3.3	25%	56%	12%	7%
	M 3.4C		18%	68%	26%
	M 3.4T				
	RC 3.2			20%	67%
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
	Número Edificios	61	143	104	95
MEDIOS (4-6)	M 1.1	54%	21%		
	M 1.2	14%	13%		
	M 1.3	8%	9%		
	M 3.3	24%	43%	4%	
	M 3.4		14%	19%	6%
	M 3.4T				
	RC 3.2			66%	75%
	RC 2			11%	19%
	S 3				
	S 2				
	Número Edificios	266	150	80	197
ALTOS (>=7)	M 1.1	31%	12%		
	M 1.2	23%	10%		
	M 1.3	23%	10%		
	M 3.3	23%	41%	3%	3%
	M 3.4		15%	15%	15%
	M 3.4T				
	RC 3.2		12%	48%	40%
	RC 2			16%	27%
	S 3			13%	9%
	S 2			5%	6%
	Número Edificios	44	40	55	33

Tabla 5.4. Distribución de edificios de vivienda por barrios según criterios de tipología y de altura.

ID	BARRIO	EDIFICIOS VIVIENDA	Tipología (%)			Altura (%)		
			Mampostería	HA	Acero	Bajos	Medios	Altos
B1	<i>Nord</i>	600	80.9	18.5	0.6	82.7	15.8	1.5
B2	<i>Montjuïc</i>	553	30.3	62.5	7.2	94.9	4.9	0.2
B3	<i>Oest</i>	1383	64.0	34.3	1.7	89.7	9.7	0.7
B4	<i>Est</i>	812	86.5	13.5	0.0	88.5	11.5	0.0
B5	<i>Centre</i>	1268	67.8	31.0	1.2	31.8	54.7	13.6
B6	<i>Eixample</i>	2492	40.7	48.2	11.1	41.9	37.5	20.6
B7	<i>Sta. Eugènia</i>	562	30.0	69.0	0.9	32.2	47.9	19.9
B8	<i>Mas Xirgu</i>	24	65.2	34.8	0.0	91.7	8.3	0.0
B9	<i>Sud</i>	1788	34.9	63.5	1.6	90.5	8.2	1.3

Se ha tomado el mismo para todas las tipologías con la intención de facilitar la distribución de los porcentajes, pero la diferenciación de este criterio según se trate de estructura de mampostería o de hormigón armado (mismo criterio que Risk-UE) se ha tenido en cuenta mediante la introducción de modificadores en el cálculo de los índices de vulnerabilidad. En base a estas distribuciones se obtienen las siguientes conclusiones de los diferentes barrios:

- **Barrio Nord (B1):** El núcleo residencial se construyó entre los años 1960 – 1980, siguiendo un camino en dirección Norte-Sur. Se trata de un periodo en que se construyen viviendas económicas y de rápida planificación. Se trata de un barrio situado en la zona norte del municipio donde la densidad de población es baja, por lo que tiene sentido que cerca del 80% de las viviendas sean casas bajas y de mampostería. El mayor porcentaje de población está concentrada en el sector de *Pont Major*.
- **Barrio Montjuïc (B2):** Se sitúa sobre un montículo. Inicialmente, por su topografía elevada y ubicada al norte del *Centro*, fue una zona militar, hasta entrada la primera mitad del siglo XX. Más tarde, se transformó en urbanización burguesa donde la vivienda más antigua data de 1950. Se trata de un barrio caracterizado por edificaciones de 4 plantas como máximo,

aunque la mayoría son viviendas unifamiliares de planta baja más un piso (PB+1PP). Puede observarse que el 95% de los edificios son bajos.

- **Barrio Oest (B3):** Prácticamente la totalidad de los sectores *Domeny Nord* y *Domeny Sud* son industriales, por lo que quedan fuera de este estudio. *Taialà* nace en 1960 como núcleo de viviendas poco lujosas, por lo que gran parte de sus edificaciones son de mampostería (64%)
- **Barrio Est (B4):** Este barrio se caracteriza, al igual que los barrios *Montjuïc*, *Oest*, *Mas Xirgu* i *Sud* por tener prácticamente la totalidad de sus edificios de altura baja. El sector *Gavarres* tiene baja densidad de población y está dotado sólo de viviendas rurales. El núcleo de *Torre Gironella* es una urbanización de viviendas unifamiliares construida sobre los años 70. *Sant Daniel* fue anexionado a Girona en 1960 y está dotado de una gran zona verde que se clasificó como protegida en 1980. *Font de la pólvora* es un sector mayoritariamente industrial, por lo que queda fuera de este estudio, pero su existencia marcó el nacimiento de *Vila-Roja*, sector obrero caracterizado por viviendas para los trabajadores de las industrias. Este hecho hace que la mayoría de edificaciones sean de mampostería.
- **Barrio Centre (B5):** Se trata de un barrio muy heterogéneo. Juntamente con los barrios del *Eixample* y *Santa Eugènia*, son los que muestran mayores porcentajes de las tres tipologías predominantes (mampostería, HA y acero). Se divide en tres sectores: *Barri Vell*, caracterizado por edificios de entre 2 y 5 plantas de muros portantes de piedra (M1.1, M1.2 y M1.3); *Mercadal*, caracterizado por edificios más nuevos y de mayor altura, aunque no por ello se dejan de construir edificios de mampostería; *Carme*, caracterizado por una zona importante de viviendas unifamiliares de PB+1PP. Las construcciones más antiguas se encuentran en el *Barri Vell*.
- **Barrio Eixample (B6):** Al igual que el Centre, es un barrio heterogéneo dividido en tres grandes zonas: *Eixample Nord*, prolongación del sector *Mercadal*, por lo que las tipologías son las mismas; *Eixample Sud*, se caracteriza por tener estructura reticulada pero con mayor porcentaje de edificios construidos después de 1980; *Sant Narcís*, se caracteriza por edificaciones posteriores al 1950 y de altura máxima de 3 plantas. Muchos de los edificios de este último

sector se construyeron con paredes de fábrica y forjado de bóveda de cerámica en todas las plantas (M3.4 C y M 3.4T).

- **Barrio *Santa Eugènia* (B7):** Se considera una prolongación del barrio del *Eixample*, ya que sigue el mismo criterio constructivo. Fue una zona anexionada en 1960. Se trata de un barrio donde predominan los bloques de viviendas altos o de media altura (predominio de RC 3.2 y RC 2). Dentro de este barrio existe un sector (*Hortes*) básicamente rural que se caracteriza por la prácticamente inexistencia de viviendas.
- **Barrio *Mas Xirgu* (B8):** Se trata de un barrio muy nuevo y de tamaño pequeño. Se empezó a construir a partir de 1980 con viviendas de poca altura (máximo 4 plantas, aunque el mayor porcentaje es de viviendas menores de 3 plantas). Seguramente nació como núcleo dormitorio para los trabajadores de la zona industrial cercana. El 92% de las viviendas son bajas y no existe ninguna estructura metálica.
- **Barrio *Sud* (B9):** Se trata de un barrio en el que la mayor parte de la población se concentra en los sectores *Palau* y *Montilivi*. El primero fue anexionado a Girona en 1960 y se compone de viviendas unifamiliares de elevada calidad y se caracteriza por la presencia de zonas verdes. Por su parte, *Montilivi* es un núcleo de características similares pero diferenciado del anterior en que no sólo tiene viviendas unifamiliares, sino que presenta unos cuantos bloques de 4 plantas. La tipología predominante en este barrio es el HA, aunque existe una gran proporción de edificaciones M 3.4.

La Figura 5.2 sintetiza la distribución tipológica de los edificios residenciales por barrios que se describe con mayor detalle en el Anexo D. Se observa cómo las tipologías predominantes en todo el municipio son la mampostería cerámica (representada en tonos azules) y el hormigón armado (representada en tonos verdes).

De entre las tipologías de mampostería cerámica suele predominar la M 3.4C, construida con viguetas de hormigón frente a la M 3.3, que se diferencia por utilizar viguetas metálicas. La utilización de esta última tipología duró muy poco y prácticamente desapareció con la introducción de la M 3.4.

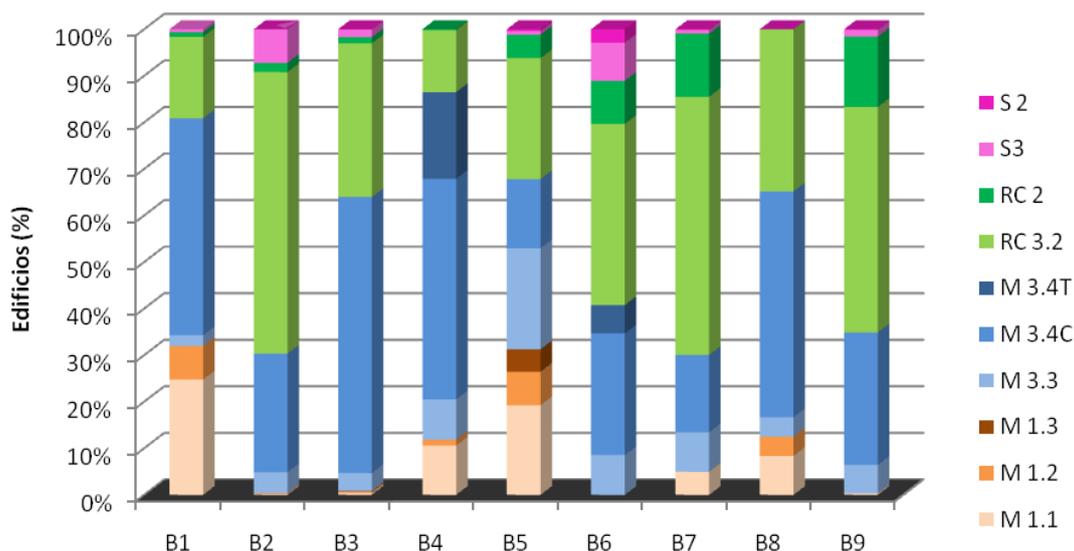


Figura 5.2. Distribución de las tipologías estructurales por barrios (B1: Nord, B2: Montjuïc, B3: Oest, B4: Est, B5: Centre, B6: Eixample, B7: Santa Eugènia, B8: Mas Xirgu y B9: Sud).

Los edificios de piedra se concentran en los barrios: *Centre* (B5), es el que contiene los edificios más antiguos; *Nord* (B1), barrio mayoritariamente rural con baja densidad de población. La tipología M 1.3, caracterizada por muros de carga de sillería se concentra prácticamente toda en el *Centre* (B5), ya que es típica de palacios, normalmente situados en la zona central del municipio. Actualmente éstos se encuentran reformados y utilizados como edificios públicos o de vivienda. La tipología M 3.4T se concentra en los barrios del *Est* (B4) y del *Eixample* (B6) donde se construían edificios con bóvedas en todas las plantas y tirantes para absorber los empujes que éstas provocaban.

La mayoría de estructuras de hormigón pertenecen a la tipología RC 3.2; únicamente los barrios *Sud* (B9), *Eixample* (B6), *Centre* (B5) y *Santa Eugènia* (B7) presentan un porcentaje considerable de estructuras con muros de cortante en huecos de escalera y ascensores.

Con respecto a las estructuras metálicas puede decirse que se concentran todas en los barrios *Montjuïc* (B2) y *Eixample* (B6). A su vez, *l'Eixample* presenta el mayor porcentaje de estructura metálica arriostrada en comparación con los demás barrios. Esto se debe a que se trata del barrio con mayor población y con edificios de mayor altura.

5.4 Índices básicos de Vulnerabilidad

El método del índice de vulnerabilidad define un índice de vulnerabilidad medio, que se utilizará para los cálculos del daño, para cada una de las tipologías existentes en la Matriz de Tipologías de Edificios. Los valores de los índices de vulnerabilidad oscilan entre 0 y 1, siendo los valores más cercanos a 1 los correspondientes a los edificios más vulnerables; mientras que los valores cercanos a 0 corresponden a los menos vulnerables, es decir, a aquellos que se han construido teniendo en cuenta las normativas sismorresistentes.

En la Tabla 2.11 (representada en el Capítulo 2) pueden encontrarse los índices de vulnerabilidad de acuerdo a las directrices del proyecto Risk-UE. V_I^* indica el valor más probable, V_I^- y V_I^+ definen el intervalo plausible del índice de vulnerabilidad y V_I^{\max} y V_I^{\min} , son los límites inferior y superior de los índices de vulnerabilidad que se consideran posibles. Para comprender bien estos límites es esencial diferenciar los siguientes conceptos:

- Probable: **verosímil**, que hay buenas razones para creer que se verificará.
- Plausible: **admisible**, recomendable.
- Posible: que **puede suceder**.

Cuando un edificio encaja directamente en una de las tipologías definidas en Risk-UE se le asigna el índice de vulnerabilidad correspondiente al valor más probable. A continuación se describe el análisis de vulnerabilidad que permite adaptar este índice medio a las características particulares de cada grupo de edificios.

Para la caracterización del Índice de Vulnerabilidad medio de cada barrio ($V_{I \text{ MEDIO}}$) se define un índice básico, V_I^* (Tabla 5.5), un *modificador regional* y una serie de *modificadores de comportamiento*. El primero se aplica a las tipologías que no se corresponden exactamente con las de Risk-UE por el hecho de ser específicas de la ciudad de Girona. Los segundos se utilizan para considerar los diferentes elementos que influyen en cada tipología como pueden ser el número de plantas y el periodo constructivo, entre otros. En este estudio el índice básico es el correspondiente al definido en Risk-UE (Mouroux et al., 2004).

Las tipologías M3.4 T y RC 2 (casillas de la tabla resaltadas en amarillo) no se corresponden exactamente con ninguna de las tipologías existentes, por lo que son las que se han visto afectadas por el modificador regional. A continuación se comenta con más detalle el caso de ambas tipologías:

- **M3.4T:** Esta tipología se define como una estructura de muros de fábrica con forjados de bóveda (estilo catalán) de pequeña curvatura en todas las plantas, reforzados con tirantes para absorber los fuertes empujes horizontales que puedan provocar. Se trata de una modificación de la tipología M3.4; una mejora es ésta. La existencia de los tirantes compensa el mayor esfuerzo sobre los muros de mampostería por efecto de las bóvedas de forma que se ha considerado, en base a criterio de experto (Barbat, 2011), que este índice se definiría como un 5% menor que el correspondiente a la tipología M3.4 definida en Risk-UE.
- **RC2:** Como se ha explicado en el apartado 5.3 esta tipología toma el nombre de la definida en Risk-UE por definirse con las mismas características estructurales, pero no se corresponde exactamente con ella, ya que en el caso de Girona, las viviendas no están dotadas de muros de cortante en toda la estructura; éstos sólo existen en algunas zonas (alrededores de escaleras y huecos de ascensores). Este hecho hace que la estructura no se pueda considerar como RC2 propiamente dicha, por lo que su V_1^* se calculará como una modificación del correspondiente a RC3.2. La realidad de estas construcciones es que la mayor parte de la estructura corresponde a la RC3.2 por lo que se disminuirá en un 10% su índice de vulnerabilidad (Barbat, 2011), con lo que se define una estructura menos vulnerable (más resistente) que la RC3.2, pero mucho más vulnerable que la RC2 definida por Risk-UE (con muros de cortante en toda la estructura).

Como puede apreciarse en la Tabla 5.5, las tipologías de mampostería son las que, inicialmente, presentan mayor vulnerabilidad frente a terremotos; en contraposición con las estructuras metálicas, que presentan vulnerabilidades mucho menores (sobre todo para el caso de la tipología S2).

Tabla 5.5. Principales tipologías de Girona con sus correspondientes índices de vulnerabilidad básicos.

TIPOLOGÍAS	TIPOLOGÍAS Risk-EU	DESCRIPCIÓN	V_i^*
MAMPOSTERÍA	Piedra	M 1.1 Muros de carga de piedra no labrada. Bóveda en PB. Forjado de viguetas de madera en PP.	0.873
	Piedra	M 1.2 Muros de carga de piedra labrada. Bóveda en PB. Forjado de viguetas de madera en PP.	0.740
	Piedra	M 1.3 Muros de carga de sillería. Forjados de madera.	0.616
	Cerámica	M 3.3 Paredes de carga de obra de fábrica sin reforzar. Forjado mixto de bovedilla cerámica y viguetas metálicas.	0.704
	Cerámica	M 3.4C Paredes de carga de obra de fábrica sin reforzar. Forjado de bovedilla cerámica y viguetas de hormigón armado o losas de HA.	0.616
	Cerámica	M 3.4T Paredes de fábrica sin reforzar. Forjados de bóveda cerámica en todas las plantas con tirantes sobre las paredes (absorber empujes)	0.585
HA	HA irregular	RC 3.2 Estructura irregular de HA. Cerramientos de obra de fábrica no reforzada.	0.522
	HA irregular	RC 2 Pilares y forjados de losa maciza o aligerada. Muros de cortante alrededor de escaleras y ascensores (Posteriores a norma 1994-criterios sismo-resistentes)	0.470
ACERO	Metálica	S 3 Estructura metálica mixta con cerramientos de obra de fábrica sin reforzar.	0.484
	Metálica	S2 Estructura metálica con cruces de San Andrés (arriostrada)	0.287

5.5 Modificadores

Para tener en consideración las características particulares de los conjuntos de edificios, como puede ser su altura, sus transformaciones recientes, el estado de conservación, condición de “*piso blando*”, nivel del código sísmico usado en su construcción, entre otras características, se puede variar el índice de vulnerabilidad inicial de cada tipología mediante unos *modificadores* (Giovinazzi and Lagomarsino, 2004). Así pues, los modificadores permiten incrementar o disminuir el índice de vulnerabilidad básico si sus características mejoran o empeoran la respuesta sísmica, como se indica en la siguiente ecuación:

$$V_{I\text{PARCIAL}} = V_I^s + \Delta M_c \quad (5-1)$$

Los modificadores que se han utilizado en este estudio, conocidos como modificadores de comportamiento (M_c) hacen referencia al **número de plantas**, aplicado a todos los edificios, y a criterios de “**piso blando**” y **nivel sismorresistente**, aplicados a los edificios de hormigón armado y de estructura metálica. La Tabla 5.6 muestra la distribución de estos modificadores por tipologías.

Tabla 5.6. Valores propuestos para los modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad para las diferentes tipologías de Girona.

TIPOLOGÍAS	TIPOLOGÍAS Risk-EU	V_I^*	MODIFICADOR DE COMPORTAMIENTO (M_c)					
			PLANTAS			PISO BLANDO	NORMATIVA SISMORRESISTENTE >1994	
			BAJOS	MEDIOS	ALTOS			
MAMPOSTERÍA	Piedra	M 1.1	0.873					
	Piedra	M 1.2	0.74					
	Piedra	M 1.3	0.616					
	Cerámica	M 3.3	0.704	-0.02	0.02	0.06	---	---
	Cerámica	M 3.4C	0.616					
	Cerámica	M 3.4T	0.5852					
HA	HA irregular	RC 3.2	0.522	-0.04	0	0.08	0.04	-0.08
	HA irregular	RC 2	0.4698					
ACERO	Metálica	S 3	0.484	-0.04	0	0.08	0.04	---
	Metálica	S2	0.287					

Los modificadores de “piso blando” se aplican al 100% de los edificios medios y altos de HA y acero pertenecientes a los barrios del *Centre* y *Eixample*. Esta decisión se ha tomado en base a criterio de experto, considerando que es en estos barrios donde se desarrolla la mayor actividad comercial. Por ello se han excluido de este grupo los edificios bajos, ya que normalmente corresponden a viviendas unifamiliares y carecen de planta baja comercial.

Por otra parte, el modificador por criterios sismorresistentes se aplica a todos los edificios de hormigón armado construidos después de 1994. Es posible que anteriormente se tuviesen en cuenta recomendaciones de antiguas normas sismorresistentes en algunas edificaciones, pero no se puede asegurar. El hecho de que a partir de 1994 se aplique la normativa correspondiente (NCSE-94, 1994) hace que se pueda asegurar una mayor resistencia frente a acciones sísmicas con la consiguiente menor vulnerabilidad por parte de los edificios calculados siguiendo estos criterios. En consecuencia, los edificios construidos a partir de 2003, asumen la normativa correspondiente actualizada (NCSE-02, 2002).

Estos modificadores se han aplicado a cada una de las tipologías, definiendo 48 índices de vulnerabilidad diferentes (Tabla 5.7). Para ello se han considerado todas las modificaciones con todas sus posibles combinaciones teniendo en cuenta las diferentes posibilidades de los barrios. La falta de datos específicos sobre cada una de las edificaciones de la zona de estudio, hace que la recogida a nivel individual de las características tipológicas de los edificios se saliera de los objetivos de este estudio.

Este hecho hace que la distribución de los índices de vulnerabilidad se haya realizado también a nivel de barrio, ya que sólo se conoce su composición de forma estadística. Para la obtención del índice de vulnerabilidad medio de cada barrio (Tabla 5.8) se han definido los índices de vulnerabilidad parciales para cada tipología asociada al porcentaje de edificios pertenecientes a cada barrio. El índice de vulnerabilidad medio final ($V_{I\text{ MEDIO}}$) se obtiene proporcionalmente a los parciales según se define en la ecuación siguiente.

$$V_{I\text{ MEDIO}} = \sum qt \cdot V_{I\text{ PARCIAL}} \quad (5-2)$$

donde qt es la proporción de edificios del barrio que están dentro de una cierta categoría y $V_{I\text{ PARCIAL}}$ es el índice del edificio de una tipología en concreto una vez considerados los modificadores correspondientes.

Tabla 5.7. Índices de vulnerabilidad parciales para cada tipología constructiva definida en el municipio de Girona

Plantas	Tipología	Vi *		Plantas	Tipología	Vi *	
		≤ 1994	> 1994			≤ 1994	> 1994
Bajos (1-3)	M 1.1	0.853		Altos (≥7)	M 1.1	0.933	
	M 1.2	0.720			M 1.2	0.800	
	M 1.3	0.596			M 1.3	0.676	
	M 3.3	0.684			M 3.3	0.764	
	M 3.4c	0.596			M 3.4c	0.676	
	M 3.4t	0.565			M 3.4t	0.645	
	Rc 3.2	0.482	0.402		Rc 3.2	0.602	0.522
	Rc 2	0.430	0.350		Rc 3.2-pb	0.642	0.562
	S 3	0.444			Rc 2	0.550	0.470
	S 2	0.247			Rc 2-pb	0.590	0.510
Medios (4-6)	M 1.1	0.893			S3	0.564	
	M 1.2	0.760			S3- pb	0.604	
	M 1.3	0.636			S 2	0.367	
	M 3.3	0.724			S2 - pb	0.407	
	M 3.4c	0.636					
	M 3.4t	0.605					
	Rc 3.2	0.522	0.442				
	Rc 3.2-pb	0.562	0.482				
	Rc 2	0.470	0.390				
	Rc 2-pb	0.510	0.430				
	S3	0.484					
	S3- pb	0.524					
	S 2	0.287					
	S2 - pb	0.327					

De la Tabla 5.8 se concluye que el barrio menos vulnerable es el de *Montjuïc* (con índice de 0.48) y que el más vulnerable es el *Centre* (con índice de 0.67). Una de las causas por las que *Montjuïc* es el barrio menos vulnerable es el hecho de que se trata de uno de los más nuevos (la mayoría de sus edificaciones son posteriores a 1960) asociado a que la tipología predominante es el HA, con aproximadamente un 63% de los edificios del barrio. Estos factores, unidos a que se trata de un barrio residencial, con un 95% de construcciones de entre 1 y 2 plantas; hacen de *Montjuïc* el barrio menos vulnerable del municipio.

En el *Centre*, en contraposición, coexisten todas las tipologías, con un porcentaje importante de edificaciones de piedra. Este tipo de estructuras presentan mala resistencia a las acciones sísmicas, por lo que incrementan la vulnerabilidad del barrio. Al *Centre* le siguen los barrios del *Nord* y *Oest* con índices de 0.65 y 0.61 respectivamente. Estos índices, también elevados, se deben al mismo motivo explicado para el caso del *Centre*. El barrio de *l'Eixample*, aun contando con la presencia de edificios de mampostería, se caracteriza por un índice de vulnerabilidad menor debido a la importante presencia de edificios de hormigón y estructura metálica.

Tabla 5.8. Índice de vulnerabilidad medio de cada barrio.

Id	Barrio	Edificios (%)	V_i medio
B1	<i>Nord</i>	6.33	0.65
B2	<i>Montjuïc</i>	5.83	0.48
B3	<i>Oest</i>	14.59	0.55
B4	<i>Est</i>	8.56	0.61
B5	<i>Centre</i>	13.37	0.67
B6	<i>Eixample</i>	26.28	0.57
B7	<i>Sta. Eugènia</i>	5.93	0.58
B8	<i>Mas xirgu</i>	0.25	0.57
B9	<i>Sud</i>	18.86	0.50
Girona municipio			0.57

La mayoría de barrios de Girona se caracterizan por índices de vulnerabilidad pertenecientes al rango 0.50 – 0.66, que corresponde a la clase de vulnerabilidad C. Por tanto, puede esperarse que haciendo el estudio a nivel de todo el municipio el índice de vulnerabilidad para Girona dé un valor que se encuentre dentro de este rango. Para el **municipio** se ha obtenido un **índice de vulnerabilidad medio** de **0.57**.

La Figura 5.3 muestra los índices de vulnerabilidad medios de cada uno de los barrios del municipio de Girona teniendo en cuenta todos los edificios, así como únicamente para edificios de mampostería no reforzada, de hormigón armado y de acero. Como puede verse, los mayores valores de vulnerabilidad se concentran en el casco antiguo de la ciudad donde los edificios de piedra antiguos constituyen un alto porcentaje del parque de edificios de la ciudad.

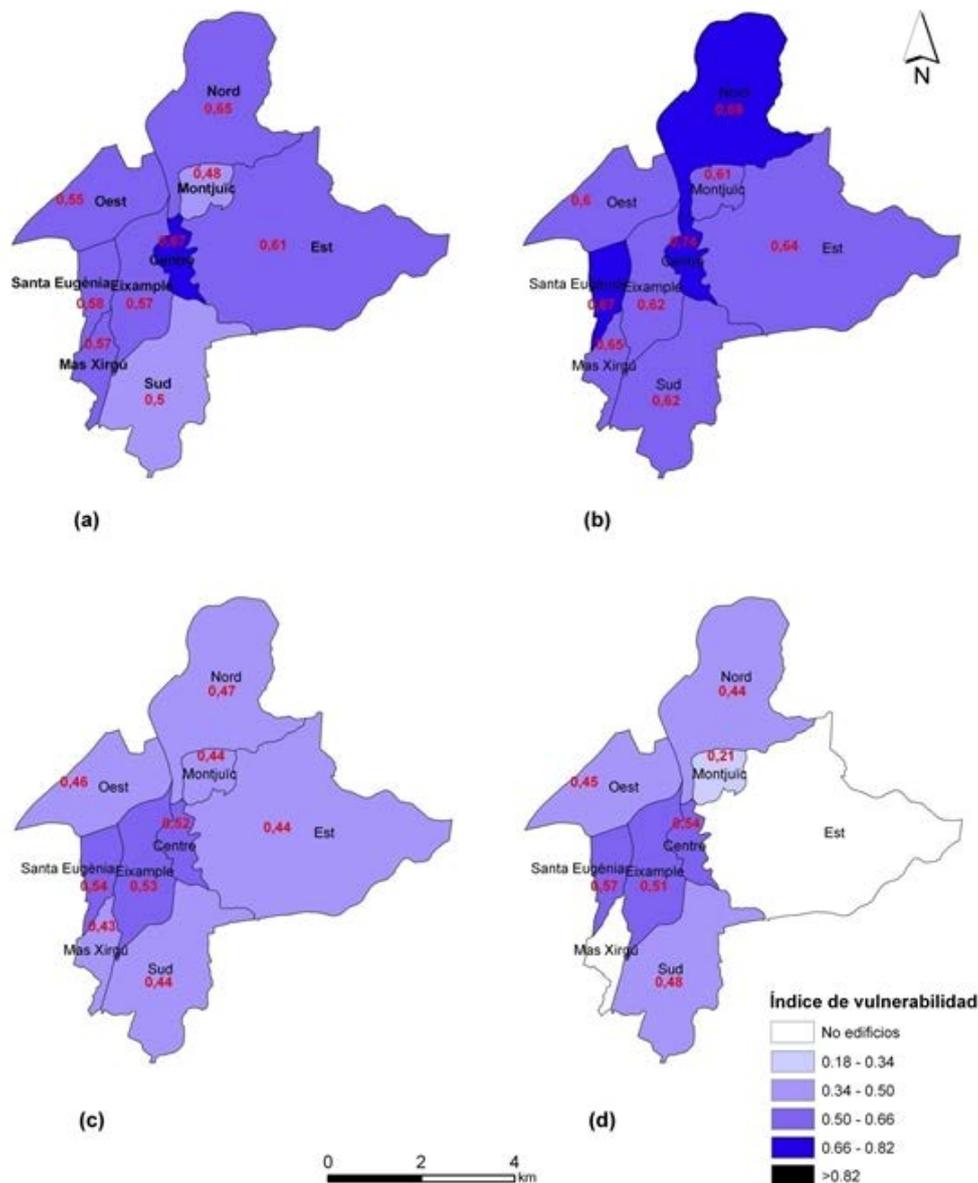


Figura 5.3. Índices de vulnerabilidad medios por barrio. a) todos los edificios de viviendas. b) edificios de mampostería. c) edificios de hormigón armado. d) edificios con estructura metálica.

