



Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía
Escuela Técnica Superior en Ingeniería Topográfica, Geodesia y Cartografía
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA URBANA BASADA EN
TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS Y DISPOSICIÓN URBANA DE LA EDIFICACIÓN.
APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE LORCA, REGIÓN DE MURCIA.**

Autora:

Sandra Martínez Cuevas

Arquitecto

Directores:

Dra. María Belén Benito Oterino

Dra. en Ciencias Físicas

Dr. Jaime Cervera Bravo

Dr. Arquitecto

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magnífico de la Universidad Politécnica de Madrid, el
día 28 de marzo de 2014

Presidente:

D. Manuel Navarro Bernal

Secretario:

Dña. M. Carmen Morillo Balsera

Vocales:

D. Ramón Álvarez Cabal

D. Sergio Molina Palacios

D. José María Rodenas Cañada

Suplentes:

D. José J. Martínez Díaz

D. Marcos Ros Sempere

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 28 de abril de 2014 en la E.T.S.I. en
Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

Actualmente, diversos terremotos han puesto de manifiesto la importancia de planificar las ciudades y la gran influencia que tiene el comportamiento de los edificios como consecuencia de los resultados de pérdidas humanas y económicas. Ante la imposibilidad de evitar la ocurrencia de terremotos y de predecirlos con un margen pequeño de tiempo para tomar acciones a corto plazo, la reducción de la vulnerabilidad de los elementos expuestos es la medida más eficaz para prevenir los daños y para evitar el desastre.

Existen varios estudios anteriores de Norman B. Green (1980), Teresa Guevara López (2009 y 2012) que recogen criterios ya generalizados dentro de la bibliografía sísmica y algunos aspectos procedentes de norma sísmicas precursoras en este campo (por ejemplo, las peruanas) para establecer inicialmente unos principios urbanístico-sísmicos.

Además, varios proyectos relacionados con el riesgo sísmico, RisK-Ue (2003), SERAMAR (Lars Abrahamczyk et al., 2013) han desarrollado metodologías que clasifican la vulnerabilidad de los edificios teniendo en cuenta modificadores por comportamientos y configuraciones irregulares sísmicamente.

El presente trabajo desarrolla una metodología empírica para identificar y caracterizar los parámetros urbanísticos que determinan una respuesta sísmica irregular de las edificaciones, graduar su relación con el daño tras un terremoto y poder así disminuir la vulnerabilidad sísmica de las ciudades.

La metodología desarrollada en esta tesis doctoral se aplica en la ciudad de Lorca, Región de Murcia. Se realiza un trabajo de campo donde se clasifican los edificios según su tipología estructural y sus parámetros urbanísticos. A través de un estudio estadístico se analiza la correlación con el daño de las edificaciones tras el terremoto del 11 de mayo de 2011. Previamente se ha hecho una clasificación de los edificios según la clase de suelo en la que se encuentran según el Eurocódigo8 (Navarro et al, 2012).

Por último, se aplica la metodología para obtener una estimación de la habitabilidad de los edificios en Lorca post sismo. Para esta clasificación se ha adoptado el criterio recogido en diversas recomendaciones internacionales, la mayoría de las cuales se basan en la documentación generada por el ATC- Applied Technology Council, distinguiendo entre edificios habitables (no daño-daño no estructural) y edificios no habitables (daño estructural).

ABSTRACT

Currently, various earthquakes have made clear first, the importance of city planning and secondly, the great influence that has the behaviour of buildings as a consequence of the results of human and economic losses. Faced with the impossibility of avoiding the occurrence of earthquakes and predicting its with a small margin of time to take action in the short term, the reduction of the vulnerability of exposed elements is the most effective measure to prevent damage and to prevent the disaster.

There are several previous studies, Norman B. Green (1980), Teresa Guevara López (2009-2012) collecting criteria already widespread within the seismic bibliography and we can find some aspects from standard seismic precursor in this field (for example, the Peruvian) to initially establish urban - seismic principles.

In addition, several projects related to seismic risk, RisK-EU (2003), SERAMAR (Lars Abrahamczyk et al., 2013) have developed methodologies that classify the vulnerability of buildings taking into account modifiers for behaviours and irregular configurations in seismic terms.

This paper develops an empirical methodology to identify and characterize the irregular urban parameters seismically, graduate its relationship with the building damages after an earthquake and thus reduce the seismic vulnerability of cities.

The methodology developed in this thesis applies in the city of Lorca, Region of Murcia. Fieldwork where buildings are classified according to their structural type and its urban performance parameters. Through a statistical study the correlation with damage of buildings is analyzed after the earthquake of May 11, 2011. Previously a classification of the buildings has been made according to the kind of soil according to the Eurocodigo 8 (Navarro et al, 2012).

Finally, you get an estimate of the building habitability in Lorca. As a result, this classification adopted the criterion contained in various international recommendations, most of which are based on the documentation published by the ATC - Applied Technology Council, habitable buildings (not damage -damage non-structural) and non habitable buildings (structural damage).

**A mi ilusión diaria,
Miguel, Alejandra y Aitana**

y

**A los tres pilares de mi vida,
Jesús, Cecilia y Susana**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos directores: la Dra. María Belén Benito Oterino, que confió en mí y me dio la posibilidad de iniciar esta tesis y el Dr. Jaime Cervera Bravo por su gran dedicación y continuo apoyo durante el desarrollo de la misma. Muchas gracias a ambos por haberme asesorado, proporcionado información y corregido con detalle esta tesis, y en general por su paciencia conmigo.

De igual forma quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas e instituciones que colaboraron conmigo durante la tesis y que contribuyeron a la culminación de esta tesis doctoral, especialmente a:

- Mis compañeros del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, por su ayuda y su amistad. El trabajo diario con ellos hace más fácil nuestra andadura dentro de la Ingeniería Sísmica. Un agradecimiento especial para el Dr. Jorge Gaspar-Escribano, por el seguimiento de mi trabajo y su experto asesoramiento en la caracterización de la vulnerabilidad.
- Equipo “*T. Campo Lorca*”, Ligia, Oscar y Sara por hacer que esas jornadas en equipo de sol a sol en Lorca levantando datos de edificios fueran mucho más llevaderas.
- Sofía González López, Técnico Superior en Riesgos Naturales de la Unidad de Protección Civil de la Delegación del Gobierno de Murcia, por su amistad y su apoyo constante.
- La Dra. Teresa Guevara Pérez, en cuyo trabajo está inspirada esta Tesis Doctoral, por esas horas de trabajo a solas que me regaló para mejorar esta línea de investigación.
- María José Hernández, Técnico de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia y María García Martínez, Jefa de Servicio de Planeamiento y Gestión Urbanística del Ayuntamiento de Lorca, por su amabilidad y los documentos y datos que nos han proporcionado.
- Alejandro Salazar Ortuño y Francisco Martínez Moreno de SGE2.0, por los valiosos documentos facilitados sobre la evaluación rápida de daños tras el terremoto de Lorca de 2011.
- Los profesores y compañeros de la E.T.S.I. en Topografía, especialmente a Carmen Morillo Balsera, gran compañera y amiga, sus aportaciones han sido decisivas en los

resultados de esta Tesis Doctoral y a José Luis García Pallero, que siempre ha estado dispuesto a colaborar para superar los múltiples obstáculos.

No puedo dejar de mencionar a mis compañeros de la cuarta y tercera planta de la Escuela, por su apoyo y hacer de los encuentros en los pasillos un rato de desconexión, ameno y divertido. A la Dirección de la Escuela y del Departamento por su paciencia infinita conmigo. Y a mis compañeros de administración y servicios por estar siempre dispuesto a solucionar aquello que está en sus manos.

Finalmente, sobran las palabras de agradecimiento a mi familia. A Miguel, gracias por tu cariño, paciencia y apoyo incondicional. A mis hijas, Alejandra y Aitana, por conseguir sacarme una sonrisa todos los días que llegaba a casa cada vez más cansada. A mis padres, Jesús y Cecilia, de quienes me siento muy orgullosa, gracias por hacer que el camino diario que recorro sea mucho más llevadero. A mi hermana, Susana, gracias pequeña por estar siempre a mi lado. Y a Merche, que siempre que ha podido me ha ayudado.

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

1. INTRODUCCIÓN	1
PARTE I: MARCO TEÓRICO	
ESTADO DEL ARTE	
2. CONCEPTOS Y MÉTODOS EN INGENIERÍA SÍSMICA	19
3. PLANEAMIENTO URBANÍSTICO EN ZONAS SÍSMICAS	67
METODOLOGÍA	
4. LÍNEA METODOLÓGICA	73
PARTE II: APLICACIÓN	
5. ÁMBITO DE ACTUACIÓN. LA CIUDAD DE LORCA	107
6. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS	131
7. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS URBANÍSTICOS CORRELACIONADOS CON EL DAÑO: ANÁLISIS ESTADÍSTICO	147
PARTE III: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	
8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	187
ANEXOS	197
ANEXO I FICHAS DE EVALUACIÓN RÁPIDA DE DAÑOS USADAS EN EL TERREMOTO DEL 11 DE MAYO DE 2011 EN LORCA	199
ANEXO II. ESTUDIO EXPLORATORIO DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS. FRECUENCIAS, PORCENTAJES Y DIAGRAMAS DE BARRAS DE LOS DIFERENTES NIVELES	203
ANEXO III. CARTOGRAFÍA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS NIVELES DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO	213
ANEXO IV. CARTOGRAFÍA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS NIVELES DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS OBJETO DEL ESTUDIO ESTADÍSTICO	227
ANEXO V. TABLA CON ÍNDICE DE DISCRIMINACIÓN Y PROBABILIDAD DE LOS NIVELES DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS OBJETO DE ESTUDIO CON LOS DISTINTOS TIPOS DE DAÑO (BLANCO, VERDE, AMARILLO, ROJO Y NEGRO)	237
ANEXO VI. TABLA DE DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES DICOTOMIZADAS.....	241
ANEXO VII. GRÁFICAS DE TENDENCIA DE CADA NIVEL DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS OBJETO DE ESTUDIO SEGÚN SU TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA Y TIPO DE SUELO.....	249
REFERENCIAS	253

ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS	IX
LISTADO DE TABLAS	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Antecedentes	4
1.2.1 Iniciativas Internacionales	5
1.2.2 Iniciativas Nacionales en la Comunidad Autónoma de Murcia	9
1.2.3 Otros estudios	10
1.3 Objetivos de la tesis	13
1.4 Contenido de la memoria	15
 PARTE I – MARCO TEÓRICO	
<hr/>	
ESTADO DEL ARTE	
2. CONCEPTOS Y MÉTODOS EN INGENIERÍA SÍSMICA	19
2.1 Introducción	19
2.2 Conceptos inherentes al riesgo sísmico	20
2.2.1 Definición de riesgo sísmico	20
2.2.2 Peligrosidad sísmica	22
2.2.3 Vulnerabilidad	24
2.2.4 Daño sísmico: escalas y evaluación	25
2.3 Antecedentes de parámetros urbanísticos en la caracterización de la vulnerabilidad sísmica	28
2.3.1 Método del índice de vulnerabilidad	28
2.3.1.1 Análisis de parámetros relacionados con aspectos que pueden considerarse en normas urbanas	30
2.3.2 Método de la EMS-98	35
2.3.2.1 Factores que afectan a la vulnerabilidad de los edificios	35
2.3.3 Proyecto Risk-UE	37
2.3.3.1 Tipologías constructivas e índices de vulnerabilidad representativos	38
2.3.3.2 Clasificación, cuantificación y descripción de los modificadores por comportamiento	40