El índice medio del barrio del *Centre* es de 0.67 que, aunque se trata del mayor valor del índice de vulnerabilidad de todo el municipio, dentro de la escala EMS-98 representa pertenencia a clase B o C, lo que se puede considerar como vulnerabilidad entre moderada y baja. Los barrios que presentan menor vulnerabilidad son *Montjuïc*, con un índice medio de 0.48; y *Sud*, con un índice medio de 0.5. En el caso de *Montjuïc*, la combinación de edificios modernos y bajas alturas genera el detonante de esta vulnerabilidad clase D. En el caso del barrio *Sud* es la existencia de prácticamente la totalidad de edificios bajos junto a tipología de HA lo que hace de este barrio un barrio muy poco vulnerable frente acciones sísmicas.

Figura 5.3b), los mayores valores de vulnerabilidad se concentran en el casco antiguo y en los barrios *Nord* y *Santa Eugènia*. El índice de vulnerabilidad medio del Centre es el más alto, pues la mayoría de edificios de mampostería son de piedra y son muy antiguos. En general, para mampostería, los índices toman valores que van desde 0.6 a 0.74. Los edificios modernos de hormigón armado (Figura 5.3c), sin embargo, muestran índices de vulnerabilidad menores, en el rango entre 0.43 y 0.54. Éstos concentran sus mayores valores en los barrios del Centre, *Eixample* y *Santa Eugènia*, ya que es en estos donde hay edificios de mayores alturas. Por otra parte, los edificios de acero presentan vulnerabilidades más heterogéneas (Figura 5.3d).

Los barrios *Est* y *Mas Xirgu* están representados por un índice 0 que representa la inexistencia de edificios de esta tipología. Por otra parte, los barrios *Centre*, *Eixample* y *Santa Eugènia* tienen vulnerabilidades más elevadas: 0.54; 0.51; 0.57 respectivamente, sin llegar a superar las vulnerabilidades de edificios de HA en cada caso. Tanto en el barrio de *Eixample* como en el Centre, la mayoría de edificios tienen su planta baja dedicada a comercios, por lo que se han construido más altas y diáfanas lo que genera un aumento en la vulnerabilidad de estas estructuras. Este hecho es uno de lo que provoca que estos barrios presenten vulnerabilidades más elevadas.

En contraposición, *Montjuïc* tiene un índice de vulnerabilidad medio de 0.21; asociado a clase E, que indica una vulnerabilidad muy baja. Esto es debido, entre otros factores, a que las estructuras metálicas que existen en este barrio son muy recientes y pertenecen a edificaciones de poca altura, en muchos casos se trata de reformas que refuerzan la estructura e incrementan la resistencia de su estructura. El valor más probable del índice de vulnerabilidad obtenido para cada tipología correlacionado con la intensidad macrosísmica mediante funciones de vulnerabilidad semiempíricas permitirá estimar el grado de daño medio y obtener escenarios de daño sísmico.

5.6 Distribución del índice de vulnerabilidad por barrios

Para representar la distribución de la vulnerabilidad obtenida mediante el método del índice de vulnerabilidad se han utilizado rangos de índices de vulnerabilidad que se aproximan a las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 (Figura 5.4) (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004; Giovinazzi, 2005). Como puede observarse, un índice de

vulnerabilidad puede indicar la pertenencia a dos clases de vulnerabilidad. Se han tomado los rangos definidos en la misma figura para definir la pertenencia a las diferentes clases de vulnerabilidad.

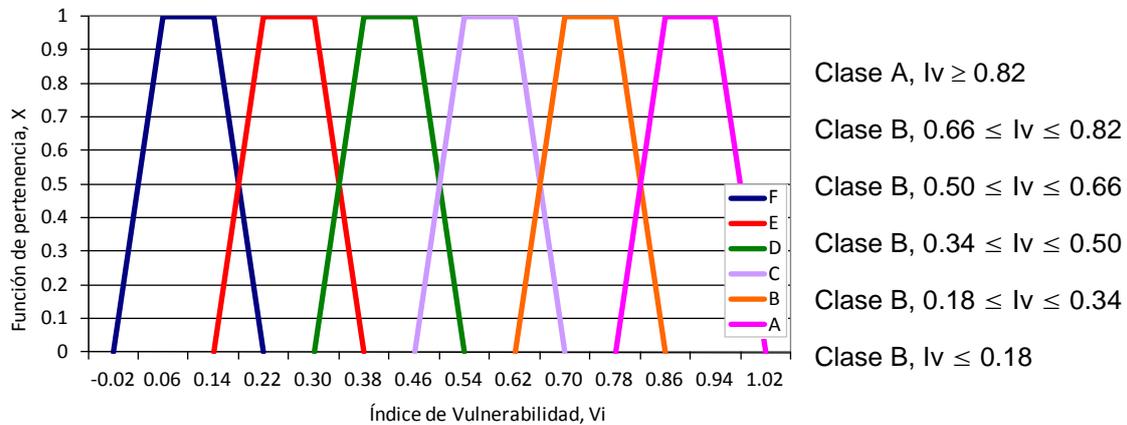


Figura 5.4. Equivalencia entre las clases de vulnerabilidad de la escala EMS-98 y los índices de vulnerabilidad.

En la Figura 5.5 pueden observarse las diferentes distribuciones del índice de vulnerabilidad en cada uno de los barrios. De su observación puede concluirse que en la mayoría de los barrios predomina la clase de vulnerabilidad C; el barrio *Est* es el que presenta un porcentaje más elevado de edificios pertenecientes a esta clase (66.25%). En el caso de *Montjuïc*, la clase que predomina es la D, con lo que se puede deducir que será el barrio menos vulnerable de Girona. El *Centre* es el barrio más homogéneo respecto a distribución de vulnerabilidad, aunque predominan las clases B y C con un 31.54% y un 32.33% de edificios respectivamente.

En conclusión, y observando la gráfica del municipio de Girona (ver Figura 5.3 y Figura 5.6), se puede considerar que en Girona predomina la clase de vulnerabilidad C (51.13% de edificios) seguida de la clase D (32.7% de edificios). En base a esto puede definirse la **vulnerabilidad** del municipio de Girona como entre **media** y **baja**. Es mejor realizar los cálculos de vulnerabilidad a nivel de barrios que a nivel de municipio, ya que permite obtener resultados de mayor resolución y más cercanos a la realidad. El número de edificios de cada barrio también permite un tratamiento representativo. Pero, al ser un método estadístico, los resultados en ningún caso deben interpretarse a nivel de edificios individuales (Giovinazzi y Lagomarsino, 2004).

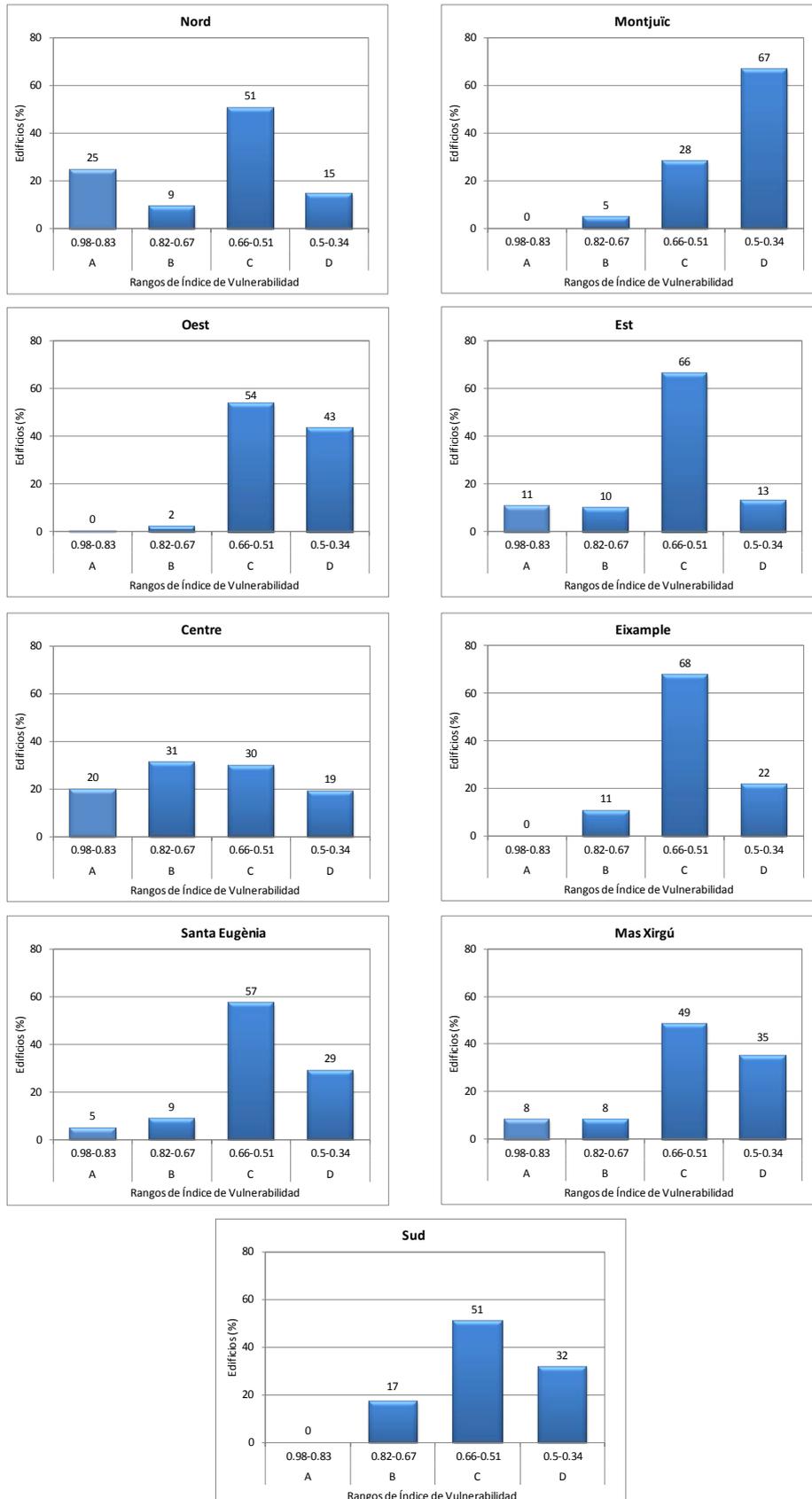
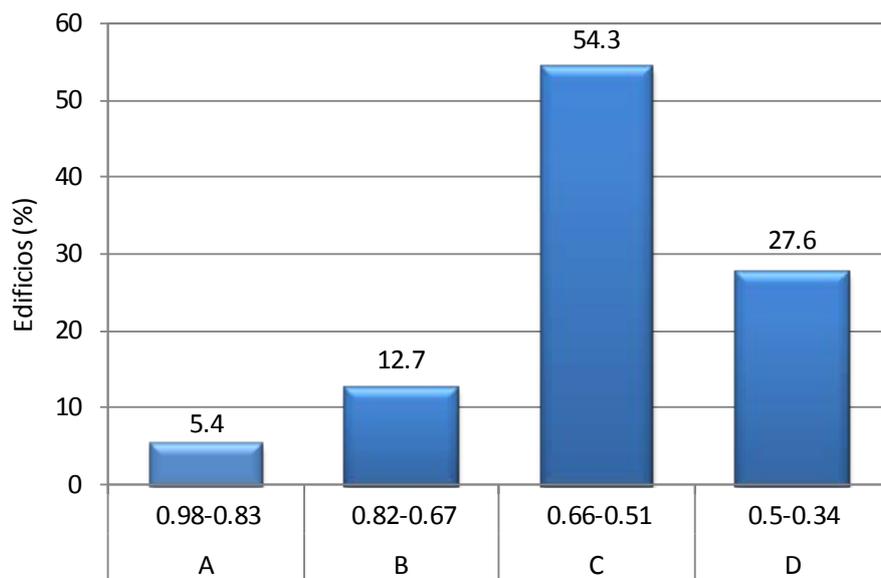


Figura 5.5. Distribución de edificios en clases de vulnerabilidad asociadas a la distribución del índice de vulnerabilidad obtenida para los barrios del municipio de Girona.



Rangos de Índice de Vulnerabilidad

Figura 5.6. Distribución de edificios en clases de vulnerabilidad asociados a la distribución del índice de vulnerabilidad obtenida para el municipio de Girona (Total de edificios: 9482).

6 Peligrosidad sísmica local para la ciudad de Girona

6.1 Introducción

La peligrosidad sísmica, junto con la vulnerabilidad sísmica, constituye la base para la estimación del riesgo sísmico. En este capítulo se realiza una descripción de la sismicidad de la región representada mediante los diferentes mapas de peligrosidad sísmica utilizados para este estudio. También se presentan dos estimaciones de los efectos de suelo que pueden afectar a la ciudad de Girona, distinguiendo zonas de diferente comportamiento sísmico dentro del municipio. La primera se basa en el análisis de los datos geotécnicos disponibles y la segunda en técnicas avanzadas que permiten realizar una microzonación del municipio. De esta manera los efectos de suelo se incorporaran para obtener la peligrosidad local que definirá el escenario sísmico que será considerado para la evaluación del daño sísmico esperado.

6.2 Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica de Cataluña se considera entre moderada y baja. La norma sísmica española NCSE-02 (2002) establece que el nivel de aceleración con un periodo de retorno de 475 años en la ciudad de Girona es de 0.08 g. Si se utiliza la relación entre aceleración básica e intensidad macrosísmica de la norma anterior (NCSE-94, 1994) este valor corresponde a una intensidad macrosísmica algo por encima de VII.

El *Institut Geològic de Catalunya* (IGC) ha desarrollado estudios específicos de la peligrosidad sísmica de Cataluña y de Girona incluyendo el análisis y la cuantificación de los efectos de sitio producidos por las características de la respuesta de suelos. Así, el estudio de base para definir el escenario sísmico el análisis de la peligrosidad de Secanell (1999) quien define las intensidades con un periodo de retorno de 500 años para todos los municipios de Cataluña. Secanell (1999) también considera los efectos de suelo pero a nivel municipal.

En la Figura 6.1 se muestran los mapas de peligrosidad sísmica de Secanell (1999): uno para un suelo medio y otro considerando efectos de suelo a nivel municipal. Estos mapas de peligrosidad sísmica forman parte del capítulo sobre Conocimiento del Riesgo incluido en el plan de emergencias sísmicas de Cataluña (SISMICAT, 2003). La intensidad macrosísmica para un suelo medio para la ciudad de Gerona es de VII, mientras que considerando el efecto de suelo medio con un incremento de 0.5 para este municipio, esta intensidad es de VII-VIII.

6.3 Efectos de suelo según la zonación geotécnica de Girona

La norma NCSE-02, caracteriza el fenómeno de amplificación de la acción sísmica por efecto de suelo blando mediante el coeficiente C. Este coeficiente, mayor que la unidad, actúa como un factor multiplicativo de la aceleración sísmica básica (a_b/g), y, como veremos enseguida, puede interpretarse, también, como un incremento de intensidad macrosísmica cuya finalidad es tener en cuenta el efecto del suelo sobre la intensidad macrosísmica. El coeficiente C se calcula a partir del promedio de los coeficientes C de los suelos de los 30 primeros metros del subsuelo.

En el estudio de microzonación sísmica realizado en la zona urbana de Girona (Soler et al., 2012), cuyo resumen se presenta en el Anexo E, se deduce el coeficiente C para las columnas de datos geotécnicos disponibles en el municipio de Girona. que delimita las zonas con respuesta sísmica similar. La Figura 6.2 muestra los resultados de Soler et al. (2012). De acuerdo con este estudio, los suelos del municipio de Girona pueden clasificarse mediante los siguientes valores del coeficiente C que dividen Girona en dos zonas:

1. Zona central, Sur y Oeste con valores de C entre 1.45 y 1.59, que corresponden a materiales aluviales cuaternarios y detríticos del Neógeno, clasificado como tipo II en la norma NCSE-02.
2. Zona Norte y Este con valores de C entre 1.0 y 1.3 que corresponden a afloramientos de materiales del Paleógeno y Paleozoico, clasificado como tipo I en la norma NCSE-02.

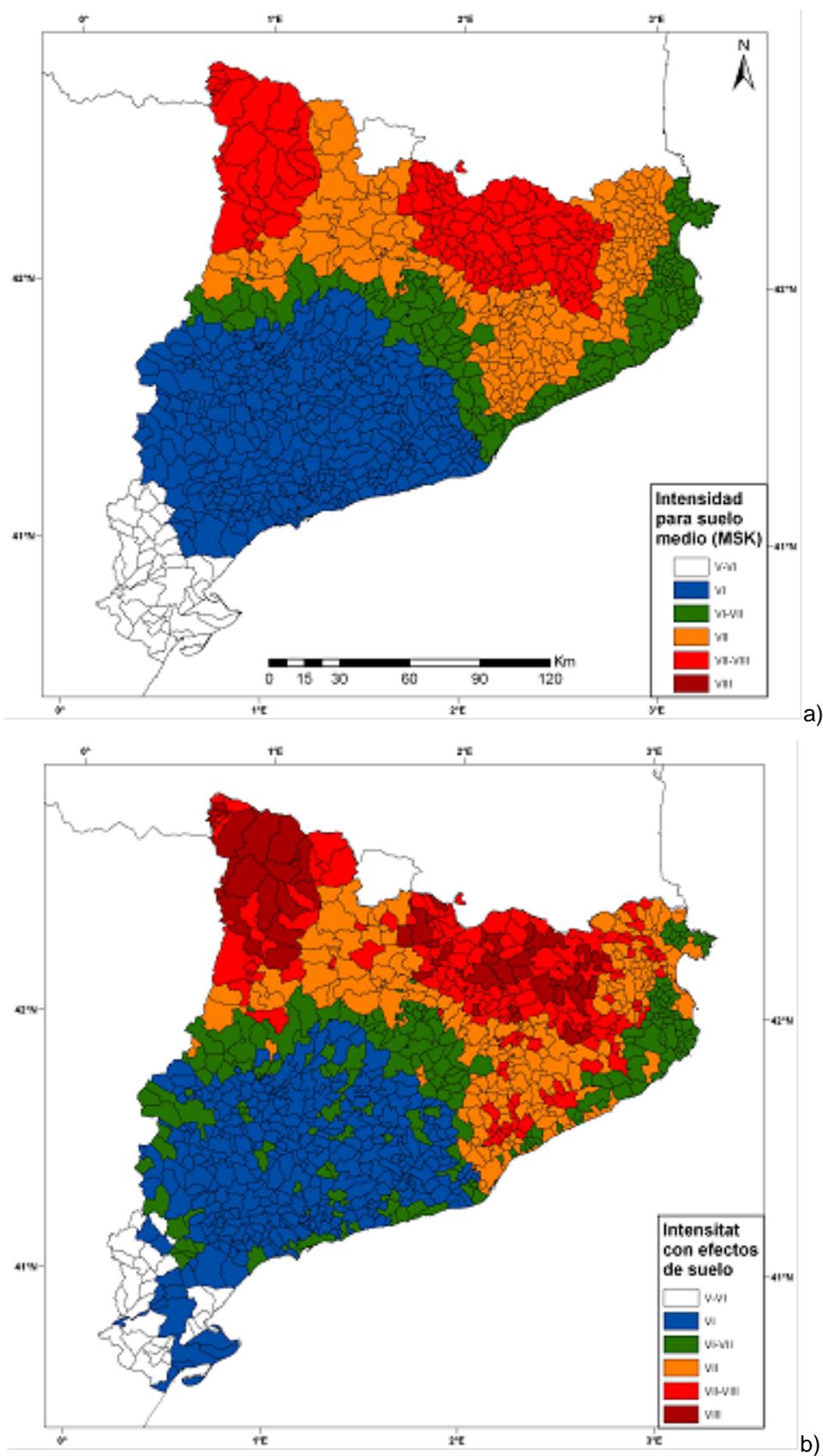


Figura 6.1. Intensidades macrosísmicas para un periodo de retorno de 500 años: a) para un suelo medio y b) con efectos de suelo (Secanell, 1999).

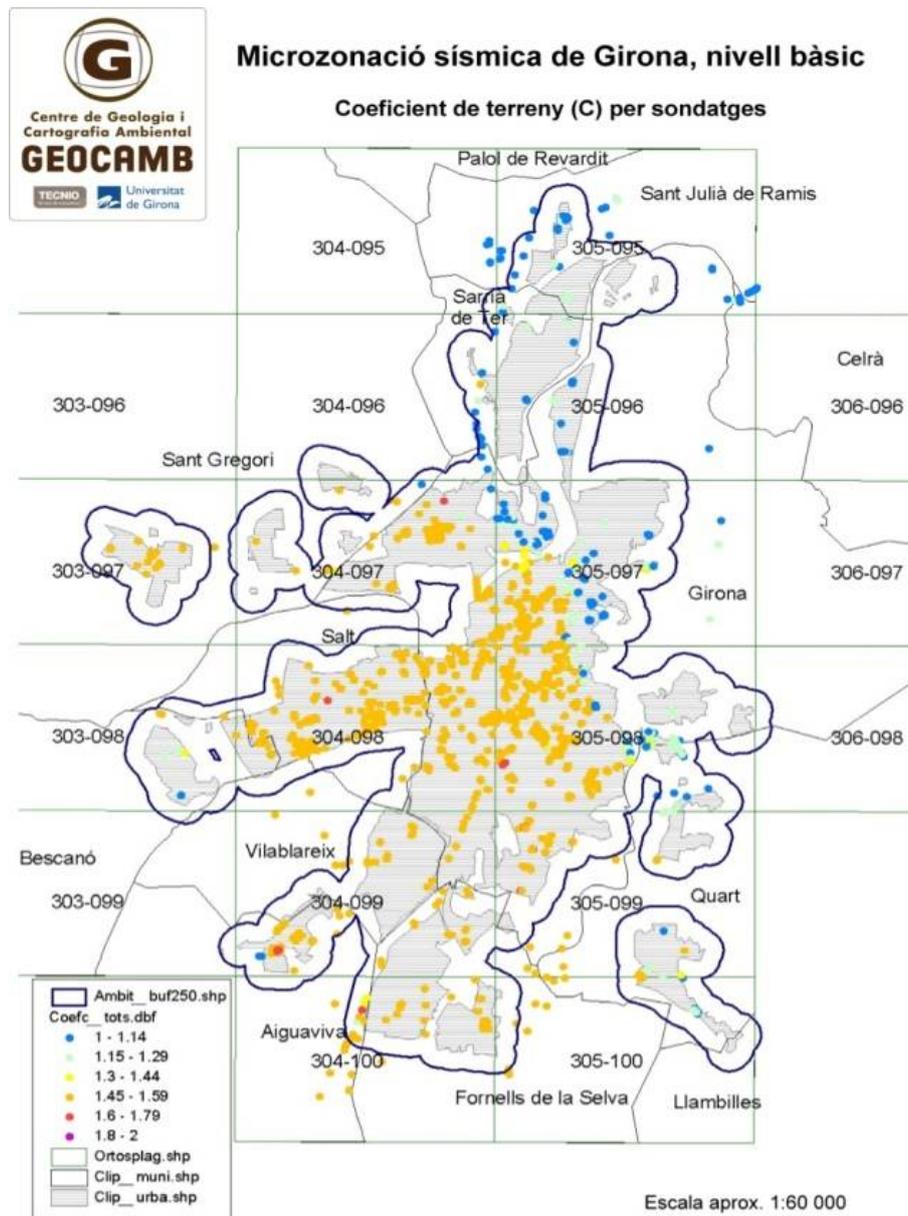


Figura 6.2. Microzonación sísmica de Girona. Representación del coeficiente C.

Vendrell (2011) utilizó esta zonación según el coeficiente C para estimar el incremento de intensidad que se puede esperar debido a la acción del suelo. Basándose en la siguiente relación entre intensidad y aceleración básica propuesta por la norma NCSE-94 propone:

$$I = \left[3.2233 + \log_{10} \left(\frac{a_b}{g} \right) \right] / 0.301030 \quad (6-1)$$

donde (a_b/g) se da en términos de fracción de la gravedad y se puede asociar el coeficiente C para estimar el incremento de la intensidad debido a efectos del suelo.

La zonación según efectos de suelo basada en datos geotécnicos propuesta por Vendrell (2011) define dos zonas con efectos de suelo (ZES) similar (Figura 6.3):

1. Para la zona Norte y Este, tomaremos un valor medio de $C=1$, que corresponde a un incremento de intensidad $\Delta I=0$.
2. Para el resto de municipio, tomaremos un valor medio de $C=1.5$, que corresponde a un incremento de Intensidad. La aceleración, en este caso, tomará valor de $(C a_b)$ y el incremento de intensidad $\Delta I=0.5$.

De esta forma, se obtiene para la zona central, sur y oeste de Girona, un incremento de intensidad por efecto de suelos de 0.5 grados.

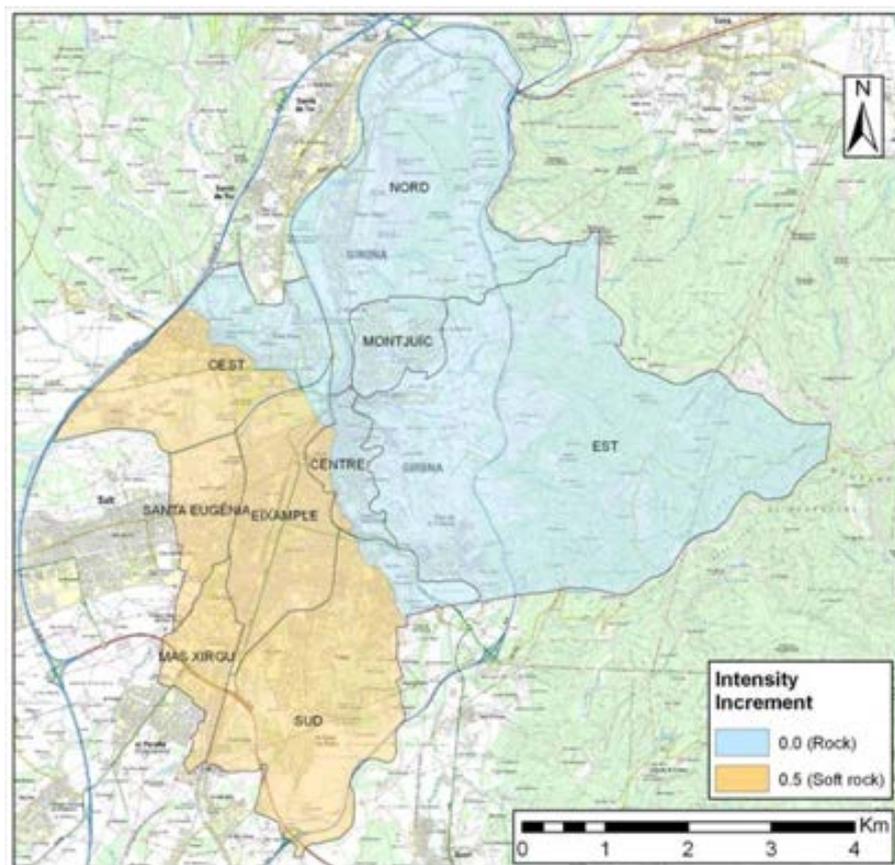


Figura 6.3. Zonación geotécnica propuesta por Vendrell (2011).

6.4 Efectos de suelo según la microzonación sísmica de Macau et al. (2012)

La ciudad de Girona está localizada en el extremo más al norte de la cuenca de La Selva que estuvo relacionada con la apertura suroeste del Mar Mediterráneo durante el Neógeno. En esta área, la cuenca está rellena de sedimentos no consolidados del Neógeno y del Cuaternario con un espesor máximo de 400 metros (Benjumea et al., 2011). Estos depósitos yacen sobre un basamento complejo compuesto por rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico y rocas sedimentarias del Paleógeno.

En marzo de 2011, Macau et al. (2012) realizaron medidas de ruido sísmico en 90 diferentes emplazamientos de la ciudad de Girona. Para obtener la frecuencia fundamental del suelo en estos emplazamientos se calculó el cociente espectral H/V de los mismos. Las frecuencias fundamentales obtenidas para los emplazamientos varían entre 0.4 y 15.6 Hz. Las frecuencias más bajas se concentran en el centro de la cuenca y los valores más altos se distribuyen alrededor de los afloramientos rocosos en el este y al norte de la ciudad.

También realizaron medidas de ruido sísmico con la técnica de “array” en 10 emplazamientos para obtener perfiles de la velocidad de la onda de cizalla (Vs). Las medidas se llevaron a cabo en campos deportivos y parques que ofrecían áreas abiertas apropiadas para el despliegue del “array” para medir el ruido sísmico (100 m x 100 m) dentro de los límites del municipio. Los registros de cada medida de ruido sísmico con la técnica de “array” se analizaron con el método del número de Frecuencia de Onda (FK), el método de la Autocorrelación Espacial (SPAC) y un proceso de inversión (Wathelet, 2008). El procesamiento de las medidas de ruido sísmico se ha llevado a cabo usando el paquete de procesamiento GEOPSY (<http://www.geopsy.org>). Los resultados más importantes obtenidos con la técnica de “array” se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Rangos de la velocidad de onda de cizalla para las diferentes litologías presentes en el municipio de Girona (Macau et al., 2012).

Litología	Vs (m/s)
Cuaternarios	200-300.
Neógenos superiores	400-500
Neógenos inferiores	700-800
Basamento Rocoso	1500-2000

Basándose en los resultados de las medidas de ruido sísmico y la base de datos geotécnica de Girona (Soler et al., 2012), una columna característica del suelo fue definida para cada emplazamiento donde se aplicó la técnica de “arrays”. El método 1-D lineal equivalente (ProShake, 2000) se usó para obtener la función de transferencia y el movimiento del suelo esperado en cada una de las columnas de suelo definidas. Como movimiento de entrada, se escogieron 6 registros de aceleración de la base de datos acelerométricos del proyecto NERIES (Network of Research Infrastructures for European Seismology, 2006-2010) cuyo contenido espectral es similar al espectro en roca definido para la ciudad de Girona por Secanell et al. (2008).

El espectro de respuesta de aceleración y la Intensidad de Arias (AI) se calculó para cada uno de los registros de aceleración sintéticos con efectos de suelo que se obtuvo para cada columna característica. La Intensidad de Arias y la intensidad macrosísmica se relacionan mediante observaciones empíricas como por ejemplo la propuesta por Cabañas et al. (1997) para el área del Mediterráneo. De esta manera, se puede obtener el incremento de intensidad (ΔI) representativo de cada clase de suelo usando la ecuación (6-2) y que depende de la razón de suelo a roca (AI_{SUELO}/AI_{ROCA}) de la Intensidad de Arias de los registros correspondientes.

$$\Delta I = 0.66 \ln \left(\frac{AI_{SOIL}}{AI_{ROCK}} \right) \quad (6-2)$$

Esta microzonación según efectos de suelos de la ciudad de Girona realizada Macau et al. (2012) define 3 zonas asociadas a diferentes incrementos de intensidad como se puede observar en la Figura 6.4:

- Zona 1: Al noroeste de la ciudad se distingue una zona rocosa donde no se modifica la intensidad.
- Zona 2: El área localizada en la cuenca profunda de La Selva al sureste de la ciudad se caracteriza por un incremento de intensidad de +0.5.
- Zona 3: La zona con sedimentos de poca profundidad distribuidos alrededor de afloramientos rocosos presenta un incremento de intensidad de +1.0.

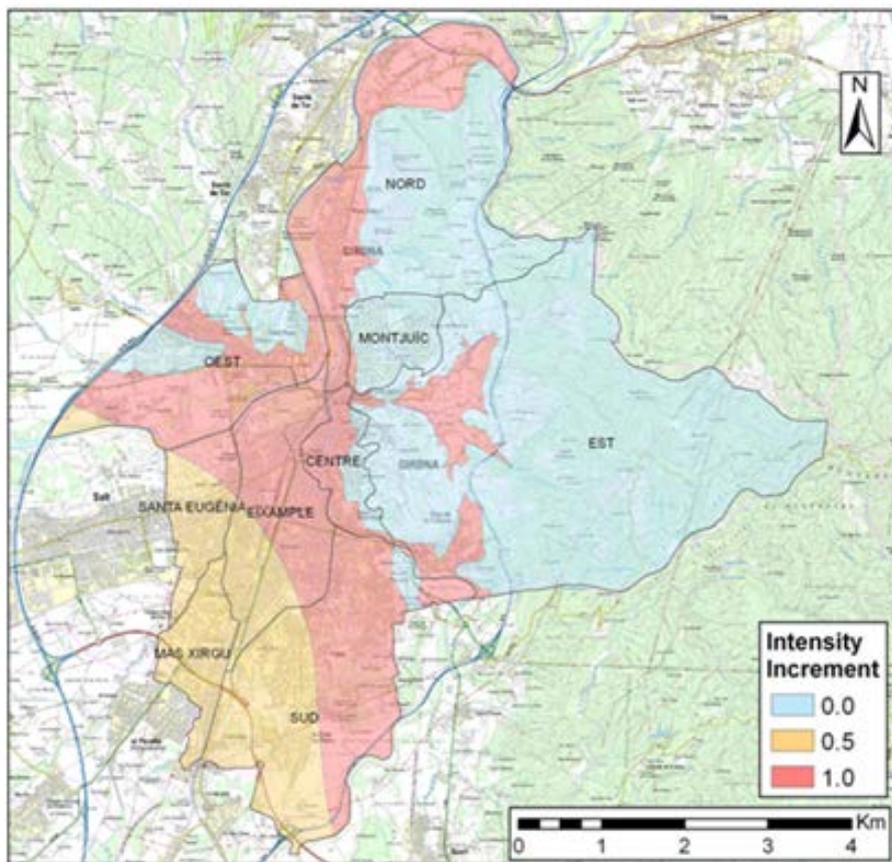


Figura 6.4. Mapa de la microzonación sísmica de la ciudad de Girona.

6.5 Comparación de los efectos de suelos considerados

El efecto de suelo medio aplicado a nivel municipal en el Plan SISMICAT representa un primer esfuerzo para incluir los efectos de suelos en una evaluación regional del riesgo sísmico de Cataluña. Por otro lado, los efectos de suelos basados en estudios a nivel inframunicipal como la zonación geotécnica de Vendrell (2011) o la microzonación de Macau et al. (2012) permiten mejorar la consideración de los efectos de suelos en el riesgo sísmico dentro del municipio.

La Tabla 6.2 muestra una comparación de los incrementos de intensidad obtenidos mediante estas tres aproximaciones de los efectos de suelos para el municipio de Girona. Para cada uno, se ha estimado el porcentaje de área afectada por cada uno de los incrementos de intensidad. Como se puede observar, el efecto de suelo medio a nivel municipal considerado por el Plan SISMICAT (2003) resulta conservador al ser comparado las otras dos evaluaciones de los efectos del suelo dado que la mayoría del área municipal de Girona no se vería afectada por un incremento de intensidad durante un sismo. Aún así provee una buena estimación a nivel municipal dado que según Macau et al. (2012) indica que un 49% del municipio se vería afectado por un incremento de intensidad igual o superior a +0.5.

Tabla 6.2 Comparación de las diferentes evaluaciones de los efectos de suelos para el municipio de Girona en términos del incremento de intensidad.

Fuente	Incremento de intensidad y su área de afectación
SISMICAT (2003)	0% (0.0)
	100% (0.5)
	0% (1.0)
Vendrell (2011)	65% (0.0)
	35% (0.5)
	0% (1.0)
Macau et al (2012)	51% (0.0)
	16% (0.5)
	33% (1.0)

6.6 Peligrosidad Local

Para obtener la peligrosidad local que servirá como escenario sísmico para evaluar el riesgo sísmico, se integran los incrementos de intensidad propuestos por las evaluaciones de los efectos de suelos a la intensidad de VII grados propuesta por el Plan SISMICAT para un suelo medio en el municipio de Girona. Por lo tanto se evaluará el riesgo sísmico para los dos escenarios sísmicos que se obtienen a continuación.

La Figura 6.5 muestra el escenario sísmico asociado a un periodo de retorno de 500 años que se ha obtenido considerando la zonación geotécnica propuesta por Vendrell (2011) donde las intensidades del escenario varían entre VII y VII-VIII grados. El segundo escenario sísmico considerar los efectos de suelos de la microzonación de Macau et al. (2012) como se muestra en la Figura 6.6. En este escenario las intensidades varían entre VII y VIII grados por lo que presenta una mayor peligrosidad sísmica para el municipio.

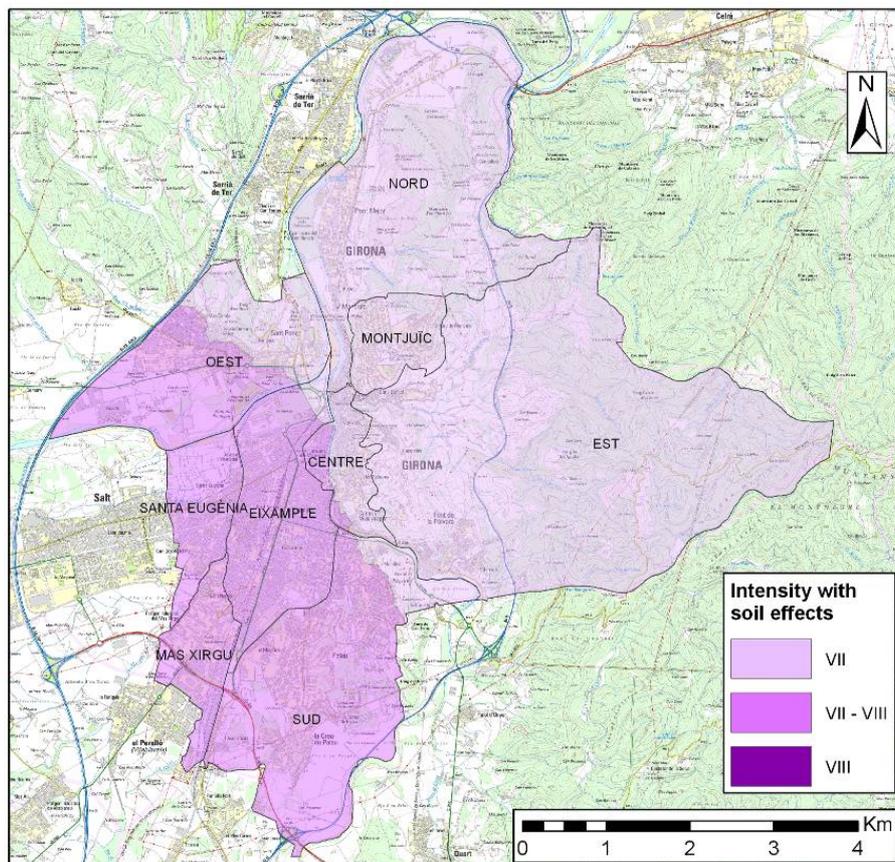


Figura 6.5. Escenario sísmico para un $T=500$ años con efectos de suelo según la zonación geotécnica de Vendrell (2011).

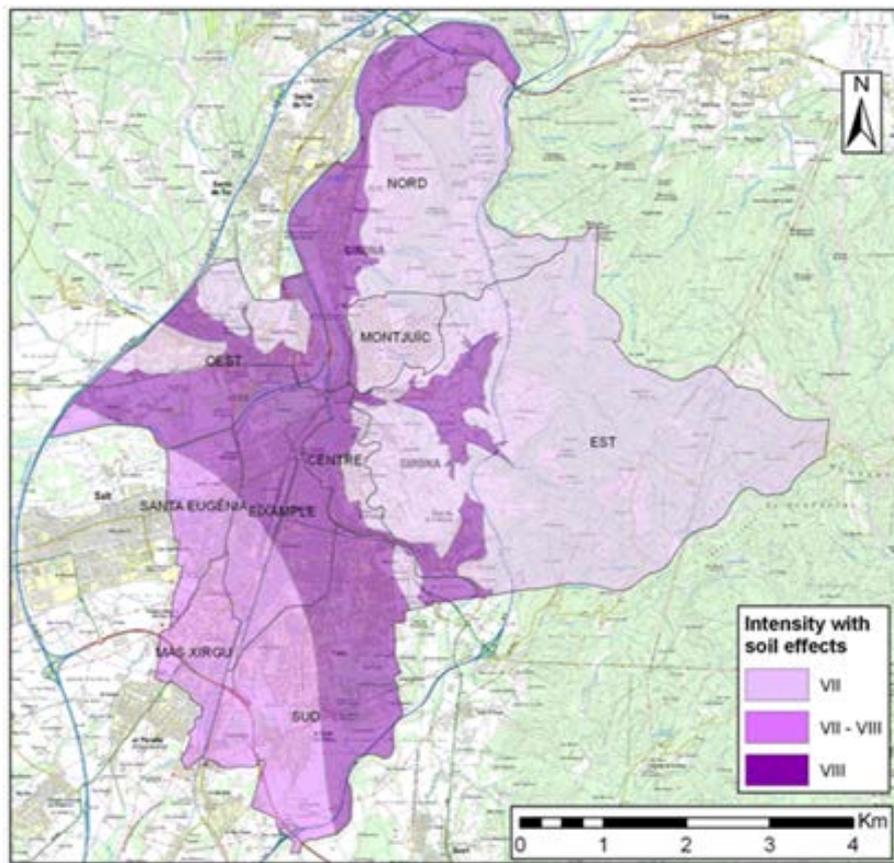


Figura 6.6. Escenario sísmico para un $T=500$ años con efectos de suelo según la microzonación de Macau et al., (2012).

7 Escenarios de daño

7.1 Introducción

En este capítulo se establecen las bases para el desarrollo de escenarios de daño, caracterizando la peligrosidad sísmica de Girona y la vulnerabilidad de su parque de edificios según la metodología del índice de vulnerabilidad. Esta metodología está basada en la escala macrosísmica EMS-98 y cuantifica el terremoto mediante su intensidad macrosísmica y el edificio mediante un índice de vulnerabilidad. Una vez definido el escenario sísmico objeto de análisis y obtenida la vulnerabilidad de los edificios de vivienda del municipio de Girona, se podrá estimar, estadísticamente, el daño esperado.

Así, en primer lugar se define el escenario sísmico elegido para después definir una matriz de tipologías específica para el municipio de Girona. En base a esta matriz se establecen los criterios que permiten la estimación del índice de vulnerabilidad de las diferentes tipologías y se generan los mapas de vulnerabilidad a nivel de barrio. Una vez definido el índice de vulnerabilidad se determina el grado de daño medio esperado para el escenario sísmico escogido.

El método del índice de vulnerabilidad calcula el grado de daño medio esperado a los edificios utilizando las funciones de vulnerabilidad que relacionan el grado de daño medio con la intensidad macrosísmica y con el índice de vulnerabilidad mediante la ecuación propuesta por Giovinazzi (2005). Esta metodología ha sido explicada anteriormente en el Capítulo 2. La hipótesis de la distribución binomial permite calcular fácilmente las probabilidades de daño para cada uno de los grados de daño a partir del grado de daño medio.

Como se ha comentado anteriormente, el estudio se ha realizado sobre los edificios de vivienda de Girona, aunque siempre es conveniente estudiar edificios esenciales, como por ejemplo hospitales y parques de bomberos entre otros, así como los edificios de especial importancia, como por ejemplo las escuelas, y otras infraestructuras.

7.2 Escenario de daño basado en la zonación geotécnica de Vendrell (2011)

A continuación se presentan los resultados de daño esperado para los nueve barrios de Girona para los edificios de vivienda y la población obtenidos de la aplicación de la metodología del Índice de Vulnerabilidad y el escenario sísmico basado en la zonación geotécnica de Vendrell (2011). Como resultado de la evaluación del daño físico se obtiene el número de edificios distribuidos según los grados de daño, desde el daño 0 que implica no daño, al daño 5, que equivaldría al colapso total de la edificación. Los resultados se presentan a nivel de barrio y a nivel de municipio.

7.2.1 Daños a los edificios de vivienda

Como se ha descrito en el Capítulo 2, conociendo la intensidad que afecta a cada clase de edificios y su índice de vulnerabilidad final, se puede obtener el grado de daño medio (μ_D), cuyo valor varía entre 0 y 5. Valores pequeños de μ_D indican poco daño mientras que valores grandes corresponden a daños severos de acuerdo a los estados de daño adoptados: 0-nulo (*None*), 1-leve (*Slight*), 2-moderado (*Moderate*), 3-severo (*Heavy*), 4-extensivo (*Extensive*), 5-completo (*Destruction*).

En base al escenario sísmico basado en la zonación geotécnica se han definido 13 “zonas de estudio” (ZDE) para la evaluación del daño sísmico esperado. Estas zonas que se muestran en la Figura 7.1 conservan la distribución de barrios pero ha sido preciso subdividir algunos barrios por causa de la frontera entre los dos tipos de suelo considerados. Una vez definidas las matrices de probabilidades de daño y según donde estén situados sobre suelo duro o roca o suelo blando, puede calcularse el daño físico esperado para cada ZDE.

Los resultados del grado de daño medio obtenido para cada ZDE y para todo el municipio de Girona se muestran en la Tabla 7.1 y en los mapas en la Figura 7.2. Para escenarios sísmico moderado como el considerado, el daño esperado es entre nulo y leve ya que el grado de daño medio, μ_d , para el municipio de Girona es de 0.72 en una escala de 0 a 5. A nivel de zonas de estudio se obtiene que la zona más vulnerable corresponde a la sección del barrio *Centre* que yace sobre suelo blando, representado por un índice de daño medio de 1.27; implicando daños entre leve y moderado.

En el caso opuesto se encuentran el barrio de *Montjuïc* y la zona norte del barrio *Oest* (zona que descansa sobre terreno rocoso). Sus grados de daño medio, 0.38 y 0.44 respectivamente, los definen como las zonas de menor riesgo sísmico del municipio. La combinación entre la peligrosidad local y la distribución geográfica de edificios de una gran heterogeneidad permite comprender los diferentes valores de daño medio obtenidos para cada barrio.

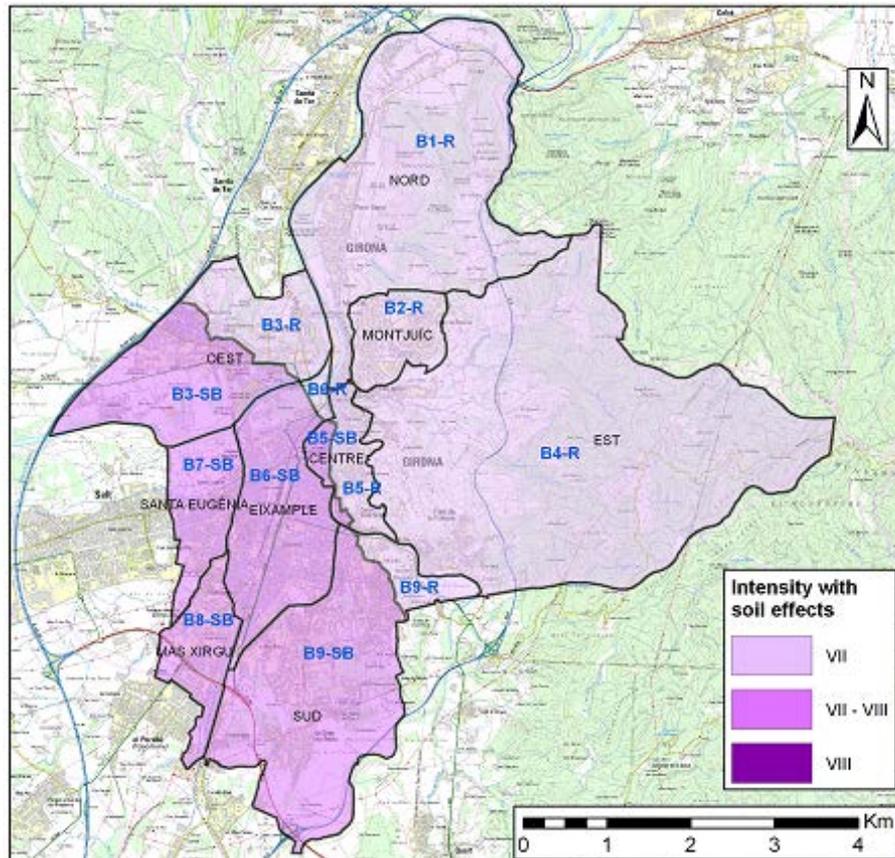


Figura 7.1. Zonas de estudio considerando los efectos de suelo de la zonación geotécnica de (Vendrell, 2011).

En la Figura 7.2 se muestra el índice de vulnerabilidad medio (números en azul) para cada barrio y la distribución del grado de daño para cada ZDE. *Montjuïc* y la zona norte del barrio *Oest* contienen los edificios menos vulnerables (índices 0.48 y 0.53 respectivamente) y a su vez, éstos están construidos sobre suelos duros con una menor intensidad (Figura 7.1), por lo que se justifica que sean las ZDE con probabilidades más bajas de daño probable.

Tabla 7.1. Número de edificios de cada ZDE, su porcentaje respecto al total de los edificios de Girona y valor del daño medio esperado para cada ZDE y para el municipio en general (Vendrell, 2011).

Barrio	Id	Edificios	Edificios (%)	μ_d	Edificios inhabitables
Nord	B1-R	600	6.3	0.85	25
Montjuïc	B2-R	553	5.8	0.38	2
Oest	B3-R	464	4.9	0.44	18
	B3-S	919	9.7	0.74	
Est	B4-R	812	8.6	0.67	17
Centre	B5-R	922	9.7	0.91	77
	B5-S	346	3.6	1.27	
Eixample	B6-R	12	0.1	0.55	46
	B6-S	2480	26.2	0.75	
Sta. Eugènia	B7-S	562	5.9	0.82	17
Mas Xirgu	B8-S	24	0.3	0.84	1
Sud	B9-R	105	1.1	0.51	39
	B9-S	1683	17.7	0.60	
MUNICIPIO GIRONA		9482	100	0.72	241

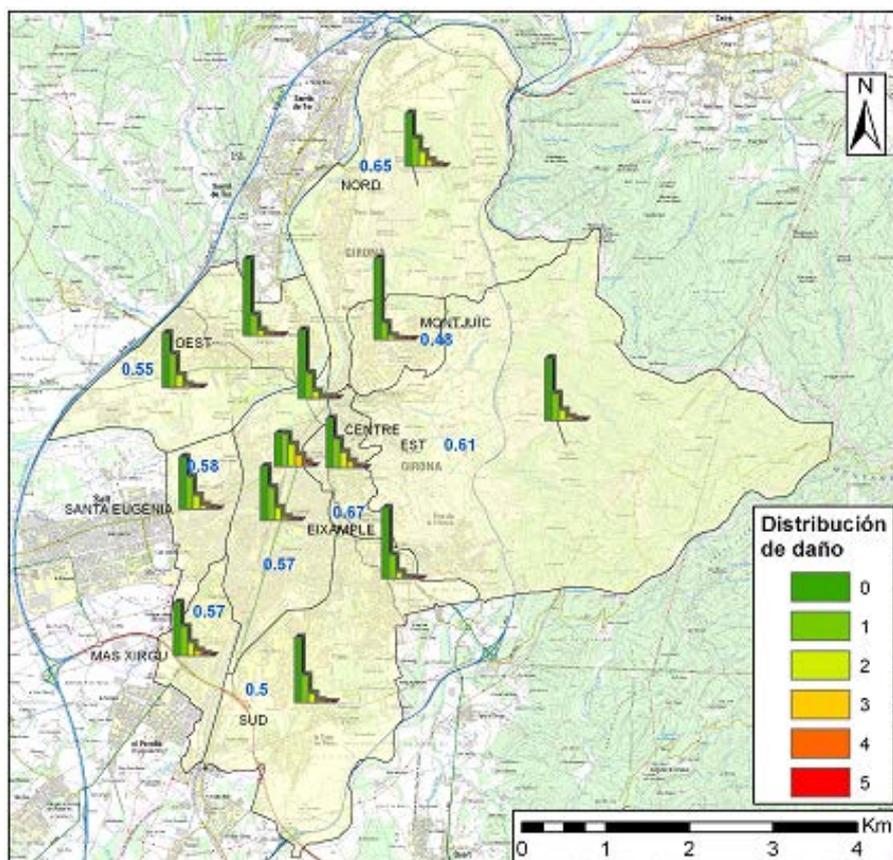


Figura 7.2. Distribuciones de los índices de vulnerabilidad (números en azul) y de la probabilidad de daño para cada ZDE

Los edificios más vulnerables son los del *Centre*, lo que, combinado con una intensidad VII-VIII en parte de su área, causa que tenga la probabilidad del grado de daño 3 (daños graves) más elevada de todos los barrios (6.4%). Pero, en general, es poco probable que colapsen edificios en ningún barrio. La distribución territorial del daño medio esperado puede apreciarse con mayor facilidad en la Figura 7.3.

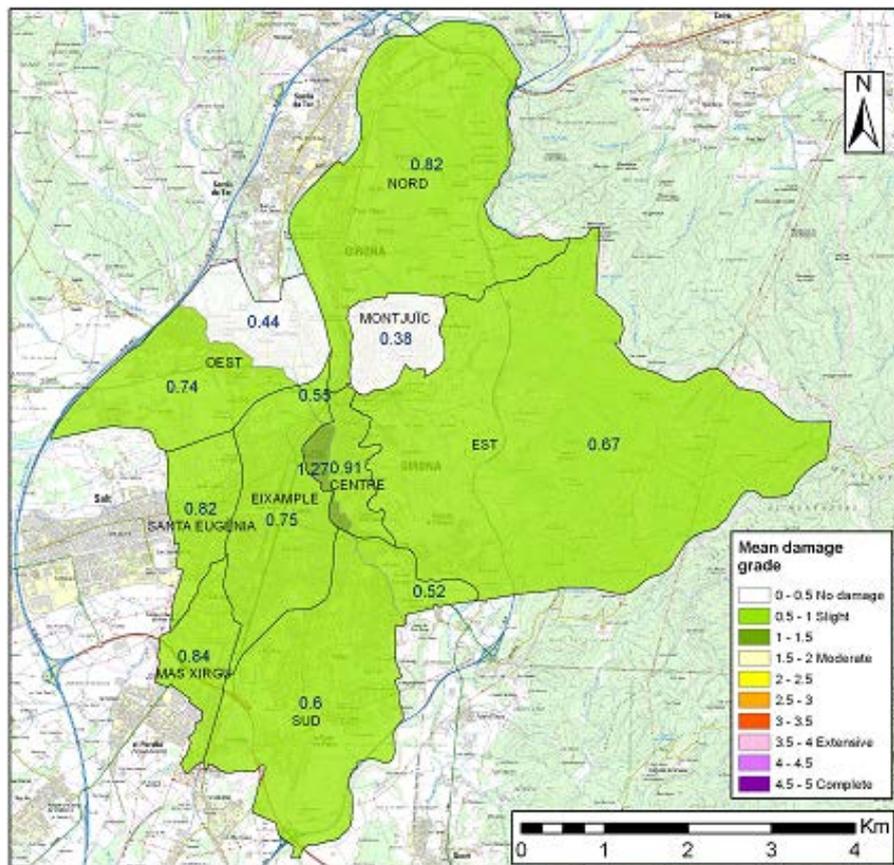


Figura 7.3. Distribución del grado de daño medio esperado por barrios según la zonación geotécnica de Vendrell (2011).