2.3.4	Desarrollos posteriores a Risk UE	45
o	Giovinnazzi (2005)	
o	Lantada (2007)	
o	Feriche (2012)	
2.3.5	Análisis comparativo de los distintos valores propuestos de modificadores por comportamiento en tipologías de mampostería no reforzada y hormigón armado	52
2.4	Normativa Sismorresistente NCSE-02	56
2.4.1	Concepción estructural de edificios	57
2.4.1.1	Configuraciones simétricas de elementos resistentes	58
2.4.1.2	Rigidez y continuidad de la estructura vertical	59
3.	PLANEAMIENTO URBANÍSTICO EN ZONAS SÍSMICAS.....	61
3.1	Introducción	61
3.2	Ordenación del Territorio	64
3.2.1	Geología superficial. Efecto local o de sitio	65
3.2.2	Caracterización del terreno en los Códigos Sísmicos	66
3.2.2.1	Clasificación del terreno según la NCSE-02	66
3.2.2.2	Clasificación del terreno según el EC8	67
3.3	Planeamiento Urbanístico	68
3.3.1	Plan General Municipal de Ordenación Urbana	69
3.3.1.1	Objetivos generales y específicos del Plan General	70
3.3.1.2	Determinaciones urbanísticas del Plan General	70
3.3.1.3	Contenido documental del Plan General. Normas Urbanísticas	71
METODOLOGÍA		
4.	LÍNEA METODOLÓGICA	73
4.1	Introducción	73
4.2	Evaluación de la vulnerabilidad	75
4.2.1	Parámetros urbanísticos irregulares desde una perspectiva antisísmica	75
4.2.1.1	Irregularidad geométrica en planta	75
a)	Propiedad geométrica de convexidad	
b)	Plantas triangulares	
c)	Propiedad geométrica de simetría	
d)	Propiedad geométrica de proporciones y dimensiones	

4.2.1.2 Irregularidad geométrica en alzado	80
a) Voladizos	
b) Base y Torre	
c) Escalonamiento	
4.2.1.3 El muro urbano	82
a) Diferencia de altura en los forjados de los edificios colindantes	
b) Efecto de medianería en centros históricos	
c) Diferencia de altura de los edificios colindantes	
d) Alineaciones	
e) La posición del edificio en la manzana	
4.2.1.4 Piso blando y débil	87
a) Piso blando o flexible	
b) Piso débil	
4.2.1.5 Efecto columna corta y cautiva	90
a) Columna cautiva	
b) Columna corta	
4.2.1.6 Tipología Edificatoria	92
4.3 Obtención y tratamiento de datos: SIG	94
4.3.1 Tratamiento de los datos	96
4.3.1.1 Datos de catastro	96
4.4 Estudio estadístico	98
4.4.1 Selección de la muestra	98
4.4.2 Metodología del estudio estadístico	99
4.4.2.1 Análisis estadístico	99
4.5 Análisis y presentación de resultados	103
 PARTE II – APLICACIÓN	
5. ÁMBITO DE ACTUACIÓN. LA CIUDAD DE LORCA.....	107
5.1 Introducción	107
5.2 Sismicidad en la zona	108
5.3 Tipos de suelo	110
5.4 Desarrollo Urbanístico de Lorca	112
5.4.1 El Territorio	112
5.4.2 La ciudad de Lorca	113
5.4.3 Plan General de Ordenación Urbana de Lorca	115

5.4.4	Normativa Urbanística	117
	a) Normas de Edificación y Ordenanzas	
	b) Normas complementarias para facilitar el realojo, la reconstrucción y reparación de inmuebles afectados, por acciones sísmicas y catastróficas	
5.5	Tipologías constructivas de Lorca	121
5.5.1	Matriz de tipologías constructivas	123
5.6	Descripción y evaluación de los daños del terremoto del 11 de mayo de 2011 en Lorca	125
5.6.1	Daño en elementos no estructurales	125
5.6.2	Daño en elementos estructurales	126
5.6.3	Evaluación de Daños	127
6.	CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS	131
6.1	Codificación y descripción de parámetros urbanísticos en Lorca	132
6.1.1	Relación entre la Norma de edificación y Ordenanzas de Lorca y los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente	134
6.2	Campañas de campo tras el sismo de Lorca 2011	135
6.3	Tratamiento y análisis de los datos en un Sistema de Información Geográfica	139
6.3.1	Análisis e interpretación de los datos: parámetros urbanísticos y tipologías constructivas	142
7.	IDENTIFICACION DE PARÁMETROS URBANÍSTICOS QUE CORRELACIONAN CON EL DAÑO: ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	147
7.1	Introducción	147
7.2	Muestra seleccionada	147
7.3	Análisis descriptivo de los parámetros urbanísticos	148
7.3.1	Forma geométrica en planta (FGP)	148
7.3.2	Forma geométrica en alzado (FGA)	148
7.3.3	Efecto golpeteo (EFG)	150
7.3.4	Diferencia de altura derecha (DAD)	151
7.3.5	Diferencia de altura izquierda (DAI)	151
7.3.6	Piso blando blando/flexible (PBF)	152
7.3.7	Efecto Columna Corta (ECC)	152
7.3.8	Tipología Edificatoria (TED)	153
7.3.9	Posición del edificio en la manzana (PEM)	154
7.3.10	Alineaciones (ALI)	154
7.3.11	Posición en elevación (PEL)	155
7.3.12	Morfología del terreno	156

7.3.13	Altura (ALT)	157
7.4	Definición y operacionalización de variables	156
7.5	Análisis estadístico	160
7.5.1	Análisis de los parámetros urbanísticos y el daño	161
7.5.2	Metodología aplicada del análisis estadístico	166
7.6	Tablas de resultados	168
7.7	Representación de los resultados	176
7.8	Simulación de daños	181
PARTE III – CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS		
<hr/>		
8.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	187
8.1	Introducción	187
8.2	Conclusiones	188
8.2.1	Alcance de los objetivos específicos	188
8.2.2	Alcance de los objetivos específicos de aplicación a la ciudad de Lorca	189
8.2.3	Alcance del objetivo general	192
8.3	Líneas Futuras	193
ANEXOS		197
REFERENCIAS		253

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1	Marco teórico del enfoque holístico de evaluación y gestión del riesgo de desastres (Cardona y Barbat, 2000b).....	21
Figura 2.2	Esquema de la metodología del índice de vulnerabilidad y de las propuestas que desarrollan esta metodología	29
Figura 2.3	Parámetro evaluador de la configuración en planta según el método del índice de vulnerabilidad en los edificios de mampostería no reforzada (GNDT 1986).....	31
Figura 2.4	Parámetro evaluador de la configuración en planta según el método del índice de vulnerabilidad en los edificios de hormigón armado (GNDT 1986).....	32
Figura 2.5	Parámetro evaluador de la configuración en elevación según el método del índice de vulnerabilidad en los edificios de hormigón armado (GNDT 1986).....	33
Figura 2.6	Distintos casos de variación de la rigidez lateral de un edificio con sus alturas (Barbat,1998).....	33
Figura 2.7	Descripción del modificador irregularidad vertical en los edificios (FEMA 154).....	43
Figura 2.8	Imagen. Ejemplo de retranqueos y piso blando (FEMA 154)	44
Figura 2.9	Ejemplo de plantas irregulares. Las flechas indican donde se produce el daño (FEMA154)	44
Figura 2.10	Diferencia de alturas en las subparcelas de un edificio a) vista en planta b) vista en 3D. Tesis Lantana (2007)	48
Figura 2.11	Modificadores M_{hf} , en función del número de plantas de los edificios adyacentes. Tesis Lantana (2007)	49
Figura 2.12	Modificadores en función de la posición dentro de la manzana y esquema de los modificadores asignados a las parcelas de una manzana. Tesis Lantana (2007)	50
Figura 2.13	Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de mampostería (Risk-UE 2003, Giovinnazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012)	53
Figura 2.14A	Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de hormigón armado (Risk-UE 2003, Giovinnazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012)	54
Figura 2.14B	Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de hormigón armado (Risk-UE 2003, Giovinnazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012)	55
Figura 2.15	Configuraciones irregulares en planta (guía para la definición de una estrategia antisísmica en el proyecto de edificios de nueva planta, 2012)	58
Figura 2.16	Falta de continuidad en la estructura vertical y cambios de rigidez (guía para la definición de una estrategia antisísmica en el proyecto de edificios de nueva planta, 2012)	59
Figura 3.1	Takahisa Enomoto. Daños en un complejo residencial en Dali, Taiwan, debido al sismo de Chi-Chi del 21 de septiembre de 1999 (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, 2012)	62

Figura 3.2	Cuadro de tipos de planes (Manual de planeamiento Urbanístico, 1998)	69
Figura 4.1	Unidades constructivas con áreas entrantes (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	76
Figura 4.2	Fractura entre ambos cuerpos dirección del movimiento N-S (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas Guevara Pérez, 2012)	76
Figura 4.3	Matriz Grupo I y Grupo II. Modificado (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	78
Figura 4.4	Excentricidad por diferencia de centros de masa y rigidez (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	79
Figura 4.5	Esquema base y torre (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	81
Figura 4.6	Edificación tradicional adosada a edificación moderna, Lorca 2012	83
Figura 4.7	a) Diferencia de altura entre los forjados de dos edificaciones contiguas (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012) y b) foto de la ciudad de Lorca	83
Figura 4.8	El eje medio del muro estructural definía el límite de las propiedades (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012) .	84
Figura 4.9	Efectos del terremoto de Lorca en las edificaciones (M. Feriche et al., 2012)	85
Figura 4.10	Posición del edificio en la manzana	86
Figura 4.11	Distribución asimétrica de la rigidez perimetral (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	86
Figura 4.12	Piso blando en planta baja u piso blando en planta intermedia (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	88
Figura 4.13	a) Planta baja sin paredes rígidas, b) planta baja con aberturas distintas a las otras plantas y c) planta baja con menos paredes y más pequeñas que las otras plantas (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012) .	89
Figura 4.14	Deformación lateral de un edificio con una distribución homogénea de las paredes en altura y con planta baja sin cerramientos o libre (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	89
Figura 4.15	Daño en columnas cautivas en un sismo (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	91
Figura 4.16	Imágenes ilustrativas de un semisótano en Lorca que presenta columna cautiva. Interior y exterior	91
Figura 4.17	Localización de columnas corta en las edificaciones (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)	92
Figura 4.18	Ficha sobre características de la edificación que afectan a la vulnerabilidad sísmica para crear base de datos en la edificación	95
Figura 4.19	Aspecto del fichero .CAT exportado a Excel	97
Figura 4.20	Tabla resultante de unir el archivo .dbf y el .CAT.....	98
Figura 5.1	a) Ubicación de España con respecto a las placas Euroasiática y Africana. b) representación de todos los epicentros contenidos en el catálogo sísmico del IGN hasta junio de 2011	108