La Figura 7.4 muestra el detalle de la distribución del grado de daño para cada barrio. En esta figura puede observarse de forma clara que los barrios con mayor probabilidad de daño son *Centre*, *Nord*, *Santa Eugènia* y *Mas Xirgu*. Éstos son los que presentan mayor probabilidad de sufrir daño severo y extensivo asociados a los grados de daño 3 y 4, respectivamente. En el caso de los barrios menos vulnerables, *Montjuïc* y *Sud*, se espera que más del 60% de los edificios no sufran daños, por lo que sólo los restantes sufrirían algún tipo de daño, pero con probabilidades de colapso muy bajas.

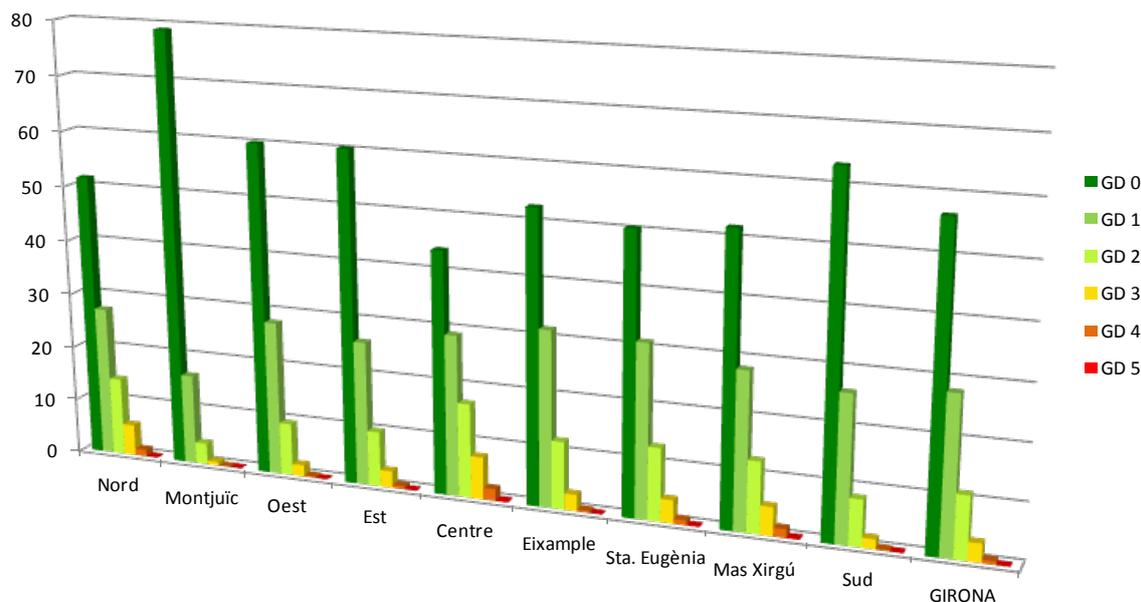


Figura 7.4. Distribución de daños de los barrios del municipio de Girona para el escenario sísmico basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).

El número de edificios pertenecientes a cada barrio o ZDE es esencial para el cálculo del daño medio de todo el municipio, ya que la vulnerabilidad de cada barrio influye en la del municipio proporcionalmente al número de edificios que se encuentran en él. Por este motivo, los barrios del *Eixample* (B6-SB) y *Sud* (B9-SB) son los más influyentes en el cálculo de la vulnerabilidad y daño medio de Girona a nivel municipal. En la Tabla 7.1 puede observarse el número de edificios que dejarían de ser habitables en cada barrio que, como es de esperar, está directamente relacionado con el valor del grado de daño medio definido para cada zona.

El barrio con mayor número de posibles edificios inhabitables es el *Centre*, con un 8 % del total de edificios de Girona. A éste le sigue el *Eixample*, con un 5 % de edificios inhabitables. Se concluye que, para un escenario sísmico relativamente moderado, se puede esperar que un 2.5% de los edificios del municipio de Girona sufran suficientes daños para comprometer su habitabilidad. Teniendo en cuenta que el parque de edificios residenciales considerado es de 9 482 viviendas, este porcentaje corresponde a 241 edificios inhabitables. Con la distribución de las probabilidades de daño se puede hacer una estimación del número de edificios que podrían resultar lo suficientemente dañados como para no ser habitables.

La Figura 7.5 muestra la estimación del número de edificios que podrían resultar inhabitables para el escenario de daño basado en la zonación geotécnica. Como era de esperarse el barrio con mayor número de edificios inhabitables es *Centre* seguido de los barrios *Nord*, *Eixample* y *Sud*. El resto de los barrios también presentan edificios inhabitables con lo que para el municipio podrían esperarse poco menos de 250 edificios inhabitables para este escenario.

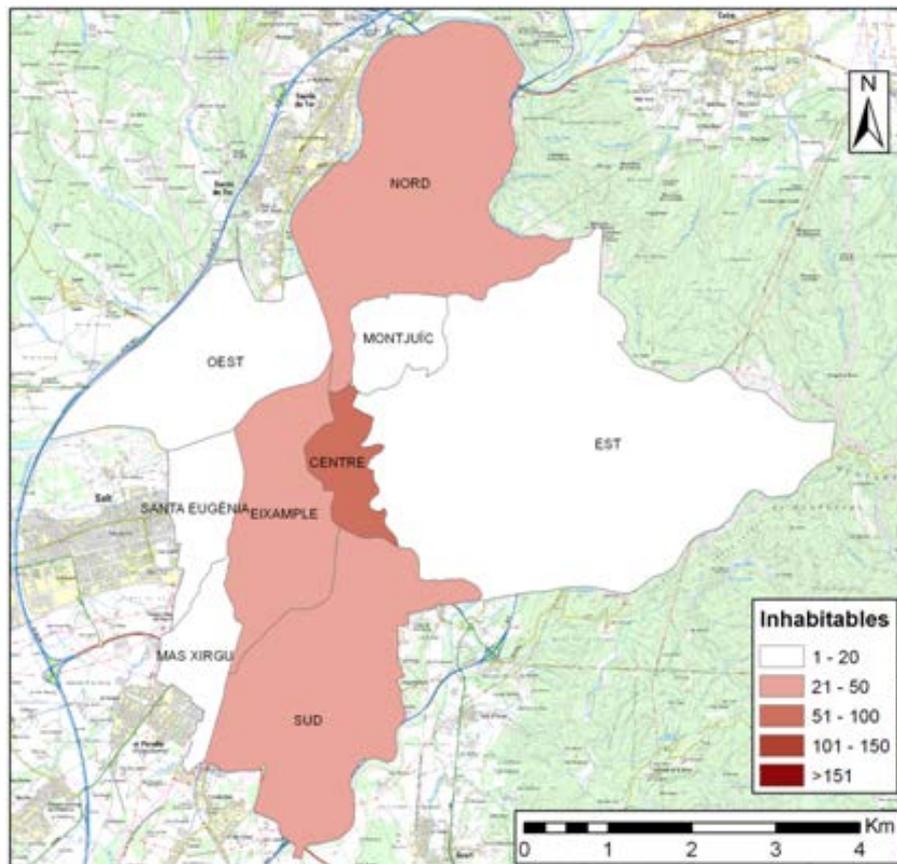


Figura 7.5. Estimación de los edificios que podrían resultar inhabitables (NEI) en cada barrio según el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).

7.2.2 Daños a la población

La ocurrencia de víctimas humanas como consecuencia de un terremoto está directamente relacionada con el número de edificaciones dañadas y personas expuestas. Estimar el daño a las personas requiere conocer; por una parte, las probabilidades de ocurrencia de los grados de daño; y por otra, la evolución espacial y temporal de la población: población residente, población flotante, distribución de la población a lo largo del día, a lo largo de la semana y a lo largo del año.

A continuación se utiliza la metodología ATC-13, explicada en el Capítulo 2, para estimar estos daños inducidos. Respecto a la base de datos utilizada, el número de edificios residenciales con el que se trabaja es información cedida por el *Ajuntament de Girona*, el cual también ha proporcionado la base de datos de la población censada y flotante (conceptos explicados en el Capítulo 3) estimada a fecha de 1 de enero de 2009. Estos datos se corresponden con el nivel de precisión de la metodología, ya que se trabajará con los datos de población distribuida a nivel de barrios (Tabla 7.2).

Es muy importante tener en cuenta que cuanto más precisos sean los datos, mejores serán los resultados obtenidos; y que, por supuesto, con el método del índice de vulnerabilidad, al aplicarse a nivel de barrio, se conoce la distribución de la población y los resultados se ajustan más a realidad. En la base de datos de población, cedida por UMAT, se distinguen; población censada y población real, donde la segunda considera además de la censada, la población flotante (conceptos definidos en el Capítulo 3). En este estudio, para el análisis de los daños inducidos en la población, se ha utilizado la **población real**, ya que es la más desfavorable pues incluye el máximo de personas que se pueden encontrar en el escenario estudiado.

Tabla 7.2. Población padrón y real de la base de datos de UMAT.

Unidad territorial		Población padrón	Población real	
BARRIOS	B1	<i>Nord</i>	3717	4522
	B2	<i>Montjuïc</i>	2697	2960
	B3	<i>Oest</i>	8637	9916
	B4	<i>Est</i>	4569	5251
	B5	<i>Centre</i>	9053	14144
	B6	<i>Eixample</i>	41120	54727
	B7	<i>Sta. Eugènia</i>	16233	19047
	B8	<i>Mas Xirgu</i>	23	23
	B9	<i>Sud</i>	9735	11801
Municipio de Girona		95784	122391	

Aplicando la metodología ATC-13, se obtienen estimaciones del número de personas heridas y de víctimas mortales. La Figura 7.6 se presenta la distribución por barrio del número esperado de personas que quedarían sin hogar debido al daño en los edificios, mientras que la Figura 7.7 muestra los rangos correspondientes a las personas que podrían resultar heridas y las que podrían fallecer.

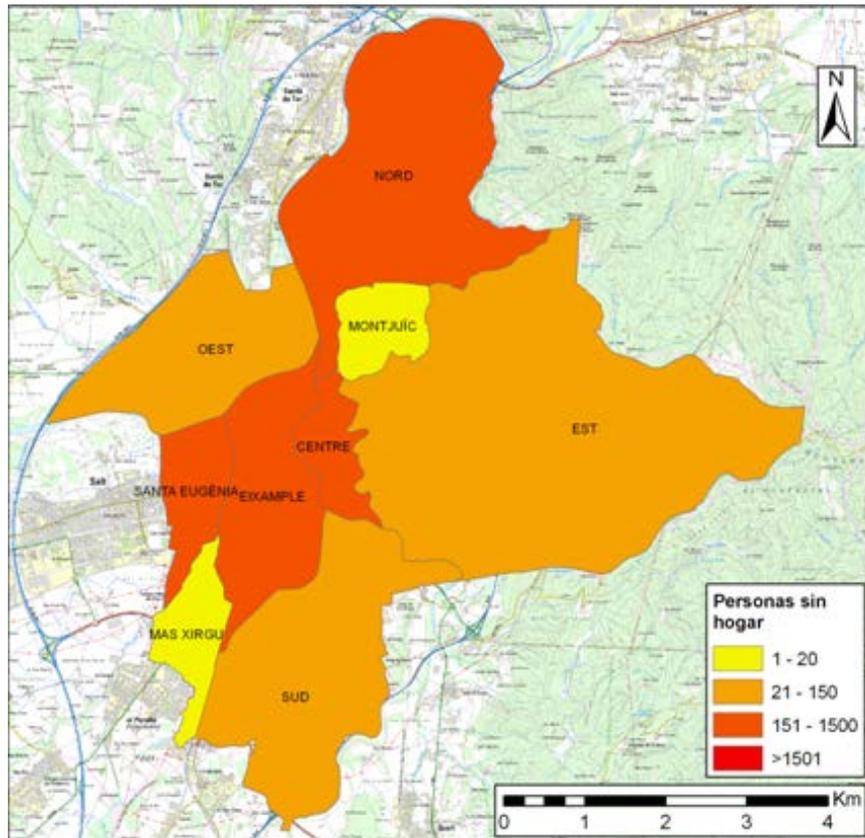
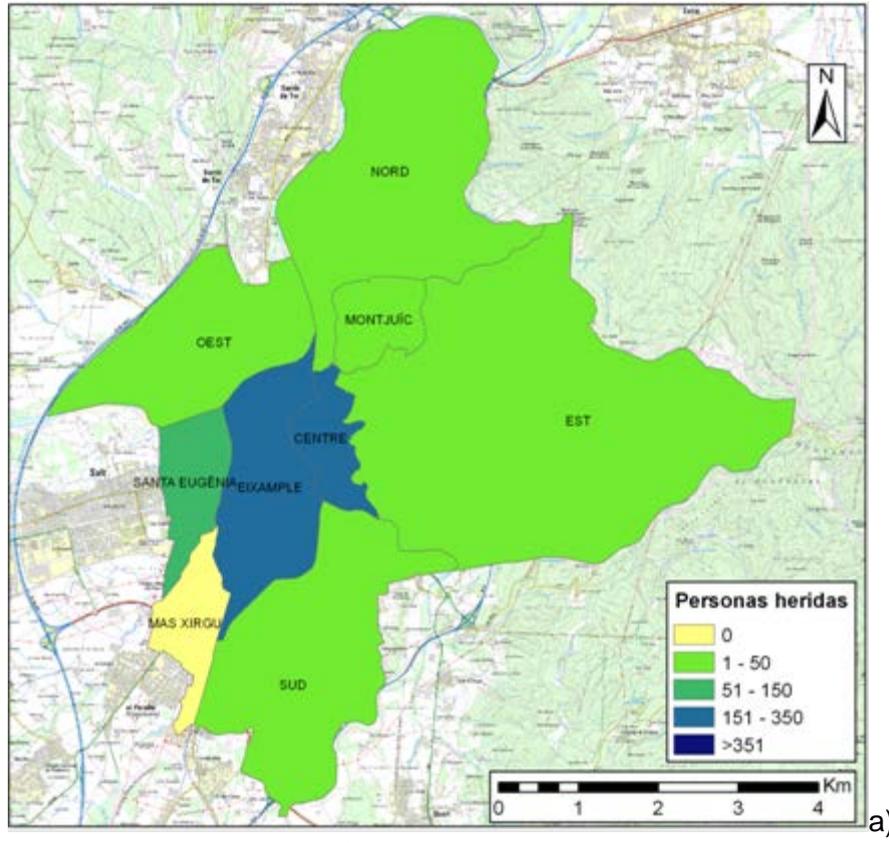


Figura 7.6. Distribución de las personas sin hogar (NPSH) que se esperan según el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).

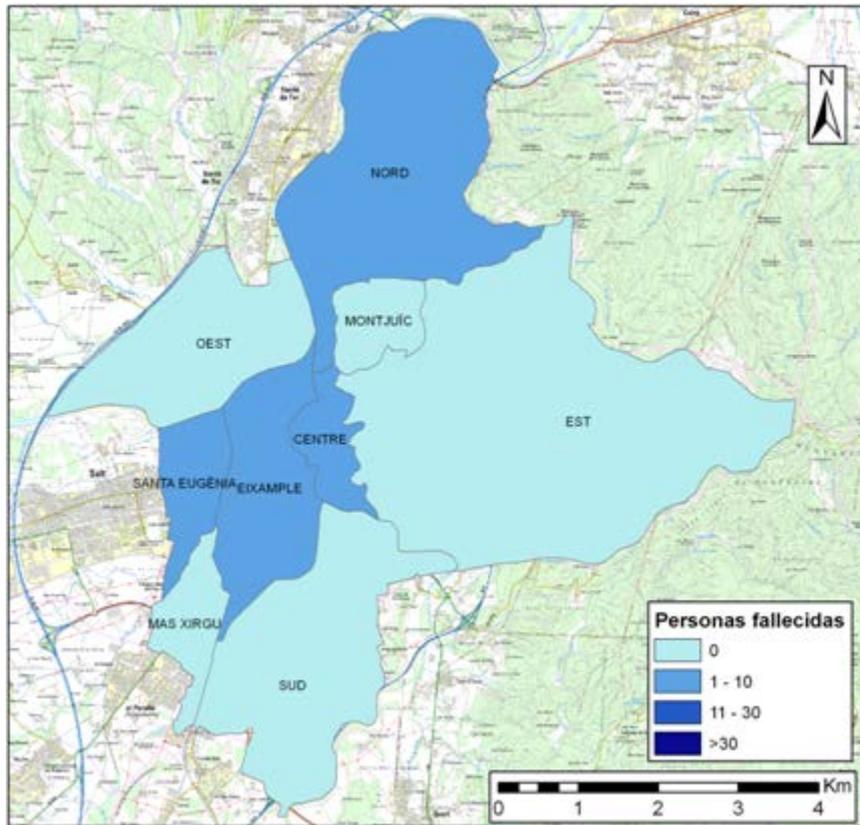
La Tabla 7.3 muestra un resumen de estas estimaciones. Se observa que menos de un 5% de la población se quedaría sin hogar tras un sismo de las características definidas y que las víctimas mortales no superarían el 0.5 ‰. Al igual que en el apartado anterior, el cálculo de personas sin hogar se ha hecho en base al número de edificios residenciales, sin tomar en consideración el número de viviendas que corresponderían a cada uno de ellos, pues la información de la que se dispone no permite tal nivel de detalle. Estos resultados pueden ser de gran utilidad para planificar la protección civil en caso de emergencia sísmica. Como era de esperar, los barrios *Centre*, *Eixample* y *Santa Eugènia* es donde se espera que la población sufra mayores daños, ya que son los barrios con un mayor índice de daño medio.

Tabla 7.3. Resumen del número de personas sin hogar, heridos y víctimas para el escenario obtenido para el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).

Edificios	Inhabi- tables	Población real	Personas sin hogar	Heridos leves	Heridos graves	Víctimas mortales	Heridos (‰)	Víctimas (‰)
9482	241	122391	3005	431	73	23	4.1	0.2



a)



b)

Figura 7.7. Distribución de las (a) personas heridas y las (b) personas fallecidas que se esperan según el escenario basado en la zonación geotécnica (Vendrell, 2011).

7.3 Escenario de daño basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012)

Irizarry et al. (2012) se basa en la evaluación de la vulnerabilidad de la ciudad de Girona realizada por Vendrell (2011) para calcular los daños que podrían esperarse en los edificios de vivienda y la población de la ciudad según los efectos de suelos obtenidos por Macau et al. (2012). La peligrosidad local de este escenario, que se presentó en la Figura 6.6, consta de 3 zonas de suelos diferentes multiplicando así el número de zonas de estudio con respecto al escenario considerado por Vendrell (2011).

7.3.1 Daños a los edificios de vivienda

La Figura 7.8 muestra las zonas de estudio que se generan en el municipio de Girona al considerar el escenario local basado en la microzonación de Macau et al. (2012). Como se puede observar para este escenario aumenta el número total de ZDE por lo que algunos mapas de resultados se representarán a nivel de barrio.

En la Tabla 7.4 se muestra el número de los edificios y el grado de daño medio obtenido para cada una de las zonas de estudio de este escenario local. También se muestra el total de edificios inhabitables esperado para cada barrio del municipio. Para este escenario, el daño que se puede esperar para el municipio de Girona se clasifica como leve debido a que el grado de daño medio, μ_d , tiene un valor de 0.94. La zona de estudio de mayor riesgo corresponde a las ZDE de los barrios *Centre* y *Nord* que yacen sobre la zona de suelo 3 donde la intensidad alcanza un valor de VIII grados (Figura 7.1) y que pertenecen a los barrios más vulnerables (Figura 7.9a). Estas dos zonas tienen un índice de daño medio mayor de 1.5 que corresponde a daños entre leves y moderados. Tal como se vio en el escenario anterior, las zonas de menor riesgo sísmico del municipio son el barrio de *Montjuïc* y las ZDE del barrio *Oest* que descansan sobre terreno rocoso (Figura 7.1) y que son las menos vulnerables del municipio (Figura 7.9a).

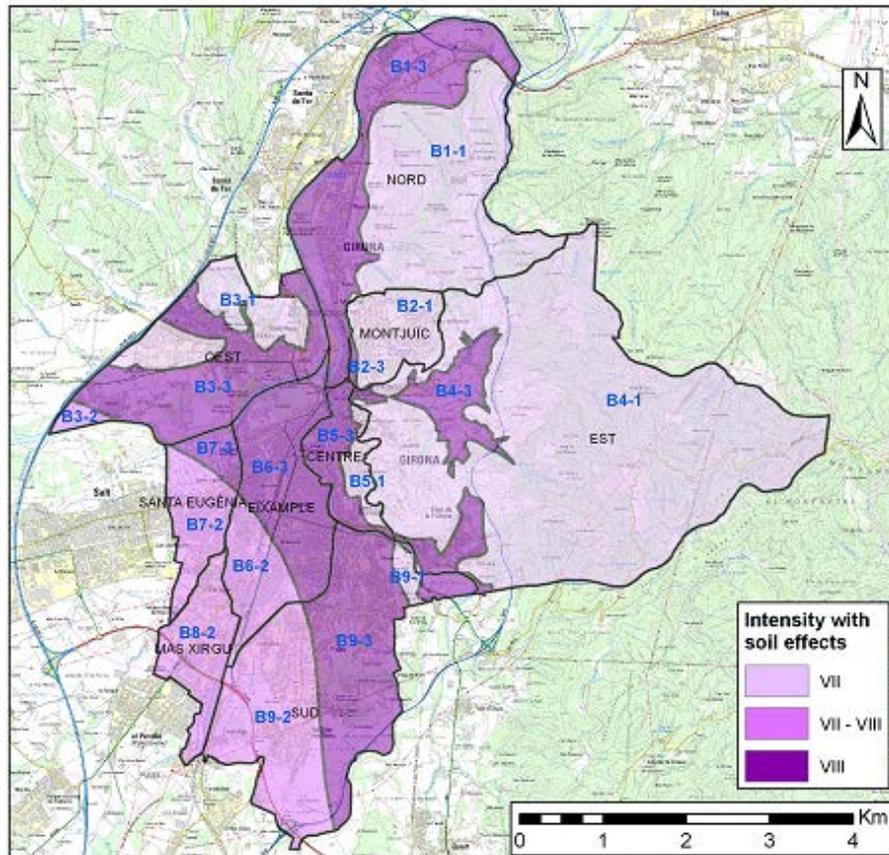


Figura 7.8. Zonas de estudio considerando los efectos de suelo de la microzonación de Macau et al. (2012).

La Figura 7.9 muestra la distribución del grado de daño para cada barrio mientras que la distribución espacial del daño esperado se muestra en la Figura 7.9a en términos de probabilidades de daño por barrio (para facilitar la claridad de la figura) y en la Figura 7.9b en términos del grado de daño medio esperado para cada una de las ZDE.

Según la Figura 7.9 y la Figura 7.10, para este escenario basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012), el único barrio donde se espera que más del 60% de los edificios no sufran daños es el barrio de *Montjuïc*. Los barrios con mayor daño esperado son *Centre*, *Nord* y *Eixample* pues son los que presentan probabilidades superiores al 5% de grado de daño 3 indicando daños moderados. Además *Nord* y *Centre* tienen una probabilidad de más del 3% de sufrir daños severos. El barrio con mayor riesgo sísmico es el barrio *Centre* donde se espera que menos del 30% de los edificios no sufran daños y se han obtenido unas probabilidades de sufrir daños de grado 3 (moderados) y 4 (severos) que corresponden al 13 y 6%, respectivamente. Además este barrio presenta una probabilidad de colapso del 1%.

Tabla 7.4. Número de edificios, su porcentaje respecto al total de los edificios de Girona y valor del daño medio esperado para cada barrio y para el municipio en general según el escenario sísmico basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012).

Barrio	ZES	Id	Edificios	Edificios (%)	μ_d	Edificios inhabitables
Nord	1	B1-1	352	3.7	0.85	52
	3	B1-3	248	2.6	1.55	
Montjuïc	1	B2-1	528	5.6	0.38	3
	3	B2-3	25	0.3	0.79	
Oest	1	B3-1	459	4.8	0.49	38
	2	B3-2	54	0.6	0.71	
	3	B3-3	870	9.2	1.01	
Est	1	B4-1	730	7.7	0.67	23
	3	B4-3	82	0.9	1.30	
Centre	1	B5-1	429	4.5	0.92	163
	3	B5-3	839	8.9	1.65	
Eixample	2	B6-2	780	8.2	0.75	93
	3	B6-3	1712	18.1	1.06	
Sta. Eugènia	2	B7-2	422	4.4	0.82	22
	3	B7-3	141	1.5	1.14	
Mas Xirgú	2	B8-2	24	0.3	0.84	1
Sud	1	B9-1	54	0.6	0.51	60
	2	B9-2	830	8.7	0.74	
	3	B9-3	905	9.5	1.04	
GIRONA			9482	100	0.94	453

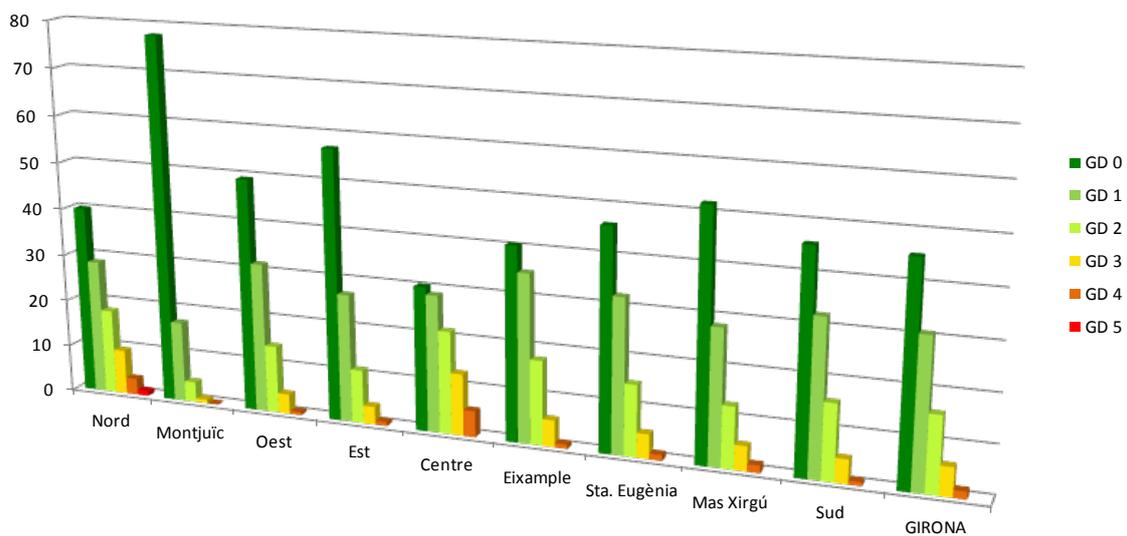


Figura 7.10. Distribución de daños de los barrios del municipio de Girona para el escenario sísmico basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012).

El barrio con el menor riesgo sísmico es *Montjuïc* para el cual se podría esperar que más del 70% de los edificios no sufrieran daños y los restantes prácticamente solo se verían afectados por daños leves o moderados (grados de daño 1 y 2).

La Figura 7.10 también muestra la distribución del grado de daño para el municipio de Girona debido al escenario basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012). Para el conjunto del municipio más del 40% de los edificios se asocian a un grado de daño 0 por lo que se espera que no sufran daños. Por otra parte, la probabilidad de tener daños moderados o severos en los edificios del municipio es de un 31% y un 16%, respectivamente. La probabilidad de daños muy graves en el municipio es de un 6% mientras que la de colapso debido a este escenario se valora en un 0.2% que dado el total de edificios del municipio implica que podrían colapsar unos 16 edificios. Como se muestra en la Tabla 7.4 de esta distribución de probabilidad se obtiene un grado de daño medio de 0.94 correspondiente, en general, a daños de carácter moderado.

En la Figura 7.11 se presenta el número de edificios inhabitables estimado para cada barrio según el escenario basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012). El barrio con mayor número de edificios inhabitables sigue siendo el *Centre* con más de 150. También aumentan los edificios inhabitables que se pueden esperar en los barrios *Nord*, *Eixample* y *Sud* en los que se superan los 50 edificios como también se puede observar en la Tabla 7.4. Para este escenario basado en la microzonación sísmica, el total de edificios inhabitables en el municipio de Girona podría ascender a más de 450 edificios.