Figura 5.2	Mapa de Peligrosidad Sísmica de España. Valores de PGA en (g). Periodo de retorno 475 años. (IGN)	110
Figura 5.3	Clasificación del suelo de la ciudad de Lorca según la distribución de valores Vs30 que propone el Eurocódigo EC8 (Navarro et al., 2012)	111
Figura 5.4	Ubicación del Municipio de Lorca en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia	112
Figura 5.5	Evolución urbana de Lorca. Fotos áreas de la ciudad de Lorca, 1946, 1981 y 2012 ...	113
Figura 5.6	Clases de suelo de Lorca y ejes que configuran el trazado urbano de la ciudad	114
Figura 5.7	Vista del entorno de Lorca tomada desde el Castillo	115
Figura 5.8	Mapa que muestra la distribución de los efectos del terremoto de Lorca. La línea roja es la traza de la Falla de Alhama de Murcia. Los puntos amarillos y naranjas son las réplicas producidas por el terremoto principal que se marca con el punto rojo de mayor tamaño, según datos del Instituto Andaluz de Geofísica. Los pequeños polígonos de colores rojos y amarillos representan los edificios que sufrieron daños estructurales (según datos de la Comunidad Autónoma de Murcia) (José J. Martínez Díaz, 2012)	116
Figura 5.9	Vista de la edificación en el casco antiguo de Lorca	121
Figura 5.10	Convivencia entre tipología edificatoria tradicional y tipología edificatoria actual	122
Figura 5.11	Esquema codificado de las Tipologías Constructivas y sus respectivos niveles	124
Figura 5.12	Escombros sobre las aceras tras el terremoto de Lorca de 2011	125
Figura 5.13	Daño en los edificios en planta baja tras el terremoto de Lorca de 2011	126
Figura 5.14	Daño en los edificios en el terremoto de Lorca	128
Figura 5.15	Habitabilidad de los edificios tras el terremoto de Lorca	130
Figura 6.1	Esquema codificado de los Parámetros Urbanísticos irregulares sísmicamente y sus respectivos niveles	133
Figura 6.2	Situación de las edificaciones de las tres zonas seleccionadas en Lorca (Barrio de San Diego, Barrio de Santiago y barrios Altos y Barrio de la Viña)	137
Figura 6.3	Cartografías usadas para la toma de datos en el trabajo de campo de la Zona (Barrio de San Diego) y la Zona 3 (Barrio de la Viña)	138
Figura 6.4	a) Aspecto de la ficha en formato papel y b) de la tabla diseñada en Excel para la toma de datos en las salidas de campo	139
Figura 6.5	Manzana de un edificio de la Zona 1 (Barrio de San Diego) antes y después del tratamiento de depuración de las Unidades Constructivas	140
Figura 6.6	Ubicación de los edificios de mampostería y de hormigón armado en las zonas de estudio (Barrio de San Diego, Barrio de Santiago, Barrios Altos y Barrio de la Viña)	146
Figura 7.1	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma geométrica en planta	149
Figura 7.2	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma	150

	geométrica en alzado	
Figura 7.3	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto golpeteo	150
Figura 7.4	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la derecha	151
Figura 7.5	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la izquierda	151
Figura 7.6	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico piso blando/flexible	152
Figura 7.7	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto columna corta	153
Figura 7.8	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico tipología edificatoria	154
Figura 7.9	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición del edificio en la manzana	154
Figura 7.10	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico alineación ...	155
Figura 7.11	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición en elevación	155
Figura 7.12	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico morfología del terreno	156
Figura 7.13	Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico altura de los edificios	156
Figura 7.14	Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo B	162
Figura 7.15	Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de mampostería en el tipo de suelo B	163
Figura 7.16	Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo C	164
Figura 7.17	Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de mampostería en el tipo de suelo C	165
Figura 7.18	Representación gráfica del índice de discriminación de los niveles de los parámetros urbanísticos para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo B	167
Figura 7.19	Representación gráfica del índice de discriminación de los niveles de los parámetros urbanísticos para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo C	167
Figura 7.20	Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de mampostería y de hormigón armado para el tipo de suelo B	177
Figura 7.21	Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de mampostería y de hormigón armado para el tipo de suelo B	177

Figura 7.22	Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de hormigón armado para el tipo de suelo B y C	178
Figura 7.23	Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de mampostería para el tipo de suelo B y C	178
Figura 7.24	Escala de Habitabilidad. Índice de Habitabilidad	179
Figura 7.25	Escala de Habitabilidad de los niveles de los parámetros urbanísticos en el tipo de suelo B para la tipología de mampostería y hormigón armado	180
Figura 7.26	Escala de Habitabilidad de los niveles de los parámetros urbanísticos en el tipo de suelo B para la tipología de mampostería y hormigón armado	181
Figura 7.27	Tabla con las tipologías de edificios habitables e inhabitables si ocurriera en Lorca un terremoto con las mismas características que el de mayo de 2011 con una probabilidad del 65%	182
Figura 7.28	Cartografía con los edificios habitables e inhabitables si ocurriera en Lorca un terremoto con las mismas características que el de mayo de 2011 con una probabilidad del 65%.....	183

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1	Grados de daño de las metodologías de Risk-UE y Hazus (Risk-UE 2003)	26
Tabla 2.2	Escala numérica del índice de vulnerabilidad de Benedetti y Petrini 1984 a) edificios de mampostería no reforzada y b) edificios de hormigón armado	30
Tabla 2.3	Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)	39
Tabla 2.4	Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad Iv para edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)	41
Tabla 2.5	Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad Iv para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)	42
Tabla 2.6	Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Giovinazzi, 2005)	45
Tabla 2.7	Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Lantada, 2007)	46
Tabla 2.8	Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Feriche, 2012)	50
Tabla 3.1	Clasificación del terreno propuesto por la NCSE-02	66
Tabla 3.2	Clasificación del terreno propuesto por el EC8	67
Tabla 5.1	Tipologías constructivas existentes en Lorca y relación con el proyecto Risk-UE	124
Tabla 5.2	Clasificación de edificios por niveles de seguridad tras la evaluación del daño. Clasificación de Habitabilidad	130
Tabla 6.1A	Relación entre los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente y objeto de estudio y las Ordenanzas Municipales del PGOU de Lorca (Tipología, Uso y Parcelación)	134
Tabla 6.1B	Relación entre los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente y objeto de estudio y las Ordenanzas Municipales del PGOU de Lorca (Volumen, Condiciones de Volumen y Condiciones Estéticas)	135
Tabla 7.1	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma geométrica en planta	149
Tabla 7.2	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma geométrica en alzado.....	150
Tabla 7.3	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto golpeteo	150
Tabla 7.4	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la derecha	151
Tabla 7.5	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la izquierda	151
Tabla 7.6	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico piso blando/flexible	152

Tabla 7.7	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto columna corta	153
Tabla 7.8	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico tipología edificatoria	153
Tabla 7.9	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición del edificio en la manzana	154
Tabla 7.10	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico alineación	155
Tabla 7.11	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición en elevación	155
Tabla 7.12	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico morfología del terreno	156
Tabla 7.13	Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico altura de los edificios	156
Tabla 7.14	Definición y operacionalidad de variables dependientes e independientes	157
Tabla 7.15	Frecuencias y porcentajes del grado de daño de los edificios tras el terremoto del 11 de mayo de 2011 en Lorca	158
Tabla 7.16	Frecuencias y porcentajes del tipo de suelo según el Eurocódigo8 sobre el que se asientan la muestra de edificios objeto de estudio en Lorca	159
Tabla 7.17	Tabla de contingencia con las frecuencias y porcentajes de la relación del tipo de suelo según el Eurocódigo8 sobre el que se asientan la muestra de edificios objeto de estudio en Lorca y su daño en el terremoto de 2011	159
Tabla 7.18	Tabla de contingencia en el Tipo de suelo B con las frecuencias y porcentajes que relacionan la tipología constructiva de los edificios objeto de estudio y su daño en el terremoto de 2011	160
Tabla 7.19	Tabla de contingencia en el Tipo de suelo C con las frecuencias y porcentajes que relacionan la tipología constructiva de los edificios objeto de estudio y su daño en el terremoto de 2011	160

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En enero de 2005, durante la conferencia mundial sobre la reducción de desastres, Kofi Annan señaló que “no podemos evitar calamidades naturales, pero sí debemos equipar a las personas y a las comunidades para que puedan resistirlas” (EIRD, 2005).

La incidencia de los desastres naturales va en aumento (Mc Entire, 1999), pero los fenómenos naturales no causarían daño si fuéramos capaces de entender cómo funciona la naturaleza y crear nuestro hábitat acorde a ella (Romeo G. y Maskrey A, 1993). Nos encontramos por tanto ante el reto de paliar esos desastres actuando en dos direcciones concretas: aumento del conocimiento sobre el fenómeno natural y adaptación de la sociedad para resistirlo.

Los terremotos son el resultado de fuerzas naturales originadas por la liberación de energía en el proceso de evolución permanente del planeta. Hoy en día, el nivel de conocimiento acerca del fenómeno sísmico ha avanzado notablemente: se conocen los mecanismos de generación, los lugares donde han ocurrido sismos en el pasado y la intensidad y/o magnitud de los mismos, lo que permite disponer de mapas de sismicidad prácticamente en todo el mundo, las fallas geológicas capaces de generar nuevos eventos, etc. Esas fallas se pueden monitorizar, obteniendo datos sobre

las velocidades y deformaciones acumuladas, que permiten llegar a conocer las zonas donde con mayor probabilidad pueden producirse nuevos sismos e incluso su magnitud. Sin embargo, es aún difícil determinar cuando van a tener lugar esos sismos, lo que hace que la predicción en escalas temporales cortas sea aún un problema a resolver. Por ello, en su lugar, actualmente se incide más en una línea de prevención, fundamentada esencialmente en el diseño sismorresistente de las edificaciones, ante los movimientos esperados a largo plazo., incluyendo en los casos más avanzados, el diseño con aislamiento de base.

Actualmente, diversos terremotos han puesto de manifiesto la importancia de planificar las ciudades y la gran influencia que tiene el comportamiento de los edificios como consecuencia de los resultados de pérdidas humanas y económicas. Ejemplos de estos, son el terremoto ocurrido en enero de 2010 en Haití, con más de 300.000 mil víctimas y más de 1,5 millones de personas sin hogar. El coste casi una cuarta parte de las viviendas en Puerto Príncipe resultaron totalmente destruidas por el terremoto, el costo de reconstruir casas, escuelas, calles y demás infraestructuras fué valorado en cerca de 14.000 millones de dólares, o el de Tohoku en Japón en marzo de 2011, con su posterior tsunami, con 15.000 muertos, 45.700 construcciones destruidas y 144.300 dañadas, los costos de los daños ascienden a diez billones de dólares. Ante la imposibilidad de evitar la ocurrencia de terremotos y de predecirlos con un margen pequeño de tiempo para tomar acciones a corto plazo, la reducción de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, es la medida más eficaz para prevenir los daños y para evitar el desastre.

Al hablar de vulnerabilidad podemos referirnos a estructuras concretas, cuyo comportamiento se evalúa individualmente, o bien al conjunto de una ciudad o población, contemplando las interacciones entre diferentes elementos. El concepto de vulnerabilidad sísmica de una ciudad se refiere al grado de debilidad o incapacidad de dar respuesta adecuada y de resiliencia que pudieran presentar el conjunto de componentes de dicha ciudad al exponerse a los movimientos sísmicos que probablemente le afectarán durante su vida.

Dentro de la Ingeniería Sísmica, podemos encontrar numerosas y variadas metodologías y técnicas propuestas por diferentes autores para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, basadas principalmente en el estudio del desempeño sísmico de las edificaciones según su estructura y construcción. Entre estas metodologías destacan los métodos empíricos y los métodos analíticos o teóricos.