La Figura 7.12 muestra la comparación del grado de daño medio obtenido para cada barrio y en global para el municipio de Girona según los dos escenarios considerados. Los daños basados en los efectos de suelos de la microzonación sísmica de Macau et al. (2012) son mucho mayores que los obtenidos basados en la zonación geotécnica de Vendrell (2011) debido a la identificación de una tercera zona de mayor amplificación en la microzonación sísmica. Los barrios en los que más incrementa el daño son *Centre*, *Nord*, *Sud*, *Eixample* y *Oest* dado que son los más afectados por la tercera zona de suelo de la microzonación sísmica.

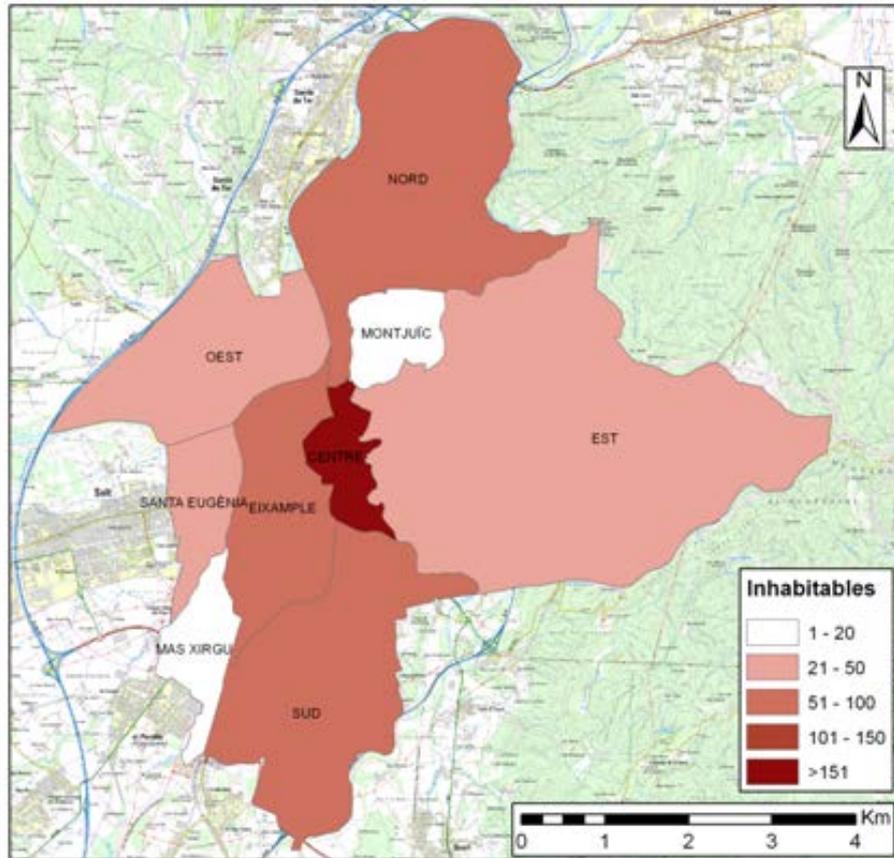


Figura 7.11. Estimación de los edificios que podrían resultar inhabitables (NEI) en cada barrio según el escenario basado en la Microzonación sísmica (Irizarry et al., 2012).

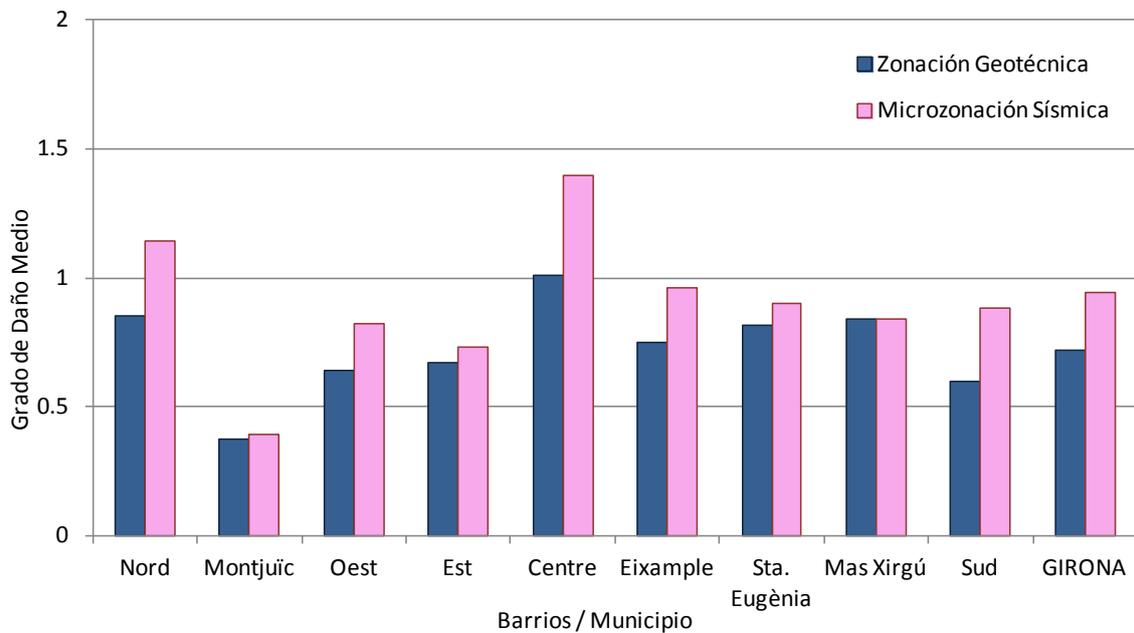


Figura 7.12. Comparación del grado de daño medio para los barrios y el municipio de Girona según la microzonación sísmica y la zonación geotécnica.

Se han comparado los porcentajes de edificios inhabitables que se esperan en los dos escenarios considerados como se presenta en la Figura 7.13. Así se puede observar que para el escenario basado en la microzonación sísmica el porcentaje de edificios inhabitables prácticamente se duplica para los barrios de *Centre*, *Nord* y *Eixample*, y también para el municipio de Girona, respecto a los valores obtenidos para el escenario basado en la zonación geotécnica. Los barrios de *Montjuïc* y *Mas Xirgú* no sufren cambios notables debido a la consideración de los diferentes efectos de suelos dado a que no el efecto de suelos no cambia drásticamente para estos barrios.

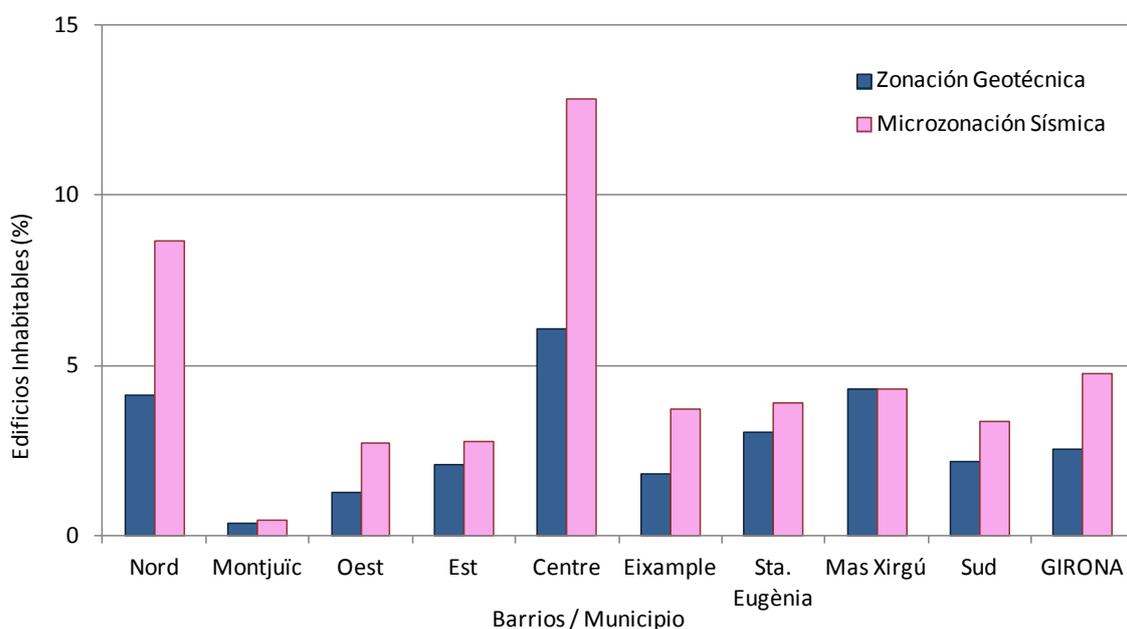


Figura 7.13. Comparación del porcentaje de edificios inhabitables para los barrios y el municipio de Girona según la microzonación sísmica y la zonación geotécnica.

7.3.2 Daños a la población

De la misma manera que se obtuvieron los daños a la población asociados al escenario basado en la zonación geotécnica de Vendrell (2011), se han estimado cuanto podría afectar a la población del municipio de Girona los daños que podría causar un escenario como el basado en la microzonación de Macau et al. (2012). La Figura 7.14 muestra la estimación del número de personas sin hogar que podrían estar asociadas a este escenario según los cálculos de Irizarry et al. (2012).

Así como con los edificios inhabitables, en este escenario basado en la microzonación sísmica, también aumenta el número esperado de personas sin hogar principalmente en los barrios de *Centre* y *Eixample* que combinan factores de peso por los cuales se verían más afectados por un evento sísmico que el resto de los barrios. Estos dos barrios están afectados por las mayores amplificaciones debido al efecto de suelos, sus edificios son de los más vulnerables del municipio y concentran la mayor densidad poblacional del municipio por lo que se pueden considerar como aquellos con mayor riesgo sísmico del municipio.

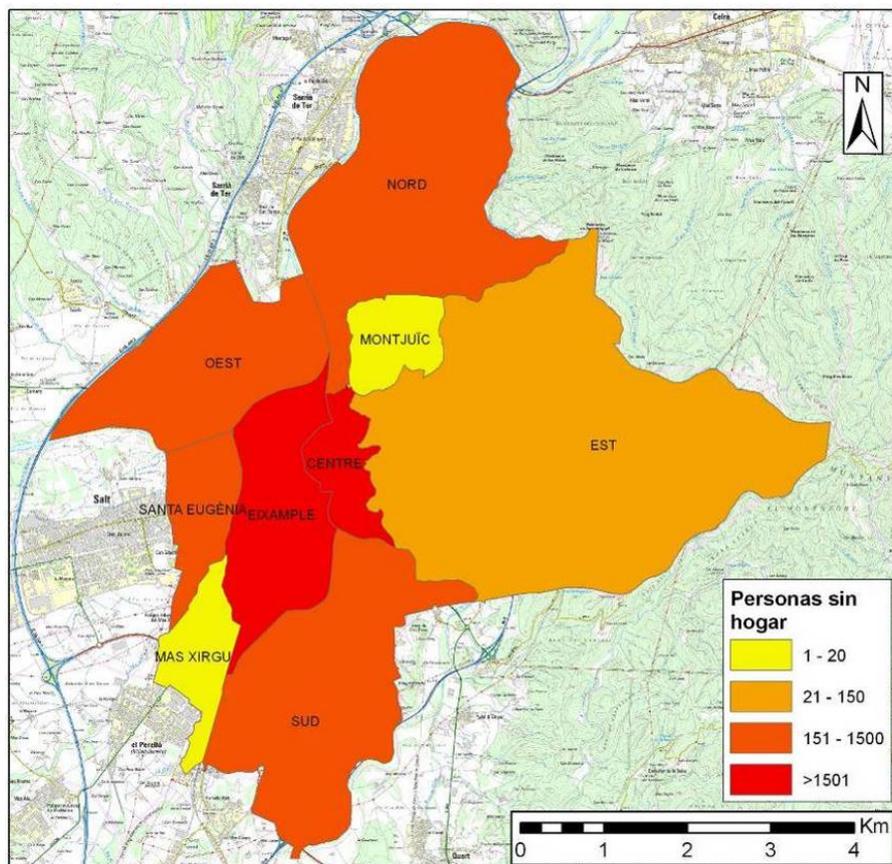


Figura 7.14. Distribución de las personas sin hogar (homeless) que se esperan según el escenario basado en la microzonación sísmica (Irizarry et al., 2012).

La Figura 7.15 presenta la estimación del número de personas heridas y las fallecidas que podrían esperarse en un escenario como el basado en la microzonación sísmica. Como se puede observar estas cifras han aumentado en prácticamente todos los barrios como resultado de los efectos de suelo de la microzonación sísmica y presentan sus mayores valores en los barrios *Centre* y *Eixample*.

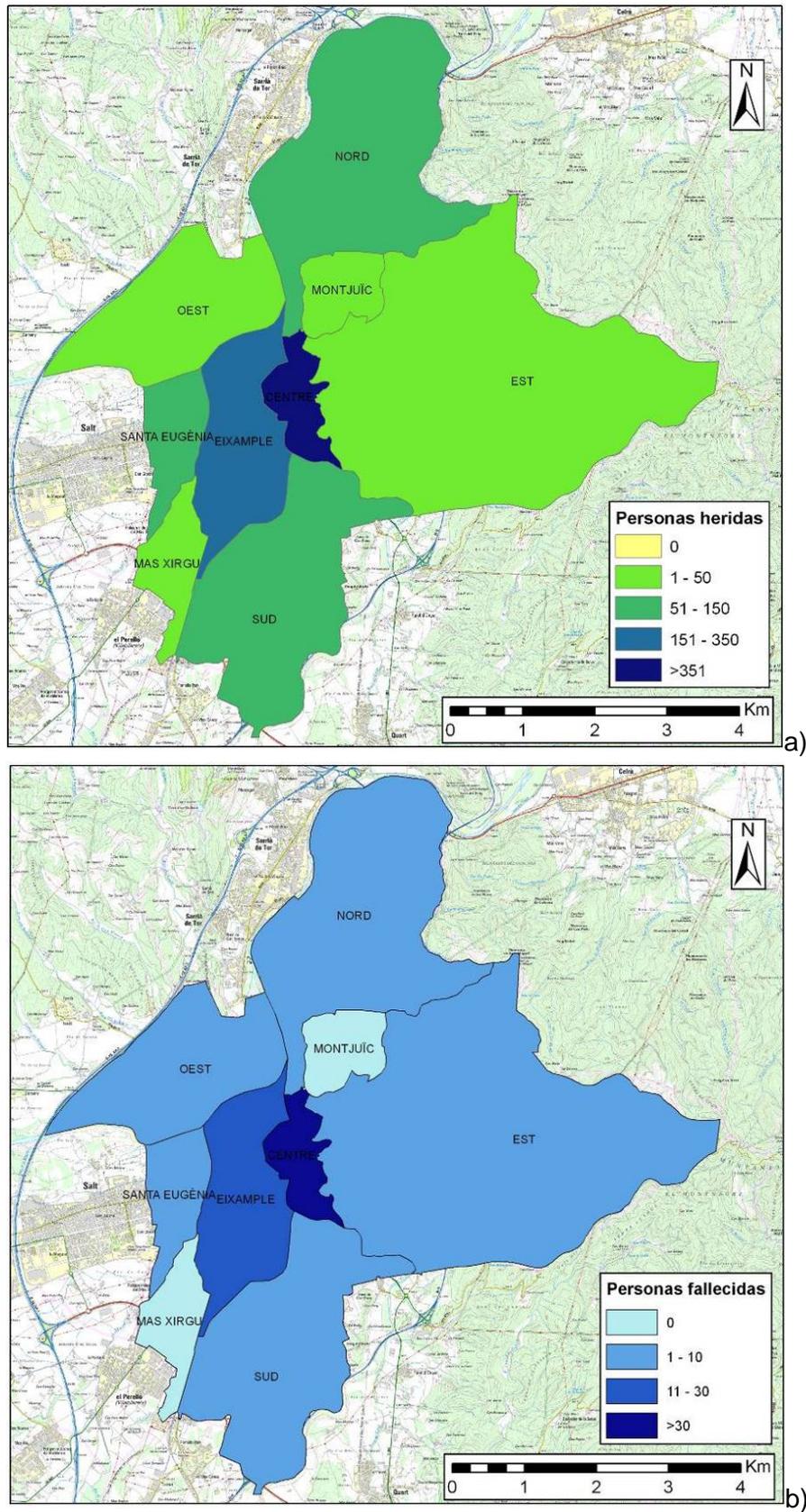


Figura 7.15. Distribución de las (a) personas heridas y las (b) personas fallecidas que se esperan según el escenario basado en la microzonación sísmica (Irizarry et al., 2012).

La Tabla 7.5 muestra el resumen de la afectación a la población que podría generar un escenario como el basado en la microzonación sísmica. De estos resultados trasciende que un 5% de la población se quedaría sin hogar siendo éstas mayores a las que se podrían esperar de un escenario como el basado en la zonación geotécnica. En ambos escenarios considerados, las víctimas mortales no superarían el 0.5 ‰.

Tabla 7.5. Resumen del número de personas sin hogar, heridos y víctimas para el escenario obtenido para el escenario basado en la microzonación sísmica (Macau et al., 2012).

Edificios	Inhabi- tables	Población real	Personas sin hogar	Heridos leves	Heridos graves	Víctimas mortales	Heridos (‰)	Víctimas (‰)
9482	241	122391	5811	893	187	65	8.8	0.2

7.4 Comparación de los daños obtenidos con los del Plan SISMICAT

La Figura 7.16a muestra la distribución de daño que Chávez (1998) obtuvo para el municipio de Girona dentro del marco del plan SISMICAT (2003). Esta distribución se obtuvo con datos del censo de edificios de 1991 y datos de población del 1996 y consideraba un único efecto de suelo aplicado a nivel municipal. Las metodologías utilizadas para la evaluación del daño se basaban en las clases de vulnerabilidad EMS-98 y matrices de probabilidad de daño de Chávez (1998).

Aprovechando la disponibilidad de los datos del censo de población y edificios de 2001, Vendrell (2011) utilizó las mismas metodologías que en el Plan SISMICAT para obtener una nueva distribución de daños con estos nuevos datos de 2001 como se muestra en la Figura 7.16b. Vendrell (2011) demostró que, aún cuando la probabilidad de daño disminuyó al disminuir la vulnerabilidad global del municipio con la construcción de edificios nuevos, el número total de edificios afectados por el terremoto aumentó ligeramente al aumentar el número total de edificios.

La Figura 7.16 c y d muestran la distribución del grado de daño obtenida para el municipio de Girona para los escenarios basados en la zonación geotécnica y la microzonación sísmica, respectivamente. Estas dos distribuciones se han obtenido con datos de población y edificios del 2010 y se han evaluado usando el método del índice de vulnerabilidad.

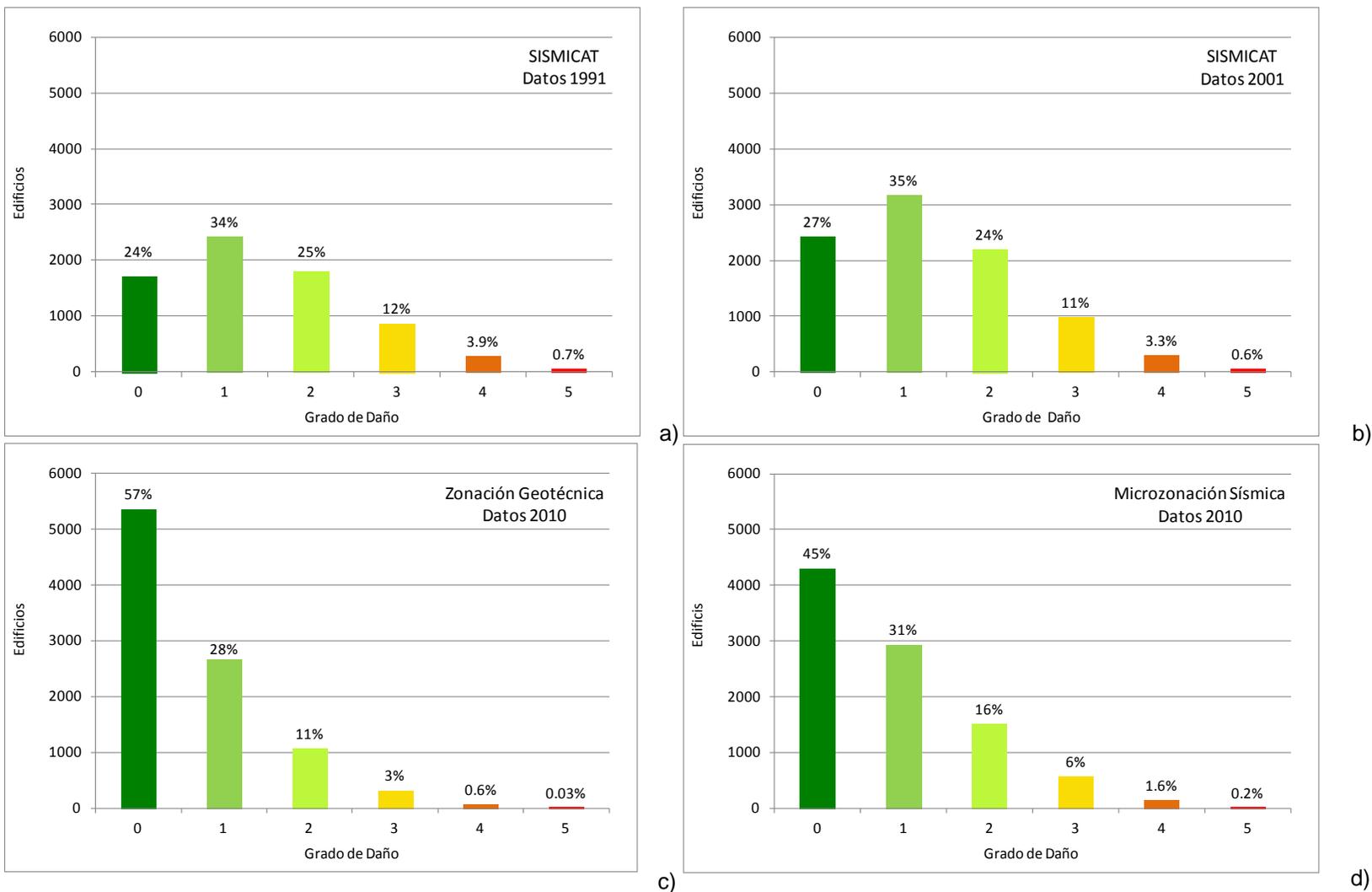


Figura 7.16. Distribución del grado de daño para el municipio de Girona según: (a) el Plan SISMICAT, (b) actualización del SISMICAT con datos del 2001, (c) el escenario de Vendrell (2011) basado en la zonación geotécnica y (d) el escenario de Irizarry et al. (2012) basado en la microzonación sísmica.

Como se comentó en la sección 6.5, la zonación geotécnica representa un escenario local menos peligroso que el considerado en el Plan SISMICAT para el municipio de Girona dado que en el primero solo un 35% del territorio se ve afectado por un incremento de suelos de 0.5 versus el 100% del territorio en el SISMICAT (Tabla 6.2). Por esta razón el daño esperado con el escenario basado en la zonación geotécnica (Figura 7.16c) es menor que el esperado según el Plan SISMICAT y la actualización de éste con los datos del 2001.

De la misma manera al comparar la distribución de daño obtenida para el escenario basado en la microzonación sísmica, se puede observar que el daño de la misma también es inferior a los obtenidos en el SISMICAT y su actualización al 2001, aún cuando la microzonación sísmica contempla una zona con una amplificación mayor a la considerada en el SISMICAT.

La Tabla 7.6 muestra un resumen comparativo de la peligrosidad local, los edificios inhabitables, los edificios colapsados y las personas sin hogar para los escenarios presentados en este informe y el Plan SISMICAT y la actualización de los datos de población y edificios del SISMICAT realizada por Vendrell (2011). Como se puede observar, según los resultados del SISMICAT actualizado con datos del 2001 de Vendrell (2011) se esperaría un mayor número de edificios inhabitables y colapsados para el municipio de Girona que según el calculo original del Plan SISMICAT.

Tabla 7.6. Comparación de la peligrosidad local, edificios inhabitables, edificios colapsados y personas sin hogar para los escenarios considerados.

Escenario	Datos	% Área por intensidad			Edificios Inhabitables	Edificios Colapsados	Personas Sin Hogar
		VII	VII-VIII	VIII			
Plan SISMICAT	1991 y 1996*	0%	100%	0%	757	48	7505*
SISMICAT Actualizado	2001	0%	100%	0%	846	55	6976
Zonación Geotécnica	2010	65%	35%	0%	241	3	3005
Microzonación Sísmica	2010	51%	16%	33%	574	16	5811

De la misma manera, los resultados de los escenarios basados en la zonación geotécnica y a microzonación sísmica con datos del 2011 son inferiores a los obtenidos originales del SISMICAT. Estos dos escenarios representan una mejora respecto a las evaluaciones a nivel municipal que se realizaron como parte del Plan SISMICAT sobre el conocimiento no solo de los efectos de suelos dentro del municipio sino también de la distribución de su vulnerabilidad basada en tipologías estructurales y usando como unidad de trabajo los barrios de Girona.

Según estos resultados, la estimación del riesgo sísmico a nivel municipal del Plan SISMICAT es conservadora pero muy útil como una primera estimación de los efectos globales que el municipio podría sufrir debido a un evento sísmico. Así mismo, las estimaciones más detalladas a nivel inframunicipal, tanto de los efectos de suelos como de la vulnerabilidad, permiten identificar zonas con niveles importantes de riesgo sísmico dentro del mismo municipio.

8 Resumen y conclusiones

8.1 Introducción

En este informe se muestra los resultados de los escenarios de riesgo sísmico obtenidos para los edificios de vivienda del municipio de Girona que se han realizado dentro del marco del proyecto SISPYR. Estos escenarios de riesgo sísmico se han obtenido para dos escenarios de peligrosidad local basados en el nivel de intensidad macrosísmica para un periodo de retorno de 500 años indicado por el Plan SISMICAT para el municipio de Girona y considerando la amplificación por los efectos de suelo de la microzonación de Vendrell (2011) basado en la microzonación geotécnica de Soler et al., (2012) y la microzonación sísmica de Macau et al. (2012). La vulnerabilidad de los edificios se caracterizan mediante el método del índice de vulnerabilidad. Los datos sobre los edificios y la población han sido facilitados por UMAT.

La evaluación del daño físico a las edificaciones se ha realizado de manera estadística. Para el cálculo se han usado las funciones de vulnerabilidad que relacionan el grado de daño medio con la intensidad macrosísmica y con el índice de vulnerabilidad. Esta metodología utiliza seis grados de año, que van desde grado 0, que corresponde a no daño; al daño 5 que indica el colapso total de la edificación. También se han evaluado los efectos sobre la población, estimándose las cifras esperadas de personas sin hogar y de víctimas, entendiendo por víctimas tanto las personas heridas como las fallecidas. Los escenarios de daño a la población se han realizado teniendo en cuenta la población real (censada más flotante). La metodología ATC-13 (1985) se ha usado para la estimación de las víctimas.

Queda fuera de los objetivos de este estudio efectuar un análisis de errores. La caracterización de los edificios, así como la definición de la acción sísmica, presentan importantes incertidumbres, por lo que es importante tener en cuenta que: 1) hay que interpretar los resultados desde un punto de vista probabilista y considerarlos como valores esperados medios y 2) las cifras obtenidas de daños a la población deben interpretarse como representativas de un orden de magnitud.

Como paso previo a la presentación de las conclusiones se resumen a continuación los principales resultados obtenidos de la evaluación del riesgo sísmico de la ciudad de Girona.

8.2 Vulnerabilidad

En general, el municipio de Girona se caracteriza por la presencia de edificios de mampostería y edificios de hormigón armado. Para la evaluación de la vulnerabilidad basada en el método de índices de vulnerabilidad se ha desarrollado una distribución de las tipologías estructurales representativas de la zona en función del año de construcción, el número de plantas y su localización en el territorio (ver la Tabla 8.1). Todo ello a partir de datos UMAT, visitas de campo y criterio de experto. Los índices de vulnerabilidad se han asignado en función de la tipología según los criterios seguidos en el proyecto Risk-UE (Mouroux et al., 2004) y se han modificado en función de la altura, presencia de “piso blando” y, en el caso de edificios de hormigón armado, se ha tenido en cuenta también el nivel de aplicación de normas sismorresistentes.