Los métodos empíricos están basados en la experiencia sobre el comportamiento de tipos de edificaciones durante sismos y la caracterización de deficiencias sísmicas potenciales. En estos métodos, se asignan clases de vulnerabilidad a cada tipología constructiva, en una cierta escala que puede ser cualitativa o numérica. Un ejemplo de la primera es la clasificación de vulnerabilidad propuesta en la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1998), según la cual se adoptan

clases de la A (más vulnerable) a la F (menos vulnerable), atendiendo a la experiencia sobre el desempeño sísmico que han tenido estructuras similares ante terremotos relevantes. Otro ejemplo de valoración cuantitativa es la basada en el índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984; Yopez, 1996), según el cual se asigna un índice numérico a cada edificación tras su inspección, identificando deficiencias sísmicas potenciales y caracterizando de las mismas atribuyendo un valor a cada componente del sistema, que ponderado en función de su importancia relativa, conduce a la determinación final de un índice de vulnerabilidad.

Los métodos analíticos en cambio, evalúan la resistencia de las estructuras a los movimientos del terreno utilizando como base modelos mecánicos de respuesta estructural e involucrando como datos las características mecánicas de las estructuras. Generalmente son bastantes laboriosos y dependen en cierta medida del grado de sofisticación de la evaluación, de la calidad de la información y de la representatividad de los modelos empleados. Un ejemplo de esta metodología es la desarrollada en el proyecto Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003), que es un proyecto europeo, para evaluar la vulnerabilidad y la fragilidad de los edificios residenciales de la ciudad. Otro ejemplos son la metodología incluida en el programa HAZUS (FEMA/NIBS, 1999) aplicable a Estados Unidos, desarrollado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA), junto con el National Institute of Buildings Sciences, NIBS (NIBS, 2000), el programa EQRM (Robinson et al., 2006) y SELENA (Molina et. al., 2010).

Todas estas metodologías están pensadas para evaluar la vulnerabilidad de cada edificio o conjunto de edificios semejantes considerando cada uno de ellos de forma aislada. En el proyecto Risk-UE también se puede asignar un índice de vulnerabilidad a grupos de edificios cuya composición sólo se conoce de forma estadística, este caso se usa en ciudades en las que la información sobre las características tipológicas de los edificios individuales es escasa, parcial o incompleta y se estima la distribución global de edificios estableciendo categorías cuya composición estadística se suele estimar a partir de muestreos en zonas representativas de la ciudad.

El objetivo de esta tesis doctoral, es analizar y extender estas metodologías y procedimientos basados en tipologías constructivas para poder caracterizar y graduar los parámetros urbanísticos (aquellos que están regulados en las Normas Urbanísticas de un Plan General de Ordenación Urbana) que hacen que las ciudades sean más o menos vulnerables sísmicamente. Se pretende evaluar los modificadores urbanísticos que pueden aumentar o disminuir la vulnerabilidad de los edificios, no analizando los edificios individualmente, sino dentro del planeamiento urbanístico de desarrollo en el que se encuentran. Los planes generales de ordenación urbana en zonas de riesgo sísmico deberían tener en cuenta estos parámetros urbanísticos, adecuarlos a sus ordenanzas y redactar normas urbanísticas-sísmicas.

Algunas de estas metodologías mencionadas tienen en cuenta modificadores urbanísticos. En el proyecto del índice de vulnerabilidad de Benedetti y Petrini, se da un valor a la configuración en planta y elevación de las edificaciones y en el proyecto Risk UE existen modificadores del índice de vulnerabilidad en función de la regularidad de la planta del edificio y la posición de la edificación (terminal, esquina e intermedio).

También, en el libro “Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas” (Universidad Central de Venezuela, Caracas, Marzo 2012), la arquitecta Teresa Guevara analiza la vulnerabilidad sísmica de la ciudad contemporánea. Realiza un estudio de las configuraciones urbanas y arquitectónicas que influyen en la generación de vulnerabilidad en la ciudad contemporánea y en el comportamiento sismorresistente de los edificios. Identifica los siguientes parámetros urbanísticos como generadores de esta vulnerabilidad urbana: el edificio singular colindante con edificaciones, la irregularidad geométrica en alzado, la irregularidad geométrica en planta, el piso blando y el piso débil, la columna cautiva y la columna corta, el muro urbano.....). Guevara pone de manifiesto la importancia de estos parámetros, que pueden aumentar o disminuir la vulnerabilidad de las ciudades, tras el estudio del comportamiento de conjuntos de edificaciones en terremotos recientes.

En la metodología de investigación de esta tesis doctoral podemos encontrar primero un análisis de la vulnerabilidad estructural de las edificaciones siguiendo la metodología del proyecto Risk-UE y posteriormente una caracterización de los parámetros urbanísticos relevantes en el daño sísmico. Una vez identificados y caracterizados estos parámetros urbanísticos, se estudia la mayor o menor relación que pueden tener con el daño producido en las edificaciones tras un terremoto. Se estudian los daños producidos en el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Los métodos y técnicas puestas a punto durante la realización de la tesis se describen y se aplican a la ciudad de Lorca. Con los resultados obtenidos se pretende poder incidir en las Normas Urbanísticas de los Planes Generales de Ordenación Urbana de las ciudades que se encuentran en zonas sísmicas. Si se incide en zonas sísmicas sobre esta normativa urbanística, se reducirá la vulnerabilidad sísmica de las ciudades y se ayudará a los organismos oficiales locales, regionales y estatales a la planificación de una respuesta ante la emergencia y recuperación de cara a posibles terremotos futuros.

1.2 ANTECEDENTES

No hay una única metodología para reducir la vulnerabilidad de los edificios y el procedimiento o parámetros utilizados para la evaluación también varían. El resultado de un estudio de vulnerabilidad sísmica siempre es la descripción global del daño que experimenta una estructura de una tipología dada, sometida a la acción de un sismo de un cierto nivel de fuerza y caracterizado por diferentes parámetros (Barbat, 1998). Lo característico de cada metodología son los objetivos planteados para el estudio, las hipótesis empleadas y por supuesto la información que necesite la metodología. Existen múltiples formas para evaluar la vulnerabilidad. Corsanego (1991) clasifica, describe y discute los principales métodos existentes. En este apartado se describen brevemente

algunas iniciativas y proyectos relevantes de ámbito internacional. Por otra parte, existe un marco legal vigente en España, la directriz básica de protección civil ante el riesgo sísmico, (resolución del 5 de mayo de 1995 de la Secretaría de Estado de Interior – BOE, 1995), que obliga a las comunidades y ciudades de España a realizar estimaciones del riesgo y, en su caso, a formalizar planes de emergencia sísmica. Se describen también aquí, algunos estudios previos sobre el riesgo sísmico en la Región de Murcia.

1.2.1 Iniciativas Internacionales

A pesar de la importancia que tiene la ordenación del territorio y el planeamiento urbanístico en zonas de riesgo sísmico, los parámetros urbanísticos que afectan a la vulnerabilidad de las edificaciones no han sido objeto de especial atención por parte de los investigadores. Todos los estudios e iniciativas conocidos internacionalmente, realizan un estudio exhaustivo sobre el comportamiento estructural y constructivo de las edificaciones, considerando el edificio como un elemento individual de la ciudad. Sin embargo, algunas iniciativas internacionales como el índice de vulnerabilidad italiano, la EMS-98 y el proyecto Risk-UE, conscientes de la importancia de este hecho, han ponderado parámetros urbanísticos, aumentando o disminuyendo de esta manera la vulnerabilidad final del edificio. A continuación se comentan brevemente estas iniciativas internacionales.

ATC

El Consejo de Tecnología aplicada (Applied Technology Council) es una sociedad no lucrativa que tiene su sede en California, cuyo objetivo es asesorar y asistir a profesionales en el campo de la ingeniería civil y la arquitectura. Por encargo de la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA), elaboró dos informes referenciados como ATC-13 (1985) y ATC-25 (1991) para el análisis del riesgo sísmico. El informe ATC-13, “Earthquake Damage evaluation data for California” forma parte de un proyecto para evaluar daños sísmicos causados por terremotos en California. El informe incluye un total de 78 matrices de probabilidad de daño correspondientes a diferentes tipos de instalaciones y servicios (Facility Classes FC), 40 de los cuales corresponden a edificios y las restantes 38 a otras estructuras o infraestructuras. El informe ATC-25 “Seismic Vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States” analiza el daño y el impacto de la interrupción de las líneas vitales por causa de los terremotos. En este segundo informe se actualizan y generalizan las matrices y funciones que permiten estimar el daño en estructuras e infraestructuras vitales. Esta metodología dispone de herramientas que permiten evaluar, de forma rápida y eficiente, el daño esperado en la casi totalidad de las infraestructuras. Las funciones del informe ATC-13 han sido obtenidas para la región californiana. La intención del informe ATC-25 es que sea aplicable a cualquier zona de Estados Unidos dando también recomendaciones para su aplicación y proponiendo penalizaciones. Por ello, la aplicación de esta metodología a una zona distinta de Estados Unidos requiere un

análisis cuidadoso y experto que permita su adaptación, cuantificando de forma adecuada las penalizaciones correspondientes.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD ITALIANO

Este método Italiano fue el primer método en utilizar un índice de vulnerabilidad para evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones. En 1982 un grupo de investigadores italianos desarrolló una metodología denominada *metodología del índice de vulnerabilidad* a partir de la información de daño en edificios provocados por terremotos desde 1976, después del terremoto de Friuli. A partir de esta información se elaboró una gran base de datos con el índice de vulnerabilidad de cada tipo de edificio y el daño sufrido por terremotos de determinada intensidad. En dichos estudios empezaron a utilizarse formularios de inspección de daños, que fueron luego mejorados con ocasión del terremoto de Irpinia de 1980, y que son la base de los que se utilizan hoy en día.

Esta metodología está fundamentada en datos reales y se puede aplicar en estudios a nivel urbano. Se tiene la experiencia de haberse aplicado en diferentes ciudades de Italia con buenos resultados y como consecuencia se adoptó oficialmente por un organismo gubernamental de protección civil (Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti, GNDT). En 1982 el método fue adoptado por el GNDT para su utilización en la evaluación del riesgo sísmico en edificios. En España, esta metodología se ha aplicado en los sismos de Almería en 1993 y 1994 (Yépez, 1994) y Murcia en 1999 (Mena, et al 1999). En general se ha usado en numerosos trabajos como los de Angeletti et al, 1988; Benedetti et al, 1988; Caicedo, 1993; Barbat et al, 1996; Grimaz, 1994; Yépez, 1996; Mena, 1997a; Pujades et al., 2000; Mena, 2002; el proyecto Europeo SERGISAI, (Cella et al., 1998) o en Mérida, Venezuela (Castillo, 2005).

El método del índice de vulnerabilidad utiliza los datos obtenidos mediante inspección para realizar una calificación de la calidad del diseño y construcción sismorresistente de los edificios mediante un coeficiente denominado índice de vulnerabilidad. La operación de calificación consiste en hacer una valoración de once parámetros estructurales preestablecidos por expertos y calcular, a partir de estos valores, el índice de vulnerabilidad; la valoración de alguno de estos parámetros se apoya también en el daño que sufre la estructura, a través de funciones de vulnerabilidad para cada grado de intensidad macrosísmica del terremoto o para diferentes niveles de aceleración máxima.

El método analiza de forma separada estructuras de mampostería no reforzada y estructuras de hormigón armado. En ambos análisis, dentro de los parámetros que evalúa, se encuentran los parámetros urbanísticos configuración en planta y configuración en elevación. El parámetro de configuración en elevación tiene un peso mayor, a la hora de clasificar la vulnerabilidad del edificio, que el de configuración en planta.

EMS-98

La escala de intensidades EMS-98 es una actualización de la escala MSK-64 y, en referencia a los

edificios, quizás la aportación más novedosa es la inclusión de un mayor número de tipologías constructivas. Edificios de diferentes tipos pueden presentar daños similares.

La escala de intensidad EMS-98, al igual que la escala MSK que la precedía, pertenece a una familia de escalas de intensidad cuyo origen fue la popular escala de diez grados elaborada por Rossi y Forel; esta fue revisada por Mercalli, posteriormente expandida a doce grados por Cancani, y después definida en una fórmula muy completa por Sieberg como la escala Mercalli - Cancani-Sieberg (MCS). Esta es la escala que sirve de punto de partida no solamente para la escala MSK/EMS-98 sino también para numerosas versiones de la escala "Mercalli Modificada". La mayoría de estas escalas de doce grados son aproximadamente equivalentes en sus valores actuales, y sólo se diferencian en el grado de sofisticación empleado para su formulación.

La palabra "vulnerabilidad" se usa a lo largo de la Escala Macrosísmica Europea para expresar las diferencias en la forma en la que responden los edificios a las vibraciones ocasionadas por terremotos. Si dos grupos de edificios son sometidos exactamente a la misma vibración ocasionada por un terremoto y un grupo responde mejor que el otro, se puede decir que los edificios menos dañados poseen una menor vulnerabilidad sísmica que los edificios más dañados, o que los edificios menos dañados eran más sismorresistentes que los otros y viceversa.

En la EMS hay seis clases de vulnerabilidad decreciente (A-F) en función del tipo de construcción, de las cuales las primeras tres representan la resistencia de una vivienda "típica" de adobe, una construcción de ladrillos y una estructura de hormigón armado (HA), que deberían ser compatibles con las clases de edificios A-C en la escala MSK-64. Las clases D y E pretenden representar descensos aproximadamente lineales en la vulnerabilidad como resultado de mejores diseños sismorresistentes (DSR), y también acomodar los casos de construcciones de madera bien construidas, mampostería reforzada o confinada, y estructuras de acero, de las cuales se conoce su resistencia a las vibraciones ocasionadas por terremotos. Con la clase F se pretende representar la vulnerabilidad de una estructura con un nivel alto de diseño sismorresistente, esto es, una estructura con la más alta resistencia a terremotos gracias a la incorporación de principios de diseño.

La EMS-98 enumera además siete factores que afectan a la vulnerabilidad de una estructura junto con el tipo de construcción (calidad y fabricación, estado de preservación, regularidad, ductilidad, localización, refuerzo y diseño sismorresistente). Los dos factores de la EMS-98 que pueden ser regulados en la normativa urbanística de las ciudades son la regularidad de las características del edificio, introduce los parámetros de piso débil y columna cautiva y la localización de un edificio con respecto a los otros vecinos. La EMS-98 no cuantifica como el ATC, el método del índice italiano o el proyecto Risk-UE estos factores, solo indica que en función del conocimiento de los expertos, la acumulación de fortalezas o debilidades pueden hacer variar la clasificación de vulnerabilidad inicial según el tipo de construcción dentro del rango más probable y si tiene muchas fortalezas o

debilidades, fortalezas que son particularmente notables o debilidades muy severas dentro del rango de casos excepcionales, menos probables.

HAZUS

El programa HAZUS fue desarrollado en los Estados Unidos en 1999 para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las ciudades empleando el método del espectro de capacidad. Actualmente es una de las metodologías más conocidas y utilizadas para el análisis de la vulnerabilidad sísmica. Esta utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de la acción sísmica, en vez de la intensidad sísmica que se utiliza en la ATC-13. Se realiza una clasificación de 36 tipologías de edificios según su estructura, y el daño de estos 36 modelos estructurales se estima a partir de la opinión de expertos. Para cada modelo, se describen los cuatro estados de daño estructural considerados: leve, moderado, severo y colapso. Los daños no estructurales se analizarán aparte. Para cada tipo de construcción y nivel de diseño, se dan los parámetros que permiten definir la capacidad de la estructura, las derivas máximas entre piso y finalmente los desplazamientos espectrales en los umbrales de los diferentes estados de daño considerados.

RISK-UE

El principal objetivo del proyecto Risk-UE (Risk-UE, 2003; Mouroux et al., 2004) era proponer métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico que permitieran incorporar las características de los edificios, del patrimonio cultural y de las sociedades urbanas típicas de Europa. Los países europeos participantes en el proyecto Risk-UE fueron: Bulgaria, Grecia, Francia, Italia, Antigua República Yugoslava de Macedonia, Rumania y España. La organización modular del proyecto comprendió siete módulos de trabajo o workpackages (WP). El WP4, estudio de vulnerabilidad de los edificios actuales, evalúa la vulnerabilidad de un edificio mediante dos metodologías. La primera metodología se basa en el método del índice de vulnerabilidad y la segunda en espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

La metodología del índice de vulnerabilidad, llamada también en Risk-UE de Nivel I, clasifica el parque constructivo de la ciudad en clases de vulnerabilidad, para después realizar un análisis de vulnerabilidad de cada edificio individual. Abarca en un sólo índice un gran número de parámetros entre los que destacan los urbanísticos regularidad en planta y posición del edificio en la parcela. La acción sísmica la cuantifica por medio de la intensidad macrosísmica y el edificio por medio de un índice.

El método del espectro de capacidad, llamado también en Risk-UE de Nivel II, requiere la obtención del espectro de capacidad y curvas de fragilidad específicas para los edificios analizados. La acción sísmica se considera en términos de espectros de respuesta inelástica o espectros de demanda y caracteriza el edificio mediante su espectro de capacidad (MEC), que en aproximación

bilineal se expresa por medio de dos puntos denominados punto de cedencia y punto de capacidad última.

1.2.2 Iniciativas Nacionales en la Comunidad Autónoma de Murcia

Los dos estudios más importantes de riesgo sísmico desarrollados en la Región de Murcia han sido RISMUR y SISMIMUR. Para la elaboración del SISMIMUR, fue fundamental la elaboración del proyecto RISMUR, el cual fue encargado y financiado por el Instituto Geográfico Nacional junto con la Dirección General de Protección Civil de la Región de Murcia. RISMUR fue el estudio base para definir el plan SISMIMUR. El proyecto RISMUR fue desarrollado por un equipo multidisciplinar, reuniendo especialistas de todas las materias implicadas en el cálculo del riesgo sísmico, como son: sismología, arquitectura y vulnerabilidad sísmica, geotecnia, geología, tectónica e ingeniería sísmica. Se crearon cuatro grupos de trabajo, con sus respectivas competencias asignadas y dirigidos desde la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Topográfica, Geodesia y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Madrid (volumen 1: evaluación de la peligrosidad sísmica y volumen 5: evaluación del riesgo sísmico), en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (volumen 2: caracterización geotécnica y volumen 4: transferencia de esfuerzos de coulomb) y por Patrick Murphy, arquitecto especializado en vulnerabilidad sísmica (volumen 3: vulnerabilidad sísmica).

Respecto a la asignación de la vulnerabilidad (volumen 3), se clasifica el parque inmobiliario de la Región de Murcia de acuerdo a las clases de vulnerabilidad de la EMS-98. La clasificación de la vulnerabilidad se basa en las tipologías constructivas de las edificaciones, el año de construcción y la calidad en la construcción. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos.

RISMUR

El Proyecto de “Riesgo Sísmico de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia” (RISMUR, 2006), constituye una parte fundamental del Plan de Emergencias ante el Riesgo Sísmico que la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia está acometiendo. El ámbito del RISMUR es la totalidad del área geográfica de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. El Proyecto está articulado en varias fases con el fin de cubrir todos los aspectos que requiere un estudio de riesgo, desde la caracterización de la acción sísmica hasta la estimación de pérdidas ante el movimiento esperado con periodo de retorno de 475 años en cualquier punto de la Región de Murcia. La estimación final del riesgo es establecida en términos de grado de daño para las diferentes tipologías constructivas englobadas en diferentes clases de vulnerabilidad, estimando además, los daños totales y el número de viviendas inhabitables, para cada entidad poblacional de la Región de Murcia. De este proyecto se extraen las conclusiones más relevantes sobre la “Evaluación de la peligrosidad sísmica”, “Geotecnia y análisis del efecto sísmico local del terreno”, “Vulnerabilidad de la edificación”, “Acumulación de esfuerzos” y la “Evaluación del riesgo sísmico”. Actualmente se está haciendo una actualización del proyecto.

El volumen 3 es el que trata la vulnerabilidad sísmica en la Región de Murcia. Bajo el título "La Vulnerabilidad de la Edificación", valora el parque inmobiliario completo de la Región de Murcia en términos de vulnerabilidad, abarcando desde la edificación tradicional antigua a la edificación actual. Clasifica el parque inmobiliario de acuerdo a la tipología constructiva de los edificios, sobre ella se basa la estimación de daño para cada intensidad de acuerdo a lo establecido en la escala EMS-98.

En los resultados finales del proyecto, la ciudad de Lorca era considerada la población con mayor daño esperado y con mayor orden de prioridad establecido para la definición de escenarios particulares de peligrosidad y riesgo.

SISMIMUR

La Norma Básica de Protección Civil, aprobada por el Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, como complemento y desarrollo de la Ley 2/1985, de 21 de enero, sobre Protección Civil, incluyó entre los riesgos susceptibles de originar una situación catastrófica, y que por ello debían ser objeto de planificación especial, el concerniente a los movimientos sísmicos, debido a la posibilidad de que puedan generar consecuencias desastrosas para las personas y los bienes. Por su parte, el Plan Territorial de Protección Civil de la Región de Murcia (PLATEMUR), prevé específicamente la necesidad de elaborar un plan autonómico para hacer frente al riesgo derivado de los terremotos dentro del territorio de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Bajo estas premisas aparece SISMIMUR, Plan Especial de Protección Civil Ante el Riesgo Sísmico en la Región de Murcia.

Para la elaboración de este Plan, fue fundamental la elaboración previa del Proyecto RISMUR. El objeto del Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico en Región de Murcia (SISMIMUR) es conocer la peligrosidad existente en la Región de Murcia frente a este riesgo, estimar la vulnerabilidad de las construcciones cuya destrucción pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio imprescindible o aumentar los daños por efectos catastróficos asociados, así como establecer la organización y los procedimientos de actuación de los recursos y servicios cuya titularidad corresponde a la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia y los que puedan ser asignados al mismo por otras Administraciones Públicas, al objeto de hacer frente a las emergencias por terremotos ocurridos, o bien, formando parte de la organización del Plan Estatal, prestar el concurso necesario cuando tales situaciones se produzcan en cualquier otra parte del territorio nacional.

El capítulo 5.2 se realiza una estimación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones, con la misma metodología y resultados que el proyecto RISMUR.

1.2.3 Otros estudios

Los parámetros urbanísticos evaluados y ponderados en esta tesis doctoral son descritos por la arquitecta Teresa Guevara en los libros, "Arquitectura moderna en zonas sísmicas" (2009) y

“Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas” (2012). Tras varios años de investigación, Teresa Guevara además de enumerar las configuraciones arquitectónicas irregulares de los edificios que pueden provocar más daño durante un sismo, estudia las bases históricas de la ciudad contemporánea en zonas sísmicas, el desarrollo de las normas de zonificación urbana y su influencia en la utilización de configuraciones arquitectónicas y urbanas que influyen en el comportamiento sismorresistente de los edificios.

Por otra parte, las tesis doctorales de Sonia Giovinazzi (2005), María Nieves Lantada Zarzosa (2007) y Mercedes Feriche Fernández-Castanys (2012) han sido de gran utilidad en esta tesis doctoral para desarrollar el capítulo del estado del conocimiento en la aplicación de las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad y la definición y ponderación de los modificadores por comportamiento.