Tabla 8.1. Edificios (%) según tipología y altura, e índices de vulnerabilidad. V_i , para cada barrio.

Id	Barrio	% - tipología			% altura			Edificios (%)	V_i medio
		URM	HA	Acero	Bajos	Medios	Altos		
B1	<i>Nord</i>	80.87	18.51	0.62	82.67	15.83	1.50	6.33	0.65
B2	<i>Montjuic</i>	30.33	62.46	7.22	94.94	4.88	0.18	5.83	0.48
B3	<i>Oest</i>	63.96	34.31	1.73	89.66	9.69	0.65	14.59	0.55
B4	<i>Est</i>	86.49	13.51	0.00	88.55	11.45	0.00	8.56	0.61
B5	<i>Centre</i>	67.81	31.02	1.17	31.78	54.65	13.56	13.37	0.67
B6	<i>Eixample</i>	40.75	48.18	11.07	41.89	37.48	20.63	26.28	0.57
B7	<i>Sta. Eugènia</i>	30.04	69.02	0.94	32.21	47.86	19.93	5.93	0.58
B8	<i>Mas Xirgu</i>	65.17	34.83	0.00	91.67	8.33	0.00	0.25	0.57
B9	<i>Sud</i>	34.91	63.51	1.58	90.49	8.22	1.28	18.86	0.50

Una forma de expresar los resultados consiste en la asociación de los índices de vulnerabilidad con las clases definidas en la EMS-98. Realizando esta asimilación, se obtiene la Figura 8.1 y la Tabla 8.1.

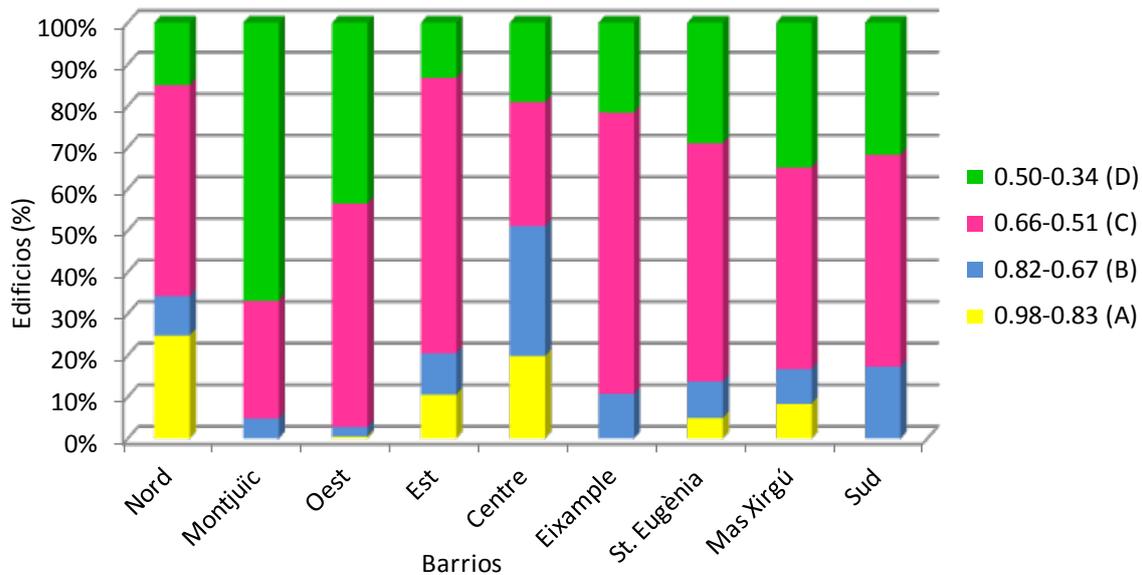


Figura 8.1. Distribución de los edificios de cada barrio en clases de vulnerabilidad desde la menos vulnerable (D) a la más vulnerable (A).

Puede concluirse que, en general, en el municipio de Girona predominan las edificaciones de clase de vulnerabilidad C, aunque en los barrios *Montjuïc* (B2) y *Sud* (B9) existe un elevado porcentaje de edificios de menor vulnerabilidad, clase D. Por otra parte, puede observarse como el barrio del *Centre* tiene porcentajes aproximadamente iguales de edificios pertenecientes a cada una de las cuatro clases de vulnerabilidad. Esto es debido a la heterogeneidad en los sistemas constructivos del barrio.

Los resultados obtenidos muestran una vulnerabilidad de los edificios de Girona relativamente baja. Del estudio de tipologías y cálculo de la vulnerabilidad se obtienen los resultados de la Tabla 8.1 de los que se pueden sacar las siguientes conclusiones.

1. Las tipologías que predominan en el municipio de Girona son la mampostería y el hormigón armado y el 66% de los edificios de vivienda son de menos de 3 plantas (bajos). En base a estas características, tiene sentido que el índice de vulnerabilidad obtenido para el municipio sea de 0.57 correspondiente a clase de vulnerabilidad C.
2. El mayor porcentaje de edificios se concentra en los barrios del *Eixample*, *Centre*, *Sud* y *Oest*. Los dos primeros están situados en la parte interior del municipio, por lo que es lógico pensar que la mayor actividad se da allí. *Sud* y *Oest* son dos barrios de gran extensión, motivo por el cual contienen un 19% y

15% respectivamente de los edificios residenciales de Girona. La vulnerabilidad de los edificios de estos barrios será la que tendrá mayor peso en el cálculo de la vulnerabilidad a nivel de municipio.

3. Los barrios *Centre* y *Eixample* son muy heterogéneos respecto a tipologías de edificios y alturas y presentan índices de vulnerabilidad relativamente elevados (contienen muchos edificios construidos antes de 1960). Pero, en contraposición, el Sud es uno de los barrios con menor índice de vulnerabilidad, ya que la mayoría de sus viviendas son de estructura de hormigón armado y son relativamente nuevas. Por tanto, muchos de ellos (construidos después de 1994) se supone que se han calculado siguiendo la normativa sismorresistente (NCSE-94, 1994).
4. El impacto de la normativa sísmica introducida en 1994 (NCSE-94, 1994) provoca una mejora sustancial en la respuesta sísmica de los edificios de HA construidos a partir de esta fecha, lo que influye de forma significativa en la disminución de la vulnerabilidad del municipio.
5. En este estudio se trabaja con índices de vulnerabilidad medios. Éstos permiten obtener resultados a nivel de barrio y de municipio. Estos índices medios pueden considerarse adecuados para este estudio, ya que no se tiene información a nivel de edificio individual. Pero a su vez, puede considerarse como inconveniente el hecho de que trabajar con índices medios suaviza los extremos, que justamente para gestión de emergencias son los puntos más importantes. Esto es crucial cuando se estiman daños económicos y a la población, dado que se basan en las probabilidades de los diferentes estados de daño. Por tanto, un trabajo importante sería identificar las tipologías más desfavorables dentro de cada barrio y analizarlas independientemente.

8.3 Daño físico basado en la zonación geotécnica

Esta estimación de daños corresponde a un escenario sísmico probabilista de periodo 500 años con una intensidad básica de VII que al incorporar los efectos de suelo de la zonación geotécnica se incrementa en medio grado, pasando a VII-VIII, en una parte importante de la ciudad. La evaluación del daño físico a las edificaciones se ha realizado de manera estadística, usando las funciones de vulnerabilidad que

relacionan el grado de daño medio con la intensidad macrosísmica y con el índice de vulnerabilidad.

Los principales resultados se resumen en la Tabla 8.2 a nivel de barrio y municipio. En esta tabla se presenta el número de edificios total, las probabilidades de los 6 estados de daño: 0 Nulo, 1 Leve, 2 Moderado, 3 Severo, 4 Generalizado y 5 Completo, el grado de daño promedio y el número esperado de edificios inhabitables. Puede apreciarse que, en general, la distribución de la probabilidad de daño está centrada en los grados de daño 0 y 1, indicando que el daño esperado, en promedio, es leve, si bien también se pueden esperar daños significativos en los edificios afectando así a la población.

Tabla 8.2. Número de edificios, distribuciones de los grados de daño de los edificios de Girona (en%) y valor del daño medio esperado para cada barrio según el escenario basado en la zonación geotécnica. El sumatorio de los valores de cada columna corresponde al 100% de los edificios del barrio.

ID	Barrio	Edificios Total	Edificios afectados según grado daño (%)						μ_d	Edificios inhabitables
			0	1	2	3	4	5		
B1	Nord	600	51.6	27.2	14.2	5.7	1.2	0.1	0.85	25
B2	Montjuïc	553	79.0	16.4	3.9	0.6	0.1	0.0	0.38	2
B3	Oest	1383	60.1	28.0	9.5	2.1	0.2	0.0	0.64	18
B4	Est	812	60.3	26.1	10.0	3.0	0.5	0.0	0.67	17
B5	Centre	1268	43.9	29.1	17.0	7.6	2.1	0.2	1.01	77
B6	Eixample	2492	52.7	31.8	12.2	3.0	0.4	0.0	0.75	46
B7	Sta. Eugènia	562	50.5	31.3	13.2	4.2	0.9	0.1	0.82	17
B8	Mas Xirgu	24	52.0	28.3	12.8	5.2	1.6	0.2	0.84	1
B9	Sud	1788	63.4	26.2	8.4	1.8	0.2	0.0	0.60	39
GIRONA		9482	56.6	28.1	11.3	3.4	0.6	0.0	0.72	241

Los barrios que presentan los mayores valores del grado de daño medio son el *Centre*, *Nord*, *Mas Xirgu* y *Santa Eugènia*. El primero se caracteriza por estar constituido por edificaciones muy heterogéneas de las cuales un gran porcentaje son de piedra construidos antes de 1960. *Nord* es un núcleo residencial que consta de viviendas económicas, principalmente de mampostería no reforzada, construidas entre 1960 y 1980. *Mas Xirgu*, está caracterizado por un elevado porcentaje de viviendas de bajo coste también principalmente de mampostería no reforzada.

El último, *Santa Eugènia* es un barrio en el que predominan los bloques de viviendas altos y de mediana altura predominantemente de hormigón armado. Estos 4 barrios

presentan los mayores valores del índice de vulnerabilidad promedio del municipio y junto a las intensidades de este escenario generan los mayores valores del grado de daño promedio del municipio. Estos 4 barrios junto al barrio de *Eixample* presentan las probabilidades más altas del municipio de sufrir los grados de daño 2, 3 que corresponden a daños moderados y severos. *Centre*, *Mas Xirgu* y *Nord* poseen para este escenario las probabilidades más altas de sufrir daños generalizados (grado de daño 4). Aunque poco significativa, el *Centre*, *Nord*, *Mas Xirgu* y *Santa Eugènia* poseen una muy baja probabilidad de sufrir edificios completamente dañados o incluso colapsar.

En el caso opuesto se encuentran el barrio de *Montjuïc* caracterizados principalmente por viviendas unifamiliares de planta baja más piso, de construcción relativamente reciente y características constructivas buenas. Este barrio, asociado a su ubicación sobre roca o suelo duro, reúne los condicionantes para ser la zona donde son esperables las menores probabilidades de daño. Se espera que casi el 80% de sus edificios no sufran daño y la probabilidad de que sus edificios sufran daños moderados o mayores es inferior al 5%.

Si se considera el número de edificios inhabitables los barrios con mayor afectación en este sentido son *Centre*, *Eixample*, *Sud* y *Nord* aunque ninguno de los barrios queda exento de tener algún edificio inhabitable debido a los daños que se pueden esperar con este escenario. Un total de 241 edificios podrían quedar inhabitables como resultado de un escenario como el pasado en la zonación geotécnica y una intensidad en suelo medio de VII grados para el municipio de Girona.

8.4 Daño físico basado en la microzonación sísmica

La estimación de daños sísmico basada en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012) corresponde igualmente a una intensidad básica de VII pero al incorporar los efectos de esta microzonación la parte central de la ciudad se vería afectada una intensidad de VIII grados y el extremo sureste por intensidad de VII-VIII grados.

Como puede apreciarse en la Tabla 8.3, en general, para este escenario basado en la microzonación sísmica de Macau et al. (2012) la distribución del grado de daño también está centrada en los grados de daño 0 y 1 aunque los porcentajes de edificios asociados al grado de daño 0 han disminuido respecto al escenario basado en la

zonación geotécnica. De esta manera también aumentan los porcentajes de edificios asociados a los grados de daño superiores, incluso aumentan las probabilidades de edificios con daño completo o colapso, por lo que este escenario representa un mayor daño para los edificios de vivienda del municipio.

Los barrios que presentan los mayores valores del grado de daño medio son el *Centre*, *Nord*, *Mas Xirgu*, *Santa Eugènia*, *Eixample* y *Sud*. En este escenario, los primeros 4 barrios, de los cuales ya se caracterizó la vulnerabilidad en el apartado anterior, se ven afectados por intensidades mayores debido a los efectos de suelos de la microzonación sísmica, a excepción de *Mas Xirgu* cuya intensidad permanece igual en ambos escenarios. Debido a este escenario los barrios de *Eixample* y *Sud* también se encuentran entre los de mayor grado de daño promedio debido a que los mismos se ven afectados por amplificaciones mayores a las consideradas en el escenario basado en la zonación geotécnica. *Eixample* es un barrios con edificaciones muy heterogéneas pero más modernas que las del barrio *Centre* mientras que *Sud* es uno más residencial donde predominan las estructuras de hormigón armado. Al igual que en el escenario anterior, el barrio de *Montjuïc*, ubicado sobre roca, sigue siendo el de menor probabilidad de daño del municipio.

Tabla 8.3. Número de edificios, distribuciones de los grados de daño de los edificios de Girona (en%) y valor del daño medio esperado para cada barrio según el escenario basado en la microzonación sísmica.

ID	Barrio	Edificios Total	Edificios afectados según grado daño (%)						μ_d	Edificios inhabitables
			0	1	2	3	4	5		
B1	<i>Nord</i>	600	40.0	28.5	18.0	9.5	3.5	0.4	1.14	52
B2	<i>Montjuïc</i>	553	77.7	17.1	4.3	0.8	0.1	0.0	0.39	3
B3	<i>Oest</i>	1383	49.3	31.6	14.3	4.2	0.6	0.0	0.82	38
B4	<i>Est</i>	812	57.0	27.0	11.3	3.8	0.8	0.1	0.73	23
B5	<i>Centre</i>	1268	30.3	28.8	21.6	13.0	5.5	0.8	1.40	163
B6	<i>Eixample</i>	2492	40.5	35.2	17.7	5.6	0.9	0.0	0.96	93
B7	<i>Sta. Eugènia</i>	562	46.2	32.3	15.0	5.1	1.2	0.1	0.90	22
B8	<i>Mas Xirgu</i>	24	52.0	28.3	12.8	5.2	1.6	0.2	0.84	1
B9	<i>Sud</i>	1788	45.9	32.4	15.8	5.0	0.8	0.0	0.89	60
GIRONA		9482	45.4	30.9	15.9	6.1	1.6	0.2	0.94	453

Con respecto al número de edificios inhabitables los barrios más afectados son *Centre*, *Eixample*, *Sud* y *Nord* al igual que en el escenario anterior. Aunque aumenta considerablemente el número de edificios inhabitables para casi todos los barrios para

un total de 453 edificios inhabitables en el municipio, lo que esta cifra casi se duplica con respecto al escenario basado en la zonación geotécnica.

8.5 Daños a la población

Los escenarios de daño a la población se han realizado teniendo en cuenta la población real (censada más flotante) en el municipio de Girona. Estos datos se han tomado de la información cedida por UMAT. La metodología aplicada para la estimación de las víctimas ha sido la ATC-13 (1985), que tiene en cuenta el efecto de todos los grados de daño de los edificios. El cálculo de personas sin hogar se ha hecho en base al número de edificios residenciales, sin tomar en consideración el número de viviendas que corresponderían a cada uno de ellos, pues la información de la que se dispone no permite tal nivel de detalle.

La Figura 8.2 muestra los resultados de daño a la población obtenidos para el municipio de Girona considerando las dos estimaciones de los efectos de suelos. Como puede observarse, aún cuando el grado de daño promedio esperado es bajo en ambos escenarios, las probabilidades de que algunos edificios pudieran sufrir daños mayores contribuyen se puedan afectar un pequeño porcentaje de la población. Considerando los efectos de la microzonación sísmica, se esperan cifras que por lo menos duplican los valores esperados considerando la zonación geotécnica. Con estos resultados se observa que menos del 5% de la población se quedaría sin hogar, y que las víctimas mortales no superarían el 0.5 ‰.

A nivel inframunicipal, los barrios donde se espera un mayor número de edificios inhabitables son los que también destacan en los apartados de daños a la población, no solo porque influyen directamente en el número de personas sin hogar sino también porque reflejan el efecto combinado de las probabilidades de daño 3, 4 y 5 que representan la mayor contribución en el calculo de las personas que pueden resultar heridas o perder su vida debido a los daños causados por el evento sísmico. En este sentido para ambos escenarios, los barrios con mayor afectación a la población son *Centre*, *Eixample*, *Sud* y *Nord*. Estos resultados pueden ser de gran utilidad para protección civil para la prevención, gestión y planificación de emergencias en caso de terremoto.

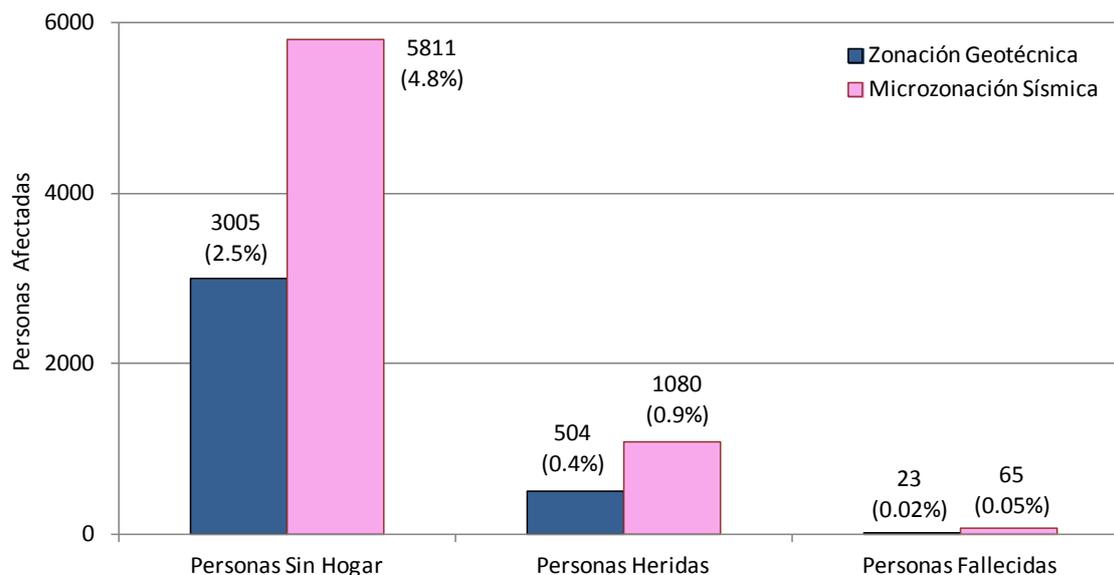


Figura 8.2. Comparación del número de personas sin hogar, heridos y fallecidos que se esperan para el municipio de Girona según los escenarios considerados.

8.6 Conclusiones

Girona está situada en una zona de peligrosidad sísmica entre moderada y baja, identificada en la normativa sísmica española NCSE-02 vigente por un terremoto característico de intensidad VII y una aceleración básica de 0.08 g para un periodo de retorno de 475 años y en el mapa de zonas sísmicas sin efectos de suelo del Pla SISMICAT (2003) con un valor de intensidad VII. Sin embargo, a partir de los datos disponibles sobre la vulnerabilidad de los edificios y de los análisis efectuados se concluye que Girona tiene un riesgo sísmico considerable. Un escenario como el considerado tendría consecuencias graves en determinados barrios y un importante impacto en la población siendo relevante el número de víctimas esperadas y el número de edificios inhabitables y, en consecuencia, el número de personas que sería necesario realojar.

El método del índice de vulnerabilidad se ha aplicado a nivel inframunicipal para evaluar la vulnerabilidad sísmica del municipio usando sus barrios como unidad de trabajo. Para cada uno de los barrios de Girona se identificó las tipologías estructurales más representativas y se definió la distribución estadística de las mismas. Esto ha permitido una mayor resolución en el cálculo de la vulnerabilidad, pues ajusta mejor las características de cada tipología estructural y tiene en cuenta su distribución en el territorio.

Los resultados obtenidos con la metodología del índice de vulnerabilidad indican que en promedio la vulnerabilidad de los edificios de Girona es baja con un índice de vulnerabilidad medio de 0.57 que se corresponde a una clase de vulnerabilidad C. Del total de 9482 edificios de viviendas en el municipio, la mitad se construyeron después del 1980 y tan solo un 7% son anteriores a 1910. El 66% de los edificios de vivienda son de menos de 3 plantas (altura baja). La mayoría de los edificios son de mampostería y hormigón armado con forjados reticulares, ambas tipologías constructivas son vulnerables a las acciones sísmicas. Los barrios *Centre* y *Eixample* presentan los índices de vulnerabilidad más altos. Estos dos barrios presentan características heterogéneas en cuanto a las tipologías constructivas y a la altura de sus edificios. Los edificios son relativamente antiguos ya que muchos fueron construidos antes de 1960.

Los barrios que presentan los mayores valores del grado de daño medio son el *Centre*, *Nord*, *Mas Xirgu*, *Santa Eugènia*, *Eixample* y *Sud*. *Nord* y *Mas Xirgu* se caracterizan por un elevado porcentaje de viviendas de bajo coste principalmente de mampostería no reforzada. En *Santa Eugènia* predominan los bloques de vivienda, principalmente de hormigón armado, de altura media y alta, mientras que en *Sud* estas son más bien bajas.

Debido a los efectos de suelo que incrementan la intensidad básica de VII hasta VIII en algunas áreas del municipio se producen niveles de daño significativos contribuyendo a que el municipio se caracterice por un grado de daño promedio de 0.94 en el escenario más dañino y que corresponde a una condición de daño leve. La distribución de la probabilidad de daño obtenida para el municipio de Girona indica que, aunque en general el daño esperado es leve, existe la probabilidad de que una porción de los edificios pueda sufrir daños superiores incluso pudiendo llegar a colapsar algunos de ellos. Esta probabilidad de daño llega a estimar que casi 500 edificios podrían quedar inhabitables según el escenario que considera los efectos de suelo de la microzonación sísmica.

Los daños a la población son considerables dado los escenarios analizados. Son probables víctimas mortales, bastantes personas heridas y muchas personas pueden quedarse sin hogar temporalmente. Después de un terremoto, uno de los problemas más graves con los que se enfrenta la sociedad en general y Protección Civil en particular, es el extraordinario número de personas que no pueden regresar a sus

hogares, lo que complica extraordinariamente la recuperación a medio y largo plazo de la actividad socioeconómica y cultural. Según los escenarios considerados esta cifra podría llegar a representar hasta el 5% de la población que, para una ciudad como Girona con más de 100 000 habitantes, significa unas de 5000 personas sin hogar, además de casi un millar de heridos. Los terremotos de L'Aquila en Italia y de Lorca han puesto de manifiesto la verosimilitud de estas cifras.

Estos resultados de daño sísmico se compararon con los establecidos para el municipio de Girona por el Plan SISMICAT. Las estimaciones del número de edificios inhabitables y del número de personas sin hogar obtenidas para los escenarios del proyecto SISPYR son inferiores a las establecidas para el municipio de Girona en el Plan SISMICAT. Dado que estas nuevas estimaciones, que incluyen estudios más detallados de los efectos del suelo, no exceden las estimaciones iniciales del Plan SISMICAT se considera que los escenarios de daño a nivel municipal contemplados por el plan sirven como una primera estimación de los efectos globales que se pueden esperar en el municipio, aunque estos pueden ser considerados como conservadores. Por otro lado, estimaciones más detalladas a nivel inframunicipal, tanto de los efectos de suelo así como de las evaluaciones de la vulnerabilidad permiten identificar las zonas de más riesgo sísmico dentro de un mismo municipio. De esta manera queda evidenciada la gran influencia que tienen el detallado conocimiento de los efectos del suelo en los resultados de los escenarios de daño sísmico.

Referencias

- ATC (1985). ATC-13. *Earthquake damage evaluation data for California*. Applied Technology Council. Redwood City, California. 492 pp.
- Barbat, A.H. (2011). Comunicación personal. Catedrático UPC. Validación de los índices de vulnerabilidad y sus modificadores. Barcelona, 29 de abril de 2011.
- SES (2002). *Simulación de escenarios sísmicos, SES 2002. Manual Técnico*. Ministerio del Interior - Dirección General de Protección Civil y Ministerio de Fomento - Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 47pp.
- Blázquez Guanter, SLP (2011). Comunicación personal, Blázquez Guanter SLP, consultors d'estructures. Análisis de la distribución estadística de las tipologías estructurales representativas de los barrios de la ciudad de Girona. Girona, 1 de junio de 2011
- Blázquez, A. (2011). Comunicación personal. Reunión para la validación de las tipologías estructurales representativas de la ciudad de Girona. Girona, 25 de enero de 2011.
- Cabañas, L., Benito, B. and Herráiz, M. (1997). An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 26, 79-92.
- Chávez, J. (1998). *Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña*. Tesis Doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España. (343 pp).
- FEMA/NIBS (2002). *HAZUS Technical Manual -SR2*, Federal Emergency Management Agency, FEMA and National Institute of Building Sciences, NIBS, Washington D.C., Vol. 1, 2, 3.
- Giovinazzi, S. (2005). *The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis*. Tesis doctoral. The Department of Civil Engineering of the Technical University Carolo-Wilhelmina at Brannschweig, and The Faculty of Engineering Department of Civil Engineering of the University of Florence. Florence, Italy. 200 pp
- Giovinazzi, S. and Lagomarsino, L. (2004). *A macroseismic method for vulnerability assessment of buildings*. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. Canada.
- Goula, X. y equipo de trabajo del proyecto (2010). Earthquake Information System in the Pyrenees- SISPYR Project, European Seismological Commission 32nd General Assembly, September 6-10, Montpellier, France.
- Goula, X. y equipo de trabajo del proyecto (2007), "Proyecto ISARD: información sísmica automática regional de daños". CD Memorias 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Asociación Española de Ingeniería Sísmica, Girona, 8-11 mayo 2007
- Grünthal, G. Editor (1998). *European Macroseismic Scale 1998*, vol. 15. Luxemburg : Conseil de l'Europe. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Luxemburgo 2009: Edición española F. Lorenzo Martín.

- IDESCAT (2011) Anuari estadístic de Catalunya. Institut d'Estadística de Catalunya. Disponible a: <http://www.idescat.cat/> último acceso: 20 diciembre 2011
- Irizarry J., Roussillon P., González M., Colas B., Sedan O., y Susagna T. (2007) Escenarios transfronterizos de riesgo sísmico en el Pirineo Oriental. CD Memorias 3r Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Asociación Española de Ingeniería Sísmica, Girona, 8-11 mayo 2007
- Irizarry, J., Macau, A., Figueras, S., Goula, X., Lantada, N., Vendrell, S., Pujades, L.G., y Blázquez, A. (2012). *Seismic risk assessment for the city of Girona, Spain*. Proceedings of the 15th World Conference Earthquake Engineering. Lisboa, (Portugal). CD-ROM. Paper No. 2093, 10 pp.
- 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, España.
- Macau, A., Figueras, S., Benjumea, B., Martí, A., Bellmunt, F. y Gabàs, A. (2012). Microzonificación sísmica de la ciudad de Girona. 7ma. Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia.
- Mézcua (1982). *Catálogo General de Isosistas de la Península Ibérica*. Publicación 202. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. 1982. Anexo I. la escala MSK. pp. 15-23
- Milutinovic, Z.V. and Trendafiloski, G.S. (2003). *WP04. Vulnerability of current buildings*. Risk-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. Contract No. EVK4-CT-2000-0014. Skopje: Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS). September 2003 (111 pp).
- Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P., y otros. (2004). *The European Risk-Ue Project: an advanced approach of earthquake risk scenarios*. Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering. Vancouver B.C (Canadá). CD-ROM. Paper No. 2162, 12 pp.
- MV-101. (1963). *Norma M.V.101-1962. Acciones en la edificación*. Ministerio de la Vivienda, decreto del 17 de enero de 1963 (195/1963).
- MV-102 (1975). Norma básica de la edificación Norma MV 102-1975 : Acero laminado para estructuras de edificación. Ministerio de la Vivienda, decreto del 16 de septiembre de 1976 (2899/1976).
- Nakamura, Y. (1989). *A method of dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface*. Quaternaly Report of Raileay Technical Research Institute. 30 (1):25-33
- NCSE-02. (2002). *Norma de Construcción Sismorresistente Española. Parte General y de Edificación*. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, Real Decreto 997/2002 del 27 de septiembre de 2002. Boletín Oficial del Estado nº244, viernes 11 de octubre de 2002. Ministerio de Fomento. 35898-35987 pp.
- NCSE-94 (1994). *Norma de Construcción Sismorresistente Española, Parte General y de Edificación*. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes, Real Decreto 2543/1994 del 29 de diciembre de 1994, Boletín Oficial del Estado nº 33, miércoles 8 de febrero de 1995. 3936-3980 pp.
- PDS-1. (1974). *Norma Sismorresistente P.D.S-1. Comisión Internacional de la Presidencia del Gobierno, Decreto de 30 de agosto de 1974. BOE, 279, 21 de noviembre de 1974. 3723-3740 pp.*

- PGS-1 (1968). *Decreto 106/1968, de 16 de enero, por el que se aprueba la aplicación de la «Norma Sismorresistente PGS 1 (1968), parte A»*. Presidencia del Gobierno. BOE 30/1968. Fecha de publicación. 04/02/1968. 1658 pp
- Proshake (2000). User's manual. Ground response analysis program. Version 1.1. EduPro Civil Systems Ins., Redmond.
- Secanell, R. (1999). *Avaluació de la perillositat sísmica a Catalunya: anàlisi de sensibilitat per a diferents models d'ocurrència i paràmetres sísmics*. Universidad de Barcelona. Barcelona.
- Secanell, R.; Bertil, D.; Martin, C.; Goula, X.; Susagna, T.; Tapia, M.; Dominique, P.; Carbon, D. and Fleta, J. (2008). Probabilistic seismic hazard assessment of the Pyrenean region. *Journal of Seismology*. 12, 323-341.
- SISMICAT (2003) Pla Especial d'Emergències Sísmiques de Catalunya (SISMICAT).DOG Núm 3912 -26.6.2003.
- Soler, D., Brusi, D., Zamorano, M., Goula, X., Figueras, S., Macau, A., Martí, A., and Vilà, M. (2012). Seismic microzonation of the Girona urban area (NE Spain) from statistical analysis of geotechnical data. 7th European Congress on Regional GEOscientific Cartography and Information Systems (EUREGEO). Bologna, Italy. 2p.
- Susagna, T., Goula, X., Roca, A., Pujades, L., Gasulla, N., & Palma, J. (2006). *Loss scenarios for regional emergency plans: application to Catalonia*. Spain.
- Vacareanu, R., D. Lungu, C. Arion and A. Aldea. (2004). *WP07. Seismic Risk Scenarios Handbook*. Bucarest, Report. Risk-UE Project: 52 pp.
- Vendrell, S. (2011). *Evaluación del riesgo sísmico en la ciudad de Girona. Tesina de especialidad de la E.T.S.E.Camins, Canals i Ports de Barcelona*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, julio 2011.

ANEXO A: CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS SEGÚN RISK-UE (BTM)

La matriz que se presenta se definió a partir del inventario de edificios de los países que participaron en el proyecto Risk-ue (Milutinovic y Trendafiloski, 2003): Bulgaria, Grecia, Francia, Italia, FYRoM, Rumania y España. Describe las tipologías estructurales consideradas en dicho proyecto.

Tipología	Descripción
M.	Estructuras de mampostería
M 1	Muros de carga con mampostería
M 1.1	Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada
M 1.2	Muros de carga con mampostería de piedra tallada
M 1.3	Muros de carga con mampostería de sillería
M 2	Adobe
M 3	Muros de carga con mampostería no reforzada
M 3.1	Muros de carga con mampostería no reforzada con forjados de madera
M 3.2	Muros de carga con mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería
M 3.3	Muros de carga con mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería
M 3.4	Muros de carga con mampostería no reforzada con forjados de losas de hormigón armado
M 4	Muros de carga con mampostería reforzados o confinados
M 5	Edificios de mampostería totalmente reforzada
RC.	Estructuras de hormigón
RC 1	Estructuras de hormigón resistentes al momento
RC 2	Muros de cortante de hormigón
RC 3.1	Estructuras de hormigón con muros de relleno regulares de mampostería no reforzada
RC 3.2	Estructuras de hormigón irregulares con muros de mampostería no reforzada
RC 4	Sistemas duales, muros y pórticos de hormigón armado
RC 5	Muros de hormigón prefabricado
RC 6	Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón
S.	Estructuras metálicas
S 1	Estructuras metálicas resistentes al momento
S 2	Estructuras metálicas arriostradas
S 3	Estructuras metálicas con muros de relleno de mampostería no reforzada
S 4	Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados in situ
S 5	Sistemas o estructuras mixtas, de acero y hormigón armado (rc)
W.	Estructuras de madera

A continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas.

M1.1. Muros de carga con mampostería de piedras y piedra machacada

Construcciones tradicionales en las cuales las piedras se utilizan como material de construcción básico, generalmente con mortero de mala calidad, haciendo que los edificios sean pesados y con poca resistencia a cargas laterales. Los forjados suelen ser de madera, y no proporcionan rigidez horizontal.

M1.2. Muros de carga con mampostería de piedra tallada

Estas construcciones difieren de las de tipo M1.1 en que las piedras han experimentado una cierta preparación antes del uso. Las piedras se arreglan para la construcción del edificio según ciertas técnicas para mejorar la fuerza de la estructura, por ejemplo, usando piedras más grandes para enlazar en los dos externos a través del grueso y las paredes ortogonales a las esquinas. También pueden considerarse edificios de esta tipología los de piedras cortadas, con pulido áspero, mientras que las piedras sean de un tamaño significativo, con una textura precisa y, a veces, con pequeñas escamas en la piedra, ya que esto incrementa el contacto. También puede ser incluida en esta tipología, la mampostería de piedras intercaladas con capas horizontales compuestas de ladrillos o piedras más grandes.

M1.3. Muros de carga de mampostería de sillería

Los edificios construidos con esta tipología son generalmente monumentos, castillos, palacios, etc. Están hechos con piedras muy grandes. Este tipo de mampostería se desarrolló durante la Edad Media, cuando las piedras se pulían con una gran exactitud, o en palacios, a veces con materiales y fabricación de muy buena calidad. Por lo tanto, estos edificios poseen generalmente una gran resistencia, que contribuye a su buen comportamiento sísmico.

M2. Adobe

Este tipo de construcción se puede encontrar en muchos lugares donde existen arcillas adecuadas. Los métodos de construcción con adobe varían extensamente, y éste introduce algunas variaciones en la resistencia de las casas contra las sacudidas de terremotos. Las paredes construidas con capas de adobe sin el uso de ladrillos son rígidas y débiles; los edificios de adobe pueden mejorarse dependiendo de la calidad del mortero y, en menor grado, de la calidad del ladrillo. Las casas de adobe con entramado de madera poseen una resistencia adicional y resisten significativamente mejor.

Tales edificios pueden sufrir daño en las paredes con relativa facilidad, mientras que el marco de madera sigue estando intacto debido a su mayor ductilidad. También existen casas de adobe donde se utilizan vigas y columnas de madera no conectadas; éstas proporcionan una rigidez horizontal adicional y por lo tanto mejoran el comportamiento, pero no tanto como lo haría el marco conectado.

M3.1. Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de madera

La mayoría de construcciones tienen los forjados y el tejado contruidos con vigas de madera apoyadas sobre marcos de madera. En general, la vulnerabilidad se ve afectada por el número, tamaño y posición de las aberturas. Las aberturas grandes, entrepaños pequeños entre las aberturas y esquinas, así como los escasos muros internos debido a la amplitud de las habitaciones, contribuyen a aumentar la vulnerabilidad del edificio. Un problema a remarcar es el uso de paredes huecas, que pueden, si no están correctamente conectadas, crear paredes muy débiles con una escasa resistencia al terremoto.

M3.2. Muros de carga de mampostería no reforzada con bóvedas de mampostería

Las bóvedas se apoyan directamente en los muros de carga de mampostería o indirectamente a través de arcos de mampostería. En la mayoría de casos este tipo estructural se encuentra en edificios con fin religioso. En general, la vulnerabilidad se ve afectada por el número, el tamaño y la posición de las aberturas. Las aberturas grandes, entrepaños pequeños entre las aberturas y esquinas, así como los escasos muros internos debido a la amplitud de las habitaciones, contribuyen a aumentar la vulnerabilidad del edificio. Un problema a remarcar es el uso de paredes huecas, que pueden, si no están correctamente conectados, crear paredes muy débiles con una escasa resistencia al terremoto.

M3.3. Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y mampostería

Las losas se componen de vigas de acero apoyadas en los muros de carga de mampostería y de bóvedas de mampostería colocadas entre las vigas y apoyadas en las alas de la viga. En general, la vulnerabilidad se ve afectada por el número, el tamaño y la posición de las aberturas.

Las aberturas grandes, entrepaños pequeños entre las aberturas y esquinas, así como los escasos muros internos debido a la amplitud de las habitaciones, contribuyen a aumentar la vulnerabilidad del edificio. Un problema a remarcar es el uso de paredes huecas, que pueden, si no están correctamente conectadas, crear paredes muy débiles con una escasa resistencia al terremoto.

M3.4. Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados de losas de hormigón armado

Aunque los muros son los elementos más importantes que se observan en un edificio, a veces los elementos horizontales pueden ser igualmente decisivos en la determinación de la resistencia de una estructura a la carga lateral. Por lo tanto, las construcciones que tienen las paredes reforzadas (ladrillos, piedras pulidas, bloques de hormigón) y los forjados son de hormigón armado, se comportarán significativamente mejor que los edificios normales de mampostería. Si las paredes están conectadas y ligadas junto con una losa rígida con vigas anulares, se crea un sistema encajonado que reduce con eficacia el riesgo del derrumbamiento de las paredes hacia afuera del plano, o la separación y deriva de la intersección de las paredes perpendiculares. Esta mejora del comportamiento se observará solamente si el forjado de hormigón armado está conectado correctamente con la estructura; éste es el caso de los edificios más recientes de mampostería (siglo XX), en los que se emplearon las vigas anulares durante la construcción.

M4. Muros de carga de mampostería reforzados o confinados

La mampostería reforzada, las barras o el acoplamiento de acero quedan encajados o embebidos (en mortero o lechada) en agujeros o entre las capas de mampostería de ladrillos, creando un material compuesto que actúa como un muro altamente resistente y dúctil. Este refuerzo estará presente en las direcciones verticales y horizontales. La mampostería confinada se caracteriza por la construcción rígida de la mampostería entre las columnas estructurales y las vigas en las cuatro caras, proporcionando un nivel similar de resistencia. En estos casos, no se cree que los elementos conectados deban comportarse como un entramado resistente al momento, así que la mampostería no es sólo un relleno no estructural, sino también el material estructural principal.

M5. Edificios de mampostería totalmente reforzada

Los viejos edificios de mampostería que han experimentado una consolidación total para reducir la vulnerabilidad sísmica. Los trabajos que pertenecen a esta categoría son los siguientes: a) los nuevos forjados de hormigón armado (RC), con armadura continua en las vigas y losas rígidas b) el revestimiento de los paneles de mampostería con RC c) la construcción de vigas y columnas de hormigón armado en el grueso del muro, para confinar la mampostería con un bastidor no resistente al momento d) inserción de un bastidor de acero en el grueso de pared. El comportamiento de esta clase de edificios es muy diverso porque depende de la eficacia de la intervención adoptada, en relación con el edificio original y con la calidad de su realización real.

RC1. Estructuras de hormigón resistentes al momento

Estos edificios tienen pórticos con columnas y vigas de RC. En algunos casos, las conexiones entre viga y columna tienen capacidad resistente a momentos muy pequeños, pero en otros casos, algunas de las vigas y columnas se diseñan como marcos completamente resistentes al momento de fuerzas laterales. Generalmente, la estructura está recubierta por paredes no estructurales exteriores, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo, o paneles del hormigón prefabricado), y en el interior por techos y columnas revestidos. Los diafragmas (construidos generalmente de RC) transfieren cargas laterales a los marcos resistentes al momento. Si se presenta una baja rigidez de los bastidores puede dar lugar a grandes derivas entre plantas que pueden conducir a un daño no estructural relativamente mayor. Hay una gran variedad de sistemas de marco. Algunos marcos de hormigón más viejos pueden proporcionarse y detallarse de forma que la fragilidad de rotura de los miembros del marco puede producirse durante el terremoto, lo que conduce al derrumbamiento parcial o completo del edificio. En zonas de la alta sismicidad los marcos modernos están proporcionados y pormenorizados para el comportamiento dúctil y es probable que experimenten deformaciones grandes durante un terremoto sin la rotura de los miembros del marco y sin colapsar.

RC2. Muros de cortante de hormigón

Los componentes verticales del sistema que resiste a fuerzas laterales en estos edificios son los muros a esfuerzo cortante de hormigón que normalmente son muros de carga. En edificios más viejos, las paredes son a menudo muy extensas y las

tensiones de la pared son bajas pero el refuerzo es ligero. En edificios más nuevos, se limita con frecuencia la extensión de los muros de cortante, generando inquietudes por el límite de los miembros y las fuerzas de volcado.

RC3.1. Estructuras de hormigón con muros de relleno regulares de mampostería no reforzada

Generalmente, estos edificios no presentan un diseño sismorresistente, sin embargo, tienen un buen relleno regular de mampostería, que puede ayudar significativamente en la resistencia a acciones horizontales. Las paredes de relleno están generalmente desplazadas de los miembros exteriores del pórtico, se recubren de material ignífugo, y demuestran generalmente una mampostería exterior lisa sin la indicación del pórtico. Cuando los paneles de mampostería sólidamente rellenos comunican completamente con los miembros circundantes del pórtico (es decir, se encuentran en el mismo plano), pueden proporcionar a la estructura rigidez y resistencia frente a carga laterales. En estos edificios, el esfuerzo de cortante de las columnas, después de agrietarse el relleno, puede limitar el comportamiento semi-dúctil del sistema.

RC3.2. Estructuras de hormigón irregulares con muros de mampostería no reforzada

Estos edificios son similares a los pórticos de hormigón en los edificios de tipología RC3.1, excepto por las irregularidades que muestra el sistema estructural, las cuales pudieron ser debidas a la carencia de regularidad de los pórticos de hormigón o de las paredes de relleno. Las irregularidades del pórtico de hormigón y/o la presencia de plantas blandas producen un comportamiento estructural pobre bajo cargas laterales.

RC4. Sistemas duales, muros y pórticos de hormigón armado

Estos edificios tienen sistemas estructurales que están compuestos por los marcos de RC y muros estructurales de RC.

RC5. Muros de hormigón prefabricado

Estos edificios tienen diafragmas de RC que distribuyen las fuerzas laterales a los muros de cortante de hormigón prefabricado. Edificios más viejos tienen a menudo conexiones inadecuadas del anclaje de los muros a la azotea y forjados para las fuerzas hacia afuera del plano, siendo a menudo las conexiones del panel frágiles. Las paredes pueden tener numerosas aberturas para las puertas, y las ventanas son de tal tamaño que la pared parece más un marco que un muro de carga.

RC6. Estructuras de hormigón prefabricado con muros de cortante de hormigón

Estos edificios contienen los diafragmas del suelo y azotea integrados típicamente por elementos de hormigón prefabricado con o sin las losas superiores de hormigón colocadas in situ. Las vigas y columnas de hormigón prefabricado soportan los diafragmas. Las franjas de cierre entre los elementos prefabricados del suelo y las conexiones entre viga y columna son generalmente de hormigón colocado in situ. Los insertos de acero soldado se utilizan a menudo para interconectar elementos prefabricados. Los muros de hormigón de cortante, prefabricados o colocados in situ son resistentes a cargas laterales. Para que los edificios con los pórticos prefabricados y los muros de cortante de hormigón puedan presentar un buen comportamiento, los detalles suelen estar conectados a los elementos estructurales, que deben tener suficiente fuerza y capacidad de desplazamiento; sin embargo, en algunos casos, los detalles de conexión entre los elementos prefabricados tienen una ductilidad insignificante.

S1. Estructuras metálicas resistentes al momento

Estos edificios tienen un entramado de columnas y vigas de acero. En algunos casos, las conexiones entre viga y columna tienen capacidad resistente al momento muy pequeña, pero, en otros casos, algunas de las vigas y columnas se desarrollan completamente como marcos para resistir al momento de fuerzas laterales. Generalmente, la estructura está recubierta por las paredes no estructurales exteriores, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo o paneles del hormigón prefabricado), y en el interior por los techos y columnas revestidos. Los diafragmas transfieren cargas laterales a los marcos resistentes al momento. Los diafragmas pueden ser casi de cualquier material. Los marcos desarrollan su rigidez mediante conexiones total o parcialmente resistentes al momento. Los marcos se pueden situar en casi cualquier lugar del edificio. Normalmente, las columnas tienen sus direcciones fuertes orientadas de modo que algunas columnas actúan principalmente en una dirección mientras que las otras actúan en la otra.

S2. Estructuras metálicas arriostradas

Estos edificios son similares a los del tipo S1, excepto en que los componentes verticales del sistema resistente a fuerzas laterales son pórticos arriostrados más que pórticos resistentes al momento.

S3. Estructuras metálicas con muros de relleno de mampostería no reforzada

Las paredes de relleno están generalmente desplazadas de los miembros exteriores del pórtico, se recubren de material ignífugo y generalmente muestran una mampostería exterior lisa sin la indicación del pórtico. Cuando los paneles de mampostería sólidamente rellenos comunican completamente con los miembros circundantes del pórtico (es decir, se encuentran en el mismo plano), pueden proporcionar a la estructura rigidez y resistencia frente a cargas laterales.

S4. Estructuras metálicas con muros de cortante de hormigón colocados in situ

Los bloques de hormigón en estos edificios se colocan in situ y pueden ser muros de carga. El marco de acero se diseña únicamente para las cargas verticales. Diafragmas de casi cualquier material transfieren la carga lateral a los muros de carga. El marco de acero puede proporcionar un sistema secundario de resistencia a fuerzas laterales dependiendo de la rigidez del bastidor y de la capacidad de resistencia al momento de las conexiones entre viga y columna. En los modernos sistemas “dual”, los marcos de acero resistentes al momento se diseñan para trabajar junto con los muros de carga de hormigón.

S5. Sistemas o estructuras mixtas, de acero y hormigón armado

Estos edificios tienen un marco resistente al momento de columnas y vigas compuestas de acero y hormigón. Generalmente, la estructura está recubierta por las paredes no estructurales exteriores, que pueden ser de casi cualquier material (muros cortina, mampostería de ladrillo, o paneles del hormigón prefabricado), y en el interior por los techos y columnas revestidos. Los diafragmas transfieren cargas laterales a los marcos resistentes al momento. Los diafragmas pueden ser casi de cualquier material. Los marcos desarrollan su rigidez mediante conexiones total o parcialmente resistentes al momento. Los marcos se pueden situar en casi cualquier lugar del edificio. Normalmente, las columnas tienen sus direcciones fuertes orientadas de modo que algunas columnas actúan principalmente en una dirección mientras que las otras actúan en la otra.

W. Estructuras de madera

Son normalmente viviendas unifamiliares o pequeñas viviendas multifamiliares. La característica estructural esencial de estos edificios es el marco repetitivo de vigas de madera o cabios de madera o viguetas de madera con pernos a las paredes.

Las cargas son ligeras y las luces, vanos y arcadas son pequeños. Estos edificios pueden tener chimeneas de mampostería relativamente pesadas, que pueden cubrirse parcial o completamente con la placa de piedra. La mayoría de estos edificios tienen generalmente los componentes de un sistema resistente a fuerzas laterales, aunque pueden ser incompletos. Las cargas laterales son transferidas por los diafragmas a los muros de carga. Los diafragmas son paneles de azotea y forjados que pueden estar revestidos con madera serrada, madera contrachapada o cartón-fibra. Los muros de cortante se revisten con tableros, estuco, mortero de yeso, madera contrachapada, paneles de yeso, tableros prensados o paneles de cartón-fibra, y las paredes interiores se forran con mortero de yeso o paneles de yeso.

ANEXO B: CLASIFICACIÓN DE EDIFICIOS ESPECÍFICA PARA EL MUNICIPIO DE GIRONA

A continuación se presentan fichas con la descripción y caracterización gráfica de las diferentes tipologías estructurales que definen el parque de edificios del municipio de Girona, obtenidas como parte de los objetivos de este trabajo.

TIPOLOGÍA GIRONA: **A 1.1 - Muros de carga de cascotes o piedra no labrada - Bóveda en PB - Forjado de viguetas de madera en PP**

MAMPOSTERÍA

TIPOLOGÍA RISK-EU ASOCIADA: **M 1.1**

DESCRIPCIÓN

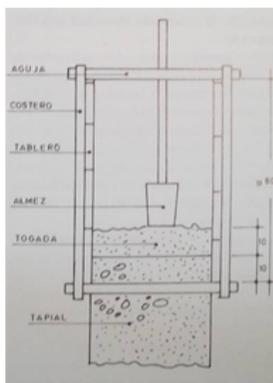
Construcciones tradicionales de mampostería en las que el material básico es la piedra sin labrar, generalmente unida con argamasa de mala calidad. La piedra actúa como elemento estructural portante, formando muros de carga. Éstos, soportan esfuerzos de compresión.

El primer forjado suele ser bóveda de ladrillo, ejecutada según la tradición catalana, generalmente de 3 ó 4 m. En edificios construidos antes de 1800, las bóvedas son de piedra. Se generan plantas bajas de mayor altura. Los forjados del resto de plantas son de viguetas de madera (roble o pino). Los muros son de más de 50 cm de grosor debido al tamaño de las piedras. Son edificios típicos del Centre, concretamente pertenecientes al sector del Barri Vell.

SITUACIÓN Y ÉPOCA REPRESENTATIVA

Se trata de edificios construidos antes 1900 y, gran parte de ellos, reformados con el Plan Especial del Barri Vell (1983-2003) estableciendo diferentes categorías de restauración, pero siempre manteniendo su tipología y configuración esencial.

ESQUEMA DEL MODELO CONSTRUCTIVO



Para este tipo de muros, se construye un encofrado previo. Éste, se rellena de piedra de diferentes tamaños y tierra. A medida que se va rellenando, se va compactando para conferirle al muro resistencia y rigidez. Esta tipología es de las más antiguas menos resistente.

Fuente: Regalado, F. *Los forjados de los edificios: pasado, presente y futuro*. Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros.

FOTOGRAFÍAS REPRESENTATIVAS

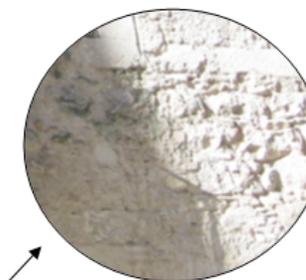


Figura 1: Edificio típico del barrio del Centre (sector Barri Vell)

Finca de planta baja + 3 pisos construida con mampostería de piedra no labrada.



Figura 2: Bóveda de ladrillo

Forjado en planta baja perteneciente a un edificio de muros de carga de piedra. Prototipo de forjado en PB del Centre (sector Barri Vell).

TIPOLOGÍA GIRONA: **A 1.2 - Muros de carga de piedra labrada - Bóveda en PB - Forjado de vigueta de madera en PP**

MAMPOSTERÍA

TIPOLOGÍA RISK-EU ASOCIADA: **M 1.2**

DESCRIPCIÓN

Esta tipología es típica de edificios con paredes careadas de mampostería concertada, forjados de madera (roble o pino) y bóveda de ladrillo en planta baja, ejecutada según la tradición catalana. Difieren de las anteriores en que la piedra está tallada (labrada) y colocada sin sujeción a escuadra para que se ajusten mejor unas con otras.

Presentan mayor resistencia que las anteriores.

Se pueden incluir, también, muros formados por franjas horizontales de mampuestos separadas por cintas de ladrillo o piedras alargadas.

SITUACIÓN Y ÉPOCA REPRESENTATIVA

Son edificios típicos del Centre, concretamente pertenecientes al Barri Vell. La altura no suele superar las 4 ó 5 plantas. Es habitual observar el exterior de los muros a partir de la primera planta, revestidos con piedra o con pasta de cemento coloreada.

En la mayoría de casos se trata de estructuras irregulares debido a la existencia de plantas débiles.

FOTOGRAFÍAS REPRESENTATIVAS



Figura 3: Edificio de muros de carga de piedra.
Ejemplo de edificio con recubrimiento en fachada. Puede apreciarse que las paredes son de mampostería concertada. Edificio del Centre (sector Barri Vell).

ESQUEMA DEL MODELO CONSTRUCTIVO



Fuente: Regalado, F. *Los forjados de los edificios: pasado, presente y futuro*. Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros.

Para su construcción se coloca una piedra rectangular del ancho del muro a cada metro, como guía de alineamiento. Se apilan las piedras y los espacios entre ellas se rellenan con piedrecitas pequeñas y mortero. La verticalidad y alineamiento deben ser muy cuidados, pues es muy fácil perderlos. Para mantener la alineación, se coloca un tendido de cuerdas.



Figura 4: Edificio típico con muros de carga de piedra tallada.

Suele tratarse de edificios reformados pertenecientes al Centre (sector Barri Vell).



Figura 5: Prototipo de edificio de altura media con muros portantes de piedra labrada.
Situados en el barrio del Centre (sector Barri Vell).

TIPOLOGÍA GIRONA: **A 1.3 - Muros de carga de sillería - Forjados de madera**

MAMPOSTERÍA

TIPOLOGÍA RISK-EU ASOCIADA: **M 1.3**

DESCRIPCIÓN

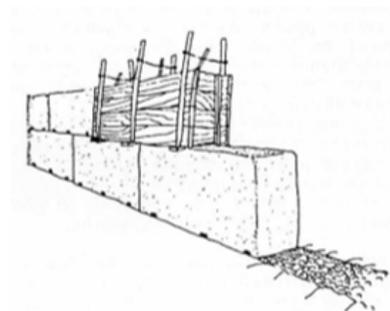
Construcciones a base de muros de mampostería de piedra y forjados con viguetas de madera. Se caracterizan por estar contruidos a base de piedras de gran tamaño talladas con gran precisión, que añaden resistencia y contribuyen a un mejor comportamiento frente a sismicidad.

Esta tipología se utilizaba en palacios, iglesias y edificios señoriales, que actualmente pueden haberse convertido en Ayuntamiento, museos, etc.

SITUACIÓN Y ÉPOCA REPRESENTATIVA

Es el caso de los edificios de la Rambla de la Llibertat, situados en el sector del Barri Vell.

ESQUEMA DEL MODELO CONSTRUCTIVO



Fuente: Regalado, F. *Los forjados de los edificios: pasado, Ingenieros.*

La **sillería** es el modo de construir más común, sobre todo en periodos más perfeccionistas y constructivamente de más calidad.

Consiste en la colocación de unidades rectangulares de piedra de gran tamaño unidas entre sí con mortero.

Se trata de una construcción uniforme, en bandas horizontales de sillares perfectamente escuadrados.

FOTOGRAFÍAS REPRESENTATIVAS



Figura 6: Edificios de la Plaça del Vi. Situados en el Centre (sector Barri Vell)



TIPOLOGÍA GIRONA:

A 2.1 - Paredes de carga de obra de fábrica sin reforzar - Forjado mixto de bovedilla cerámica y viguetas metálicas

MAMPOSTERÍA

TIPOLOGÍA RISK-EU ASOCIADA: M3.3

DESCRIPCIÓN

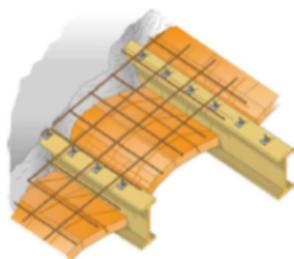
Son edificios con muros de carga de obra de fábrica sin reforzar y forjados mixtos. Los forjados están constituidos a base de perfiles metálicos (generalmente IPN) completados con bovedillas de ladrillo o con pequeñas bóvedas entre las vigas rellenas de hormigón pobre. Las vigas descansan y transmiten las cargas sobre los muros de ladrillo.