La Comunidad Autónoma de la Región de Murcia ha publicado en octubre de 2012 después del terremoto del 11 de mayo de 2011, tres guías redactadas por la empresa Fhecor, Ingenieros Consultores. Una primera guía para la definición de una estrategia antisísmica en proyectos de edificios de nueva planta (CARM, Ayuntamiento de Lorca y Fhecor, octubre 2012), otra guía para la restitución de la capacidad frente al sismo de elementos estructurales, tabiques, cerramientos, petos y escaleras de edificios dañados en el sismo de Lorca (CARM, Ayuntamiento de Lorca y Fhecor, octubre 2013) y una tercera guía sobre inspección y evaluación en situación de emergencia de daños debido al sismo en edificios (CARM, Ayuntamiento de Lorca y Fhecor, diciembre 2013). En esta tesis doctoral, para la clasificación de la habitabilidad (no daño, daño no estructural) y no habitabilidad (daño estructural) de los edificios en Lorca se ha adoptado el criterio de seguridad indicado en la tercera guía mencionada (CARM, Ayuntamiento de Lorca y Fhecor, diciembre 2013), donde se clasifican los edificios por niveles de seguridad tras la evaluación del daño. El criterio que utilizan está recogido en diversas recomendaciones internacionales, la mayoría de las cuales se basan en la documentación generada por el ATC- Applied Technology Council.

El Consorcio de Compensación de Seguros ha publicado en el año 2013 el libro “El terremoto de Lorca. Efectos en sus edificios”, cuyos autores son Ramón Álvarez Cabal, Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma y Raúl Rodríguez Escribano técnicos de INTEMAC. El libro consta de nueve capítulos más anejos y referencias. Se estructura con unos primeros capítulos sobre la descripción general del entorno y los daños observados, un tercer capítulo sobre el terremoto y el resto de capítulos sobre los tipos de edificios, formas de construir y la caracterización de su daño. Este trabajo permite extraer lecciones para el futuro con el fin de reducir en lo posible los daños por terremoto en cualquier lugar en que se produzcan.

Arquitectura moderna en zonas sísmicas

En este libro (Guevara, 2009), la arquitecta Teresa Guevara muestra como la separación entre las competencias institucionales y laborales entre arquitectos e ingenieros han provocado una sectorización de las responsabilidades en el proceso del diseño y de la construcción de edificios. En este aspecto, Guevara reflexiona: “[...] tanto arquitectos como ingenieros perdieron la imagen holística en el comportamiento de los edificios y de la ciudad como un todo”. Como consecuencia, los edificios resultantes de este enfoque fragmentado generalmente no se desempeñan lo bien que sería necesario para controlar su comportamiento y los posibles daños; es decir, para alcanzar un riesgo sísmico aceptable en los ámbitos social y económico cuando se encuentran sometidos a acciones sísmicas significativas. El libro comienza con una introducción donde se presentan las bases de las investigaciones realizadas, seguida por cuatro capítulos con los resultados sobre la influencia que las irregularidades de las configuraciones arquitectónicas y urbanas de las ciudades pueden tener en el comportamiento de los edificios ante los movimientos sísmicos del terreno, y concluye con un comentario final.

Como la autora refleja en el último párrafo de su comentario final, el propósito principal del material del libro es “ayudar a entender físicamente, en contraposición a analíticamente, los efectos que pueden producir los sismos en las ciudades” y despertar la inquietud en los profesionales involucrados en el diseño, construcción y mantenimiento de los edificios, así como en los urbanistas y planificadores, para que se produzca un cambio de actitud hacia los problemas que pueden generarse por sus decisiones cuando no se tiene en cuenta el estado de conocimiento en el Diseño de Edificaciones Sismorresistentes (DESR) para establecer la normativa urbana, construir nuevas edificaciones y actualizar el comportamiento sismorresistente de las existentes en ciudades situadas en zonas sísmicas.

Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas

El libro “Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas” de Teresa Guevara, es una continuación del libro descrito anteriormente. En este libro, la arquitecta abre una línea de investigación en la que no aborda la vulnerabilidad sísmica de la ciudad contemporánea considerando a la ciudad como un sumatorio de edificaciones individuales independientes unas de otras, sino como un sistema de componentes urbanos que están estrechamente vinculados. Teresa Guevara, estudia seis casos particulares de configuraciones urbanas irregulares siguiendo los conceptos utilizados en las normas sísmicas internacionales que tienen que ver con los patrones arquitectónicos y urbanos de la ciudad contemporánea. Los seis casos estudiados son:

- El edificio singular colindantes con edificaciones existentes
- La irregularidad geométrica en alzado
- La irregularidad geométrica en planta
- El piso blando y el piso débil

- La planta torsional
- La columna cautiva y la columna corta

La selección de estos casos es debido a su presencia predominante y recurrente en los estudios e informes de evaluación de las edificaciones que han sufrido daños en sismos, afectando significativamente a áreas urbanas contemporáneas. Este libro ha servido como punto de partida en esta tesis doctoral para la selección de los parámetros urbanísticos que influyen en la respuesta de los edificios después de un sismo. El estudio tan exhaustivo que se hace en el libro de cada configuración irregular nos ha servido para poder identificar diferentes niveles dentro de cada parámetro urbanístico.

1.3 OBJETIVOS DE LA TESIS

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo general de esta tesis doctoral es poder caracterizar y graduar los parámetros urbanísticos (aquellos que están regulados en las Normas Urbanísticas de un Plan General de Ordenación Urbana) que tienen mayor correlación con el daño en las edificaciones tras un terremoto para contribuir a la reducción de la vulnerabilidad sísmica de las ciudades. Como herramienta de análisis se emplearán los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS). Para ello se utilizarán datos del terremoto de Lorca de 2011, se analizará el daño de las edificaciones, no solo en función de su clase de vulnerabilidad, sino de sus configuraciones urbanas. Para la calibración de los parámetros se realiza un estudio estadístico con variables cualitativas. Para identificar las relaciones de dependencia entre las variables cualitativas y el daño se utiliza el contraste estadístico basado en el estadístico χ^2 (Chi-cuadrado). Para lograr alcanzar el objetivo general, se exponen a continuación los objetivos específicos que se han llevado a cabo, divididos en objetivos específicos de evaluación y análisis de las metodologías actuales y objetivos específicos de aplicación a la ciudad de Lorca.

Los objetivos específicos de evaluación y análisis de las metodologías actuales son:

1. Describir las metodologías empíricas actuales de evaluación de la vulnerabilidad sísmica y analizar los modificadores por comportamiento. Para ello el estudio se apoyará en los desarrollos realizados en el entorno del proyecto Risk-UE.
2. Analizar la ordenación del territorio y el planeamiento urbanístico en zonas sísmicas para obtener una clasificación de los parámetros urbanísticos que hacen que las ciudades sean vulnerables. Este análisis debe ser eficaz para las comunidades autónomas, ayuntamientos, urbanistas y planificadores, para que se produzca un cambio de actitud hacia los problemas que pueden generarse por sus decisiones cuando no se tiene en cuenta el estado de conocimiento en el diseño de edificaciones sismorresistentes para establecer la normativa

urbanística, construir nuevas edificaciones y actualizar el comportamiento sismorresistente de las existentes en ciudades situadas en zonas sísmicas.

Los objetivos de aplicación a la ciudad de Lorca son:

1. Seleccionar una muestra significativa de los edificios de viviendas de la ciudad de Lorca y definir, recopilar y estructurar todos los datos necesarios para crear una base de datos extensa, completa y fiable que sirva de base para trabajos de análisis de la vulnerabilidad sísmica. Se realiza una ficha de vulnerabilidad sísmica con todos los parámetros estructurales y urbanísticos necesarios para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las ciudades. En esta recopilación se incluyen tanto la obtención de datos de fuentes como la Dirección General del Catastro o el Instituto Geográfico Nacional, entre otras, como la toma de datos en campo.
2. Clasificar y codificar las tipologías estructurales y los parámetros urbanísticos en niveles tras realizar el trabajo de campo en la ciudad de Lorca. Con esta clasificación se agrupan los parámetros según su categoría estructural o urbanística y se hacen niveles dentro de cada categoría de acuerdo a la mayor o menor probabilidad de sufrir daño. Tratamiento de los datos para incluirlos en un Sistema de Información Geográfica y para adaptarlos a las necesidades específicas del estudio que se lleva a cabo.
3. Analizar los distintos tipos de suelo sobre la que se encuentran los edificios seleccionados en la muestra según la distribución de valores V_{s30} que propone el Eurocódigo EC8 (1998) y de acuerdo a los datos obtenidos de la clasificación del suelo de la ciudad de Lorca de Navarro et al., 2012.
4. Creación de una base de datos espacial e implementación en un Sistema de Información Geográfica (SIG), con el objetivo de utilizarse para posteriores trabajos relacionados con la mitigación del riesgo sísmico, la planificación urbanística de las ciudades y la construcción de nuevas edificaciones situadas en zonas sísmicas.
5. Analizar los daños del terremoto de la ciudad de Lorca, generar un mapa de daños y clasificar el tipo de daño tras el estudio de las fichas de evaluación rápida de daño.
6. Realizar un estudio estadístico de los parámetros urbanísticos y su correlación con el daño. Se agruparán los edificios según su tipología estructural (hormigón armado o mampostería) y el tipo de suelo sobre el que se asientan de acuerdo a la clasificación definida en el punto 3.
7. Realizar una tabla ponderada de los parámetros urbanísticos que han tenido relación con el daño, según su tipología estructural y el tipo de suelo sobre el que se encuentran.

8. Obtener conclusiones y recomendaciones tanto en el uso de las metodologías actuales de evaluación de la vulnerabilidad sísmica como en la redacción de normas urbanísticas en zonas de riesgo sísmico.

1.4 CONTENIDO DE LA MEMORIA

El documento de esta tesis doctoral está comprendido en tres partes y ocho capítulos. Tiene como punto de partida, en la Parte I, Capítulos 2, 3 y 4, el desarrollo del marco teórico en que se inscribirá la parte aplicada de la tesis, con el análisis del estado del arte y la definición de la metodología a aplicar. Se hace una revisión del estado del arte en los dos temas que conforman el eje de esta tesis, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica a través de las metodologías más conocidas dentro de la Ingeniería sísmica y la evaluación de la ordenación del territorio y el planeamiento urbanísticos en zonas con riesgo sísmico y los parámetros urbanísticos que modifican la vulnerabilidad estructural y constructiva inicial de las edificaciones. Se hace una revisión completa de los conceptos básicos, y de los trabajos más destacados y recientes en los diferentes campos. Estos dos aspectos son fundamentales para el desarrollo del nuevo enfoque de caracterización de la vulnerabilidad sísmica que se proponen en esta tesis, y para posibles recomendaciones en la redacción de nuevas figuras de planeamiento urbanístico en zonas de riesgo sísmico. Finalmente, en el Capítulo 4 se desarrolla la metodología, que en la siguiente parte se aplicará a Lorca, y consiste en caracterizar los parámetros urbanísticos que producen daño en las edificaciones tras un terremoto. Se soporta conceptualmente y se formula un estudio estadístico con un índice de discriminación (edificios habitables, no daño - daño no estructural y edificios no habitables, daño estructural), el cual busca medir la mayor o menor relación de estos parámetros con el daño en las edificaciones.

En la Parte II, Capítulos 5, 6 y 7, se hace la aplicación a la ciudad de Lorca. Se han seleccionado 3 zonas representativas pertenecientes al barrio de San Diego, barrio de Santiago, barrios Altos y barrio de la Viña, al existir variedad de tipologías estructurales, características urbanísticas y distintos tipos de suelo. Tras un trabajo de campo donde se obtuvieron los datos estructurales y urbanísticos de 816 edificios y un posterior trabajo de depuración de las unidades constructivas, se calibraron los parámetros urbanísticos con el daño sufrido en las edificaciones tras el terremoto del 11 de mayo de 2011 en Lorca. En el Capítulo 7, se hace una interpretación de los resultados y recomendaciones para la reducción de la vulnerabilidad sísmica en el ámbito de la ingeniería sísmica. En el área del planeamiento urbanístico de las ciudades en zonas de riesgo sísmico, las recomendaciones van enfocadas a poder establecer unos principios urbanístico-sísmicos.

Las conclusiones de esta tesis se presentan en la Parte III, Capítulo 8, que identifica también futuros trabajos y líneas de investigación.

La enorme cantidad de datos manejada en esta tesis, así como el alcance y sensibilidad de los resultados obtenidos han aconsejado incluir información complementaria y de detalle en siete

anexos. El Anexo I contiene las tres fichas de evaluación rápida de daño que se utilizaron en la evaluación en el terremoto de Lorca de 2011 facilitadas por el Ayuntamiento de Lorca. El Anexo II incluye un análisis exploratorio que se realizó de todos los parámetros urbanísticos con sus diferentes niveles, dando frecuencias, porcentajes y diagramas de barras. El Anexo III aporta la representación georreferenciada de los parámetros urbanísticos estudiados con todos los niveles y el Anexo IV aporta también una representación georreferenciada de los niveles de los parámetros urbanísticos que han sido objeto del estudio estadístico. Los Anexo V, VI y VII aportan datos usados y representados durante el estudio estadístico.

PARTE I

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS Y MÉTODOS EN INGENIERÍA SÍSMICA

2.1 INTRODUCCIÓN

La vía analítica más importante desarrollada desde principios del siglo XX para reducir la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones ha sido la Ingeniería Sismorresistente (ISR) o Ingeniería Sísmica. Bertero la define como *“la rama de la ingeniería dedicada a la mitigación de los efectos de los sismos”*. Esta ingeniería se encarga de estudiar el comportamiento de las construcciones (edificios, puentes, presas de embalse y otros) ante acciones sísmicas y de buscar soluciones para mejorar la resistencia ante dichas acciones, reduciendo con ello su vulnerabilidad. Desde mediados del siglo XX el estado de conocimiento sobre el comportamiento de las estructuras ante los sismos ha avanzado notablemente, con el consiguiente impulso en esta rama de la ingeniería.

Dentro de la Ingeniería Sísmica podemos encontrar numerosas y variadas metodologías y técnicas propuestas por diferentes autores para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, basadas principalmente en el estudio del desempeño sísmico de las edificaciones según su estructura y construcción. Entre estas metodologías destacan los métodos empíricos y los métodos analíticos o teóricos.

A este respecto es necesario introducir algunos conceptos clave para centrar el marco teórico de esta tesis, como son los de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo sísmico. A continuación se definen estos conceptos. Es importante también hacer mención a la normativa sísmica, que estudia cómo se deben construir las edificaciones para mitigar el daño sísmico ante diferentes intensidades de movimiento.

2.2 CONCEPTOS INHERENTES AL RIESGO SÍSMICO

2.2.1 Definición de riesgo sísmico

La definición de riesgo sísmico proporcionada por la United National Disaster Relief Office, puede encontrarse en UNDRO (1979), incluyó las siguientes definiciones:

- Peligrosidad Natural (H , *Natural Hazard*): es la probabilidad de que un nivel de movimiento del suelo causado por terremotos exceda un umbral prefijado, dentro de un intervalo específico de tiempo.
- Vulnerabilidad (V): se define como el grado de pérdidas que un determinado elemento o conjunto de elementos experimenta como consecuencia de un terremoto de magnitud dada. Aunque se utilizan diferentes escalas, se puede expresar en una escala normalizada que varía desde 0 (sin daños) hasta 1 (pérdida total).
- Grado de daño o pérdidas (D): se relaciona con las consecuencias negativas producidas o que se pueden producir por la ocurrencia de un terremoto dado. Estas consecuencias no deseadas pueden ser la pérdida de vidas humanas, daños materiales en vías de servicio y líneas vitales, y daños estructurales en edificios.
- Exposición (E): Constituyen la población, propiedades, actividades económicas, incluyendo los servicios públicos que están expuestos a la peligrosidad en un área dada.
- Riesgo en sentido estricto (R_s): Es el grado de pérdidas esperadas en un determinado elemento debidas a un terremoto de una magnitud particular y en un período de exposición determinado. El riesgo se suele expresar mediante la convolución de la peligrosidad y la vulnerabilidad del elemento expuesto:

$$R_s = (H) \cdot (V) \quad [2.1]$$

- Riesgo en sentido global (R_t): Expresa una valoración global de las consecuencias del evento en el sector analizado, en función de la pérdida de vidas humanas, heridos, propiedades dañadas, o perturbación de la actividad económica como consecuencia de un determinado terremoto, y se calcula como la convolución entre el riesgo específico, y los elementos de riesgo:

$$R_s = (E) \cdot (R_s) = (E) \cdot (H) \cdot (V) \quad [2.2]$$

Posteriormente, conservando el marco conceptual integral del informe “Natural Disasters and Vulnerability Analysis” (UNDRO, 1979), Cardona y Barbat (2000), plantearon un enfoque holístico para la evaluación del riesgo, que no sólo tiene en cuenta variables relacionadas con los efectos físicos y ambientales, sino también variables relacionadas con aspectos sociales, económicos, y de capacidad de respuesta o recuperación pos-desastre, o resiliencia. Se eliminó de la Ecuación [2.2] la variable E, (elementos en riesgo), por considerarse implícita en el concepto de vulnerabilidad V. Esta forma de expresar el riesgo, ampliamente aceptada en el campo científico y técnico, fue planteada por Cardona (2001) de la siguiente manera:

$$R_{ie}|t = (A_i, V_e)|t \quad [2.3]$$

De esta forma, el riesgo R_{ie} , de un elemento e caracterizado por una vulnerabilidad V_e , por causa de un peligro o amenaza A , caracterizada por una intensidad o cantidad A_i , durante un período de exposición t , se define por la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento e , como resultado de la ocurrencia del suceso A con una intensidad mayor o igual a A_i . Tanto la amenaza o peligro, como la vulnerabilidad del elemento, se entienden en sentido probabilista; es decir A_i se define mediante la probabilidad de que ocurra un suceso caracterizado por una cantidad igual o mayor que A_i y V_e se define mediante la probabilidad de que el elemento e pertenezca a un tipo o clase de vulnerabilidad V_e .

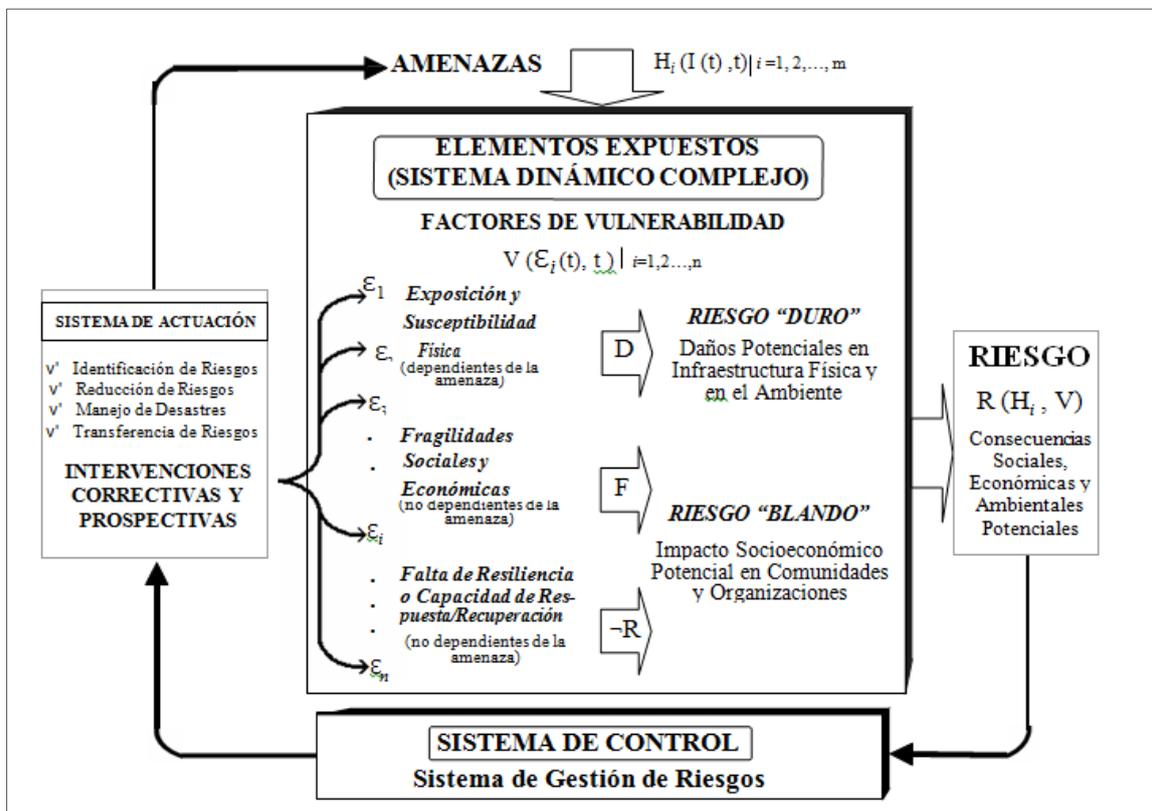


Figura 2.1. Marco teórico del enfoque holístico de evaluación y gestión del riesgo de desastres (Cardona y Barbat, 2000b).

Desde esta perspectiva holística el riesgo, R , es una función de las amenazas, H_i , teniendo en cuenta las intensidades potenciales, I , de los fenómenos y de los factores, ϵ_i , de la vulnerabilidad, V , en un período de tiempo t . El riesgo, por lo tanto, es función de los daños potenciales, D , del contexto material (riesgo duro) y de las fragilidades socioeconómicas, F , y de la falta de resiliencia, $\neg R$, del contexto social (riesgo blando); contextos que constituyen el sistema socio-técnico propenso a desastres. Desde el punto de vista de la teoría de control y los sistemas dinámicos complejos, para reducir el riesgo es necesario llevar a cabo intervenciones correctivas (o compensatorias sobre riesgo existente) y prospectivas (para evitar riesgos futuro) de los factores de vulnerabilidad y, cuando es posible, intervenciones directas, sobre las amenazas.

Para la modelización del riesgo sísmico bajo este enfoque, Cardona (2001) formula un índice de riesgo físico a partir de las estimaciones de los escenarios de daños por sismo, que son resultado de la convolución de la amenaza y la vulnerabilidad física. Por otra parte propone un índice de riesgo del contexto, a partir de la estimación de un descriptor de amenaza sísmica relativa y de su convolución con un descriptor de vulnerabilidad del contexto basado en indicadores de exposición, fragilidad social y resiliencia (Barbat 2003a/b).

A continuación se definen los dos conceptos fundamentales englobados en el riesgo sísmico: la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad sísmica.

2.2.2 Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de que en un lugar determinado y durante un periodo de tiempo de referencia se exceda un nivel de movimiento del suelo como consecuencia de terremotos que puedan ocurrir en un área de influencia.