SITUACIÓN Y ÉPOCA REPRESENTATIVA

Tipología propia de los sectores Sant Narcís (barrio Sud) y Vila-Roja (barrio Eixample). Aproximadamente el 90% de los edificios de estos sectores son viviendas unifamiliares de 1 ó 2 plantas, de las que las construidas hasta 1960 corresponderán a esta tipología. En general, será la tipología más utilizada para las viviendas unifamiliares de planta baja + planta piso (sectores Palau, Mercadal, Montilivi, Montjuïc)

ESQUEMA DEL MODELO CONSTRUCTIVO

Construcción de pared de carga de obra de fábrica.



Forjado mixto de viguetas metálicas y bovedillas cerámicas soportadas y conectadas a ellas.

Fuente: Regalado, F. *Los forjados de los edificios: pasado, presente y futuro*. Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros.

FOTOGRAFÍAS REPRESENTATIVAS

Figura 8: Viviendas unifamiliares. Son de 1 ó 2 plantas y pertenecen al barrio de l'Eixample (sector Sant Narcís)



Figura 7: Conjunto de viviendas antiguas de dos plantas. Situadas en el barrio de l'Exemple (sector Eixample Sud).

TIPOLOGÍA GIRONA: A 2.2 - Paredes de carga de obra de fábrica sin reforzar - Forjado de bovedilla cerámica y viguetas de hormigón armado

TIPOLOGÍA RISK-EU ASOCIADA: M3.4

MAMPOSTERÍA

DESCRIPCIÓN

Edificios con muros de carga de obra de fábrica sin reforzar y forjados constituidos por viguetas de hormigón y bovedillas cerámicas.

Las viguetas son el elemento fundamental del sistema, ya que son las encargadas de soportar el peso de la losa y las cargas sobre ella, así como de transmitir las a los cerramientos.

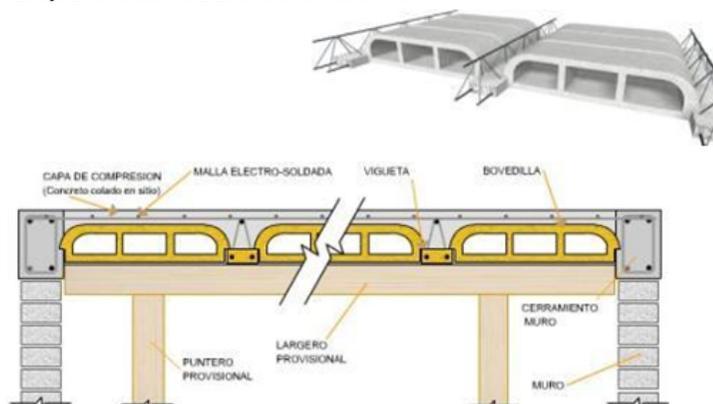
Las bovedillas se utilizan para aligerar la losa. No tienen ninguna función estructural.

SITUACIÓN Y ÉPOCA REPRESENTATIVA

Los edificios con esta tipología se comenzaron a construir aproximadamente a partir de 1940 (con la Guerra Civil, debido a la escasez de hierro) y su utilización masiva duró hasta 1980, cuando aparecieron los forjados reticulares. Al igual que en el caso anterior, esta tipología puede encontrarse en los sectores de Sant Narcís y Vila-Roja. En general, se utiliza para viviendas unifamiliares, o fincas de pocas plantas por lo que podrá encontrarse en barrios residenciales como Montjuïc, Palau i Montilivi.

Un 10% de los edificios presentan un cambio de rigidez en planta baja por cambios en la estructura.

ESQUEMA DEL MODELO CONSTRUCTIVO



Fuente: Regalado, F. *Los forjados de los edificios: pasado, presente y futuro*. Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros.

FOTOGRAFÍAS REPRESENTATIVAS



Figura 10: Vivienda unifamiliar de PB + 1PP.

Construida en zona residencial en el barrio del Sud (sector Montilivi)



Figura 9: Edificios de 3 plantas con arcos en PB. Situados en la plaza de Sant Narcís, detrás de la iglesia (sector Sant Narcís).

TIPOLOGÍA GIRONA: B 1 - Estructura irregular de hormigón armado - Cerramientos de obra de fábrica no reforzada

TIPOLOGÍA RISK-EU ASOCIADA: RC 3.2

HORMIGÓN ARMADO

DESCRIPCIÓN

Edificios con pilares de hormigón armado y forjados contruidos a base de losas reticuladas, jácenas planas o viguetas unidireccionales de hormigón. Se diferencian de los edificios de muros de carga en que los forjados trabajan a flexión. Las cargas se transmiten a los pilares a través de las vigas y éstos las llevan hasta las cimentaciones.

Los cerramientos son de obra de fábrica, generalmente de ladrillo hueco. Éstos influyen en la estructura mejorando su resistencia frente a cargas laterales.

SITUACIÓN Y ÉPOCA REPRESENTATIVA

Esta tipología se empieza a utilizar a partir de 1980. Y de aquí en adelante será la más utilizada, sobre todo para edificios de más de 4 plantas. Otro hecho representativo será la utilización de la planta baja con finalidad comercial. Este hecho hace que se creen plantas blandas, que disminuyen la rigidez de la estructura.

FOTOGRAFÍAS REPRESENTATIVAS



Figura 11: Edificios altos (9 plantas) puntuales, situados en el barrio de l'Eixample (sector Eixample Sud).

Claro ejemplo de estructura de hormigón irregular.



Figura 13: Edificio de viviendas de 6 plantas con PB débil.

Situado en el barrio de l'Eixample (sector Eixample Nord).



Figura 12: Edificio de estructura de HA.

Situada en el barrio de l'Eixample (sector Nord).

TIPOLOGÍA GIRONA: **C 1 - Estructura metálica mixta con cerramientos de obra de fábrica sin reforzar.**

ESTRUCTURA METÁLICA

TIPOLOGÍA RISK-EU ASOCIADA: **S 3**

DESCRIPCIÓN

Estructura mixta formada por pilares metálicos y forjados de HA, con cerramientos de obra de fábrica. La resistencia la ofrece la estructura, pero las paredes de fábrica añaden rigidez frente a esfuerzos laterales. Normalmente los cerramientos envuelven la estructura metálica, por lo que es difícil su identificación.

SITUACIÓN Y ÉPOCA REPRESENTATIVA

El porcentaje de edificios de esta tipología es muy bajo. Y los que pertenecen a ella suelen ser edificios altos, de más de 10 plantas. Se utilizan poco, sólo en casos concretos, en edificios muy nuevos o en edificios reformados.

FOTOGRAFÍAS REPRESENTATIVAS



Figura 14: Edificios altos puntuales con ciertos elementos metálicos.
Situados en la zona periférica del barrio del Centre (zona límite entre sectores Mercadal y Eixample Nord)



Figura 16: Bloques de oficinas o viviendas reformados con estructura metálica.
Estructura formada por pilares metálicos, forjados reticulares y cajas de escalera y ascensores rodeados de muros de cortante. Situados en el barrio del Centre (sector Mercadal).

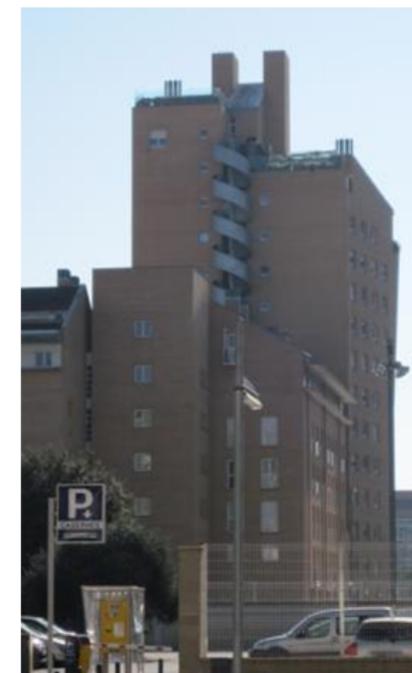


Figura 15: Antiguas casernas militares reformadas como viviendas.

Se trata de unos de los edificios más altos de la ciudad. Su estructura está formada por pilares de hormigón armado, forjados reticulares y muros de cortante alrededor de escaleras y ascensores. Situados en l'Eixample Sud y construidos sobre 1990.

ANEXO C: MATRICES DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIPOLOGÍAS POR BARRIOS

En este Anexo se representa, para cada barrio del municipio, el porcentaje de edificios de cada tipología constructiva definida en Girona. Estos porcentajes se obtienen en base a criterio de experto (Blázquez, 2011).

Barrio Nord

Total edif 600

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1	71%	33%		
	M 1.2	29%	6%		
	M 1.3				
	M 3.3		6%	2%	
	M 3.4		55%	83%	32%
	RC 3.2			15%	59%
	RC 2				4%
	S 3				5%
	S 2				
Num Edificios		117	130	175	74
MEDIOS (4-6)	M 1.1	93%	90%		
	M 1.2	7%	6%		
	M 1.3				
	M 3.3		3%	4%	
	M 3.4		1%	80%	12%
	RC 3.2			16%	80%
	RC 2				8%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		7	18	45	25
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4				
	RC 3.2			100%	75%
	RC 2				25%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		0	0	5	4

Barrio Montjuïc

Total edif 553

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1	25%			
	M 1.2	25%			
	M 1.3				
	M 3.3	50%	33%	9%	2%
	M 3.4		67%	80%	10%
	RC 3.2			11%	76%
	RC 2				2%
	S 3				10%
	S 2				
Num Edificios		4	12	110	399
MEDIOS (4-6)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3			7%	
	M 3.4			31%	7%
	RC 3.2			62%	72%
	RC 2				21%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		0	0	13	14
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4				
	RC 3.2				100%
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		0	0	0	1

Barrio Oest

Total dif 1383

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-2)	M 1.1	31%			
	M 1.2	31%			
	M 1.3	7%			
	M 3.3	31%	11%	6%	1%
	M 3.4		86%	92%	48%
	RC 3.2		3%	2%	47%
	RC 2				1%
	S 3				3%
	S 2				
Num Edificios		16	178	315	731
MEDIOS (3-6)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3		17%	6%	
	M 3.4		66%	59%	2%
	RC 3.2		17%	35%	90%
	RC 2				8%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		0	6	34	94
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4				
	RC 3.2			33%	50%
	RC 2				50%
	S 3			34%	
	S 2			33%	
Num Edificios		0	0	3	6

Barrio Est

Total edif 812

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1	75%	21%	0.5%	
	M 1.2	17%	1%	0.5%	
	M 1.3				
	M 3.3		8%	16%	2%
	M 3.4 C	8%	13%	82%	31%
	M 3.4 T		57%		
	RC 3.2			1%	66%
	RC 2				1%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		36	265	267	151
MEDIOS (4-6)	M 1.1	100%			
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3		33%	3%	
	M 3.4		67%	96%	37%
	RC 3.2			1%	63%
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		2	3	80	8
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4				
	RC 3.2				
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		0	0	0	0

Barrio Centre

Total edif 1268

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1	52%	13%		
	M 1.2	15%	8%		
	M 1.3	8%	5%		
	M 3.3	25%	56%	12%	7%
	M 3.4		18%	68%	26%
	RC 3.2			20%	67%
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		61	143	104	95
MEDIOS (4-6)	M 1.1	54%	21%		
	M 1.2	14%	13%		
	M 1.3	8%	9%		
	M 3.3	24%	43%	4%	
	M 3.4		14%	19%	6%
	RC 3.2			66%	75%
	RC 2			11%	19%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		266	150	80	197
ALTOS (>=7)	M 1.1	31%	12%		
	M 1.2	23%	10%		
	M 1.3	23%	10%		
	M 3.3	23%	41%	3%	3%
	M 3.4		15%	15%	15%
	RC 3.2		12%	48%	40%
	RC 2			16%	27%
	S 3			13%	9%
	S 2			5%	6%
Num Edificios		44	40	55	33

Barrio Eixample

Total edif 2492

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	1981-1994
BAJOS (1-3)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3	100%	26%		
	M 3.4		39%	80%	22%
			35%		
	RC 3.2			20%	78%
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		34	401	256	353
MEDIOS (4-6)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3	100%	37%		
	M 3.4		55%	27%	10%
			8%		
	RC 3.2			48%	56%
	RC 2			3%	14%
	S 3			22%	15%
	S 2				5%
Num Edificios		14	133	248	539
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3	100%	45%		
	M 3.4		55%	3%	
	RC 3.2			44%	47%
	RC 2			29%	31%
	S 3			14%	14%
	S 2			10%	8%
	Num Edificios		2	20	269

Barrio Santa Eugènia

Total edif 562

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1	73%	25%		
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3	27%	51%	18%	5%
	M 3.4 C		23%	75%	13%
	RC 3.2			7%	77%
	RC 2				5%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		11	51	79	40
MEDIOS (4-6)	M 1.1		64%		
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3	100%	9%		
	M 3.4 C		27%	10%	2%
	RC 3.2			85%	77%
	RC 2			5%	21%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		1	11	93	164
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4 C			2%	
	RC 3.2			80%	19%
	RC 2			13%	77%
	S 3			4%	4%
	S 2			1%	
Num Edificios		0	0	80	32

Barrio Mas Xirgú

Total edif 24

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1				
	M 1.2		100%		
	M 1.3				
	M 3.3	100%			
	M 3.4			100%	56%
	RC 3.2				44%
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		1	1	1	19
MEDIOS (4-6)	M 1.1	100%			
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4				
	RC 3.2				
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		2	0	0	0
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4				
	RC 3.2				
	RC 2				
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		0	0	0	0

Barrio Sud

Total edif 1788

PLANTAS	TIPOLOGÍA	PERIODOS			
		<=1910	1911-1960	1961-1980	>1980
BAJOS (1-3)	M 1.1	24%			
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3	76%	60%	17%	
	M 3.4		40%	68%	24%
	RC 3.2			15%	58%
	RC 2				18%
	S 3				
	S 2				
Num Edificios		17	88	212	1301
MEDIOS (4-6)	M 1.1	50%			
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3	50%	60%	4%	
	M 3.4		40%	18%	8%
	RC 3.2			63%	48%
	RC 2				26%
	S 3			15%	18%
	S 2				
Num Edificios		2	10	28	107
ALTOS (>=7)	M 1.1				
	M 1.2				
	M 1.3				
	M 3.3				
	M 3.4				
	RC 3.2		100%	33%	43%
	RC 2			33%	37%
	S 3			33%	10%
	S 2				10%
Num Edificios		0	1	2	19

ANEXO D: PORCENTAJES DE LAS DIFERENTES TIPOLOGÍAS PERTENECIENTES A CADA BARRIO

En esta tabla se observan los diferentes porcentajes de edificios de cada una de las tipologías definidas para el municipio de Girona y repartidas en los nueve barrios en los que se compone. La suma de cada columna representa el 100% de las viviendas pertenecientes a cada barrio.

		PORCENTAJE DE EDIFICIOS POR BARRIO								
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
TIPOLOGÍAS	M 1.1	24.78	0.18	0.36	10.59	19.23	0.00	4.95	8.33	0.28
	M 1.2	7.22	0.18	0.36	1.24	7.21	0.00	0.00	4.17	0.00
	M 1.3	0.00	0.00	0.08	0.00	4.81	0.00	0.00	0.00	0.00
	M 3.3	2.27	4.48	3.89	8.66	21.70	8.53	8.49	4.17	6.15
	M 3.4C	46.60	25.49	59.27	47.40	14.86	26.16	16.61	48.50	28.48
	M 3.4T	0.00	0.00	0.00	18.60	0.00	6.06	0.00	0.00	0.00
	RC 3.2	17.52	60.48	33.02	13.32	25.98	38.95	55.47	34.83	48.41
	RC 2	0.99	1.97	1.29	0.19	5.04	9.23	13.55	0.00	15.10
	S3	0.62	7.22	1.66	0.00	0.80	8.20	0.80	0.00	1.47
	S 2	0.00	0.00	0.07	0.00	0.37	2.88	0.14	0.00	0.11

ANEXO E: MICROZONACIÓ SÍSMICA DE NIVELL BÀSIC A LA ZONA URBANA DE GIRONA

Per considerar l'amplificació del moviment sísmic del sòl degut a la geologia i propietats mecàniques del subsòl de la ciutat de Girona, s'ha assignat un increment d'intensitat macrosísmica tenint en compte els resultats obtinguts en dos estudis realitzats en el marc del projecte SISPYR:

El primer, s'ha dut a terme en el marc d'un conveni de col·laboració entre l'IGC i el centre de Geologia i Cartografia Ambiental de la Universitat de Girona (GEOCAMB) i ha consistit en una microzonació sísmica de nivell bàsic de l'àrea urbana de Girona, aquesta microzonació s'ha dut a terme en termes del coeficient C. El segon estudi, realitzat per l'IGC, ha consistit en la microzonació sísmica de la ciutat de Girona en termes de la freqüència fonamental de vibració del terreny (f_0), obtinguda a partir d'una campanya de prospecció sísmica passiva. La interpretació conjunta dels resultats obtinguts en ambdós estudis ha permès fer una microzonació de la ciutat en termes de l'increment d'intensitat macrosísmica degut a l'efecte de sòl.

Microzonació en termes del coeficient C

El coeficient C del terreny és un paràmetre proposat per la NCSE-02 que modifica un coeficient d'amplificació (S) de l'acceleració sísmica bàsica (a_b), aquests paràmetres intervenen en el disseny sismorresistent dels edificis de nova construcció, d'acord amb l'esmentada norma. El coeficient C es calcula a partir del promig dels coeficients C dels 30 primers metres de la capa de sòl, classifica el terreny en quatre categories (I a IV) segons la velocitat de propagació de les ones transversals o de cisalla, i per correlació, segons el grau de compacitat del sòl.

Pel càlcul del coeficient C per la ciutat de Girona s'han recopilat i homogeneïtzat dades de 1533 sondejos geotècnics, 5082 assaigs in situ, 376 assaig de laboratori i s'han identificat 25 unitats litològiques de 5721 nivells litològics. Per cada unitat litològica s'ha fet una determinació estadística del coeficient C considerant la informació disponible d'assaigs en el terreny i en laboratori.

Per cada sondeig s'ha assignat una classe de sol a les diferents unitats litològiques considerant criteris basats en un càlcul ponderat que té en compte valors reals i estadístics de C i, finalment, s'ha fet el càlcul del coeficient C30 en 1327 sondejos.

Tipus de terreny	Coeficient de terreny (C)	Roca	Sòl granular	Sòl cohesiu	Vs (m/s)
I	1,0	Compacta	Compacitat molt densa	Sòl cimentat	>750
II	1,3	Fracturada	Compacitat densa	Consistència dura	400-750
III	1,6	-	Compacitat mitjana	Consistència rígida a molt rígida	200-400
IV	2,0	-	Compacitat solta a molt solta	Consistència tova a molt tova	<200

Classificació del tipus de terreny sísmic segons NCSE-02

Tipus de terreny	Coeficient de terreny (C)	Sòl granular		Sòl cohesiu	
		SPT (N_{30})	Angle fregament intern ($^{\circ}$)	SPT (N_{30})	Resistència comp. simple (kg/cm^2)
I	1,0	>50	>41	-	-
II	1,3	31-50	36-41	>30	>4
III	1,6	11-30	30-36	8-30	1-4
IV	2,0	≤ 10	<30	<8	<1

Correlacions habituals entre tipus de terreny sísmic i paràmetres geotècnics

La implementació dels resultats en una plataforma GIS ha permès elaborar el mapa que es presenta a la Figura 1. S'hi identifiquen dues zones:

- La zona central, S i W amb valors de C entre 1.3 i 1.6, que correspon a materials al·luvials quaternaris i detrítics del Neògen
- La zona N i E amb valors de C entre 1.0 i 1.3 que correspon a afloraments de materials del Paleògen i Paleozoic.

Microzonació en termes de la freqüència fonamental de vibració del terreny

La freqüència fonamental de vibració del terreny, f_0 , està relacionada amb el gruix de sediments i amb la velocitat de propagació de les ones de cisalla. A la zona d'estudi, s'ha dut a terme una campanya de prospecció sísmica passiva que ha consistit en registrar el soroll sísmic ambiental en 90 emplaçaments seleccionats en funció de les seves característiques geològiques i geotècniques.

L'aplicació del mètode de les relacions espectrals H/V (Nakamura, 1989) als registres de soroll sísmic ha permès obtenir la f_0 de cada emplaçament de mesura. A la Figura 2 es presenten els resultats obtinguts. El valor de f_0 varien entre 0.41 i 16.5 Hz. A la major part de la ciutat s'obtenen valors de f_0 entre 0.5 i 0.5. Els valors més alts de f_0 es troben prop dels afloraments rocosos, a l'E i N de la ciutat.

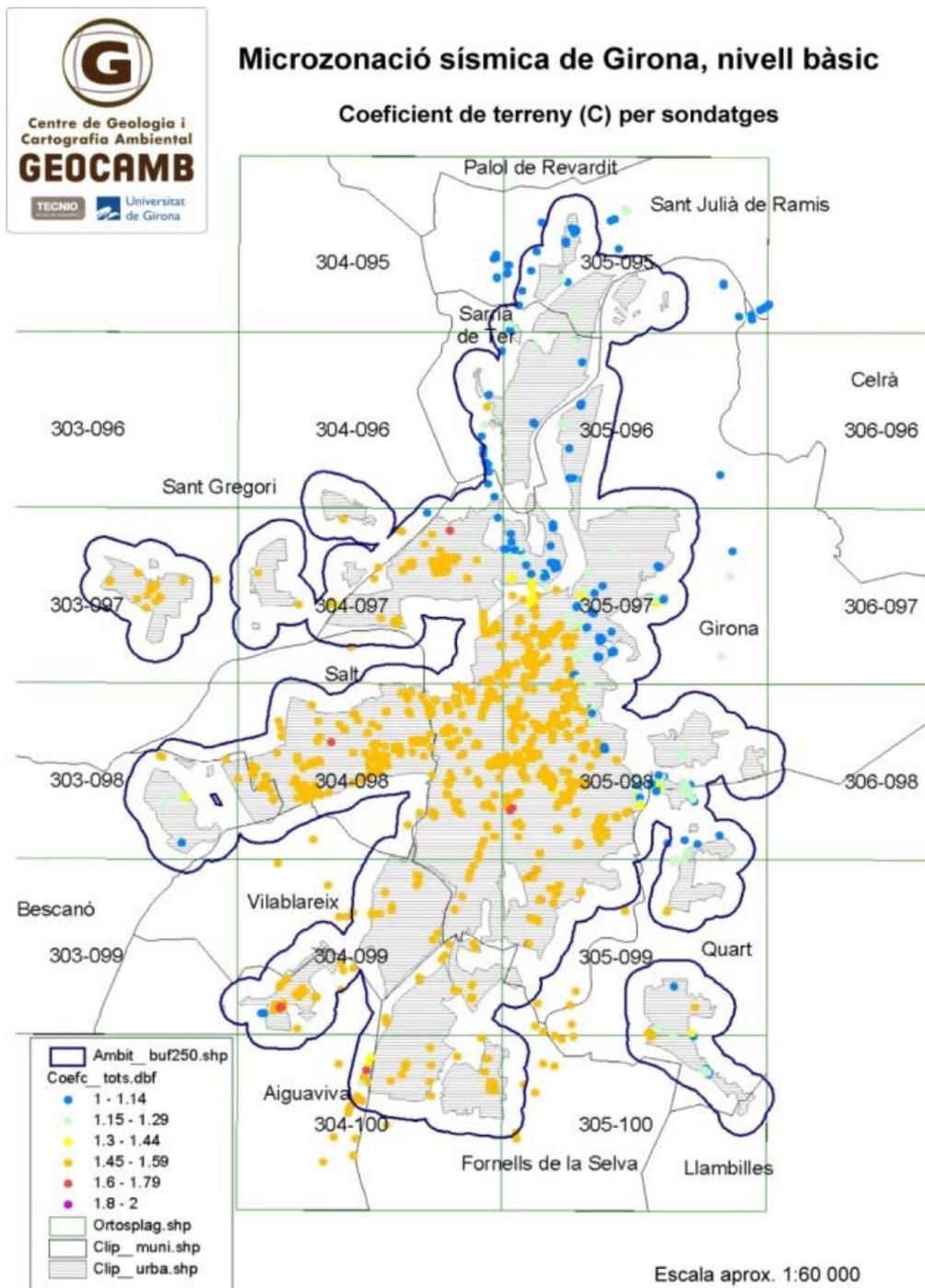


Figura 1. Valors del coeficient de terreny (C) per sondatges.

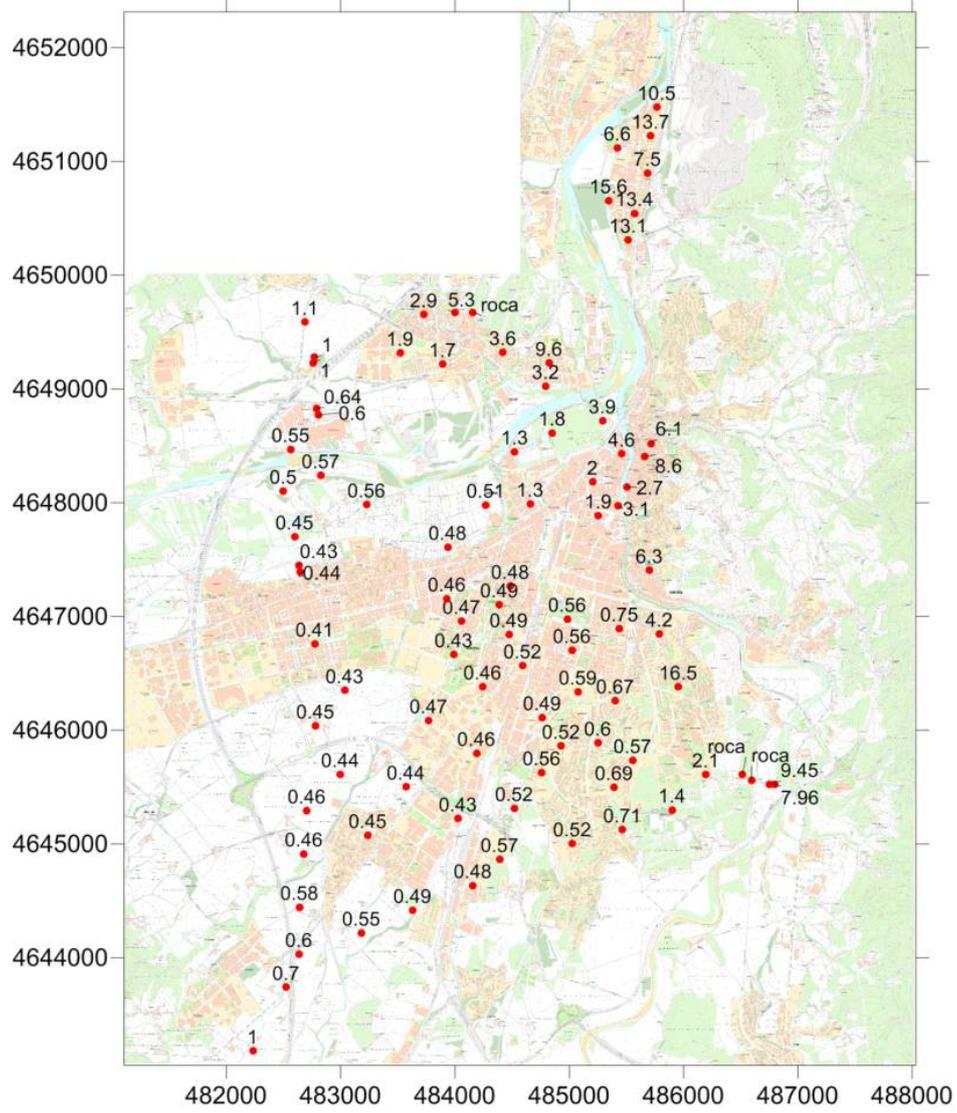


Figura 2. Valors de la freqüència fonamental de vibració del terreny.