Los métodos de evaluación de la peligrosidad se clasifican en dos grandes grupos:

- Deterministas. Asumen la hipótesis de estacionariedad de la sismicidad, considerando que los terremotos en el futuro se producirán de forma análoga a como lo hicieron en el pasado y conducen a la estimación de los límites superiores del movimiento, expresados por los valores máximos del parámetro empleado para su descripción.

- Probabilistas. Deducen las relaciones de recurrencia de los fenómenos sísmicos de una zona a partir de la información existente en la misma y con ellas obtienen las funciones de probabilidad de los parámetros que representan el movimiento esperado. Estas funciones asocian a cada valor del parámetro una probabilidad anual de excedencia, o bien un periodo de retomo, que se define como el valor inverso de esa probabilidad. En contra de lo que intuitivamente cabe suponer, el periodo de retorno no indica el intervalo de tiempo promedio

entre dos terremotos que generan esa intensidad, sino el periodo en años en el que se espera que la intensidad del movimiento alcance el nivel de referencia, con un 64% de probabilidad.

$$P(y > Y \text{ en } t \text{ años}) = 1 - e^{-\lambda(y > Y) t}$$

con

$$\lambda(y > Y) = \sum_{i \text{ fuentes}} \iiint \tau_i P_i(y > Y | m, r, \epsilon) \cdot p_i(m) \cdot p_i(r) \cdot p_i(\epsilon) dm dr d\epsilon \quad [2.4]$$

Donde:

P(a > A en t años) probabilidad de excedencia de un nivel de movimiento A en un periodo de exposición de t años

y representa el parámetro de movimiento con el que expresamos la peligrosidad (en nuestro caso aceleración pico PGA, o aceleración espectral SA (I)).

Y es el valor fijado de y cuya excedencia se evalúa.

$\lambda(y > Y)$ es la tasa anual de excedencia del nivel de movimiento A

τ_i tasa anual de ocurrencia de terremotos en la fuente i

$p_i(m)$ se refiere a la función de densidad de probabilidad asociada a la magnitud en una fuente dada i. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una determinada magnitud en esa fuente. Representa directamente el efecto de la fuente y se deriva de la ley de Gutenberg-Richter o del modelo de recurrencia que se considere para la sismicidad.

$p_i(r)$ es la función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que si se produce un terremoto en la fuente considerada, su epicentro se encuentre a una distancia r del emplazamiento de cálculo. Esta función se relaciona con el efecto de la atenuación del movimiento sísmico a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento.

$p_i(\epsilon)$ se relaciona con la distribución de valores de movimiento del suelo (valores de y) que se obtienen para unos valores fijos de magnitud y distancia. Así, dadas una magnitud m y una distancia r, el parámetro de movimiento y puede tomar distintos valores (dada la aleatoriedad del movimiento) que se ajustan razonablemente bien a una distribución lognormal de y. El parámetro ϵ indica precisamente el número de desviaciones estándar que se consideran para estimar y.

$P_i(y > Y | m, r, \epsilon)$ es una función de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado Y al calcular el movimiento esperado y con los valores de m, r y ϵ dados, por medio de la ecuación de predicción del movimiento considerada. Es por tanto un término que solo puede tomar dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario. Por ello esta función de probabilidad se representa por una función de Heaviside o función escalón.

Los resultados del análisis dependen, por tanto, del método elegido, así como de la extensión del estudio.

En cualquier caso, la correcta evaluación de la peligrosidad requiere conocer dos características importantes de la zona de estudio: la sismicidad de la región circundante o área de influencia, con identificación de zonas sísmicas en la misma y la atenuación sísmica regional. Combinando los dos aspectos se llega a determinar la probabilidad de superar la intensidad del movimiento en un emplazamiento como consecuencia de los terremotos que puedan afectar al mismo, integrando el efecto de la fuente y la propagación de energía de ésta al emplazamiento. Si no se introduce expresamente el efecto local del suelo en el movimiento, éste se considera caracterizado en roca o suelo duro, siendo éste el tratamiento que se sigue generalmente en estudios de peligrosidad regional. Cuando la estimación se realiza en un emplazamiento específico, es necesario cuantificar la amplificación local y aplicarla a los resultados anteriores para obtener intensidades del movimiento que incluyan este efecto.

2.2.3 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad sísmica de un edificio, grupo de edificios o de una zona urbana completa se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico de una severidad determinada (Barbat, 1998).

La evaluación de la vulnerabilidad de los edificios no es única y el procedimiento o parámetros utilizados para la evaluación también varían. Podríamos preguntarnos ¿cuál de las metodologías existentes para evaluar la vulnerabilidad de los edificios es la adecuada? Lo importante de cada metodología son los objetivos planteados para el estudio, las hipótesis empleadas y por supuesto de la información que necesite la metodología.

Varios métodos se han desarrollado y propuesto para la evaluación de la vulnerabilidad en los últimos años, consecuentemente, algunos han conseguido desarrollar una metodología para clasificar la vulnerabilidad (Corsageno y Petrini, 1994; Dolce et al. 1994; UNDP/UNIDO, 1985). Se pueden distinguir tres tipos de criterios para la clasificación de las distintas metodologías usadas para evaluar la vulnerabilidad:

- métodos empíricos, basados en observaciones de daños en terremotos pasados en función de la intensidad sentida.
- métodos analíticos, basados en cálculos mecánicos de la respuesta estructural de los edificios
- métodos basados en el juicio de expertos.

Estos métodos tienen características diferentes y limitaciones, por lo que los estudios actuales están pensando en la posibilidad de técnicas híbridas (Lang,D.H. et al, 2012b).

Todas las metodologías analizan por un lado la vulnerabilidad de las edificaciones a través de índices o clases de vulnerabilidad y por otro lado el grado de daño que pueden sufrir en función de los movimientos sísmicos. La mayoría de las metodologías conocidas estudian los elementos

estructurales y constructivos de las edificaciones, dejando en un segundo plano sus características urbanísticas, que suelen ser denominadas modificadores de la vulnerabilidad. En esta tesis doctoral, se describirán, cuantificarán y clasificarán estos modificadores por comportamiento que pueden variar la vulnerabilidad de una edificación.

2.2.4 Daño sísmico: escalas y evaluación

El daño sísmico representa el deterioro físico de los diferentes elementos o el impacto económico asociado. Es común referirse al daño físico y daño económico (Yépez, 1996). El daño físico que puede sufrir una edificación generalmente se califica como:

- a) *Estructural*, depende del comportamiento de los elementos que forman parte del sistema resistente tales como vigas, pilares, muros, forjados, etc. Se relaciona con las características de los materiales que lo componen, su configuración y ensamblaje, el tipo de sistema resistente y las características de la acción. Se cuantifica mediante índices de daño correspondientes a cada uno de los elementos estructurales, cuya ponderación sobre parte o totalidad de la estructura, permite la definición de los llamados índices de daño globales.
- b) *No estructural*, asociado a los elementos arquitectónicos tales como cerramientos, ventanales, revestimientos, etc. y los sistemas mecánicos, eléctricos, sanitarios, así como del contenido de la edificación. Aunque su diseño, distribución y construcción no está intencionalmente relacionado con el sistema resistente de la estructura o edificio, su interacción con el mismo es importante y se debe tener en cuenta. Estos elementos han cobrado especial interés como consecuencia de las pérdidas económicas registradas durante algunos eventos importantes, tales como el sismo de Loma Prieta (1989) y el sismo Northridge (1994). Durante estos terremotos, se observó que un gran número de edificios que se comportaron satisfactoriamente desde el punto de vista estructural, sufrieron grandes pérdidas debidas al daño en elementos no estructurales.

El daño económico se define como la relación entre los costes de reparación y los costes de reposición, e incluyen tanto los costes de daño físico directo como los costes de daños indirectos. Intentan representar el daño en términos de pérdidas económicas o costes financieros tomando en cuenta la afectación de los diferentes componentes estructurales y no estructurales y generalmente se hace a través de métodos empíricos, teóricos y subjetivos.

La mayoría de los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, centran su atención en la descripción de los daños físicos que pueden sufrir las edificaciones como resultado de la acción de un sismo con determinadas características. Su cuantificación depende de la manera concreta como se describan los daños y dan origen a diferentes escalas de medición. Existen diversas escalas de

medida cuantitativas y cualitativas del daño que intentan describir el estado global de la estructura después de la ocurrencia de un terremoto.

Estados o Grados de daño

Una primera alternativa para describir el nivel de daño consiste en definir diferentes estados o grados de daño de la edificación. Para ello, se emplean términos o definiciones cualitativas que sirven como indicadores del grado de daño global de la edificación o del nivel de perturbación que sufre el mantenimiento de sus funciones. Constituye una medida discreta del nivel de deterioro que puede sufrir la edificación.

Existen una diversidad de escalas de estados de daño utilizados por diferentes autores (Singhal y Kiremidjian, 1995) que intentan describir de la mejor manera posible la naturaleza y extensión del daño sufrido por los componentes estructurales; sin embargo, la mayoría de los trabajos han utilizado cinco estados de daño básicos identificados a través de los siguientes calificadores: ninguno, menor, moderado, severo y colapso (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Grados de daño de las metodologías de Risk-UE y Hazus (Risk-UE 2003)

Damage Grade	Damage Grade Label			Description	Loss Indices			
	LM1	LM2	FEMA/ NIBS (HAZUS)		AUTH	IZIIS		UNIGE
						RC	Masonry	
0 (D0)	None	None	None	No damage	0.0	0.0	0.0	0.0
1 (D1)	Slight	Minor	Slight	Negligible to slight damage	0-0.05	<0.15	<0.2	0.1
2 (D2)	Moderate	Moderate	Moderate	Slight structural, moderate nonstructural	0.05-0.2	0.15-0.25	0.20-0.30	0.2
3 (D3)	Substantial to heavy	Severe	Extensive	Moderate structural, heavy nonstructural	0.2-0.5	0.25-0.35	0.30-0.40	0.35
4 (D4)	Very heavy	Collapse	Complete	Heavy structural, very heavy nonstructural	0.5-1.0	0.35-0.45	0.40-0.50	0.75
5 (D5)	Destruction			Very heavy structural, total or near total collapse	-	>0.45	>0.50	1.00

Una aplicación de esta alternativa sirve para la definición de la Escala Macrosísmica Europea EMS (Grünthal, 1998). La escala de intensidad EMS-98 considera los estados de daño de grado 1, más leve a grado 5, más grave, si bien describe con un mayor detalle las características de cada estado. Las clases de grados están fuertemente condicionadas por la necesidad de que puedan distinguirse fácilmente por el usuario. No se mencionan todas las combinaciones posibles de clases de vulnerabilidad y grados de daño para cada grado de la escala; normalmente, para una clase de vulnerabilidad concreta sólo se mencionan los dos mayores grados de daño, y se asume que un número proporcionado de edificios sufrirá daños de menor grado.

Evaluación de daños

A raíz de importantes terremotos ocurridos en diferentes países ubicados en zonas de amenaza

sísmica alta, ha sido necesario desarrollar métodos para evaluar el daño de los edificios que han sido afectados, con el fin de determinar en forma rápida si son seguros o deben ser evacuados para proteger la vida de sus ocupantes y evitar que el número de víctimas sea mayor en el caso de una réplica. Se ha demostrado que no sólo es importante el estudio de vulnerabilidad de los edificios, sino que también es útil tener métodos para la evaluación de los daños causados por sismo.

Los procedimientos para la evaluación post-sísmica normalmente se aplican por medio de dos niveles o etapas de desarrollo: la evaluación rápida (o de habitabilidad) que se basa en el nivel de riesgo o peligro que representa un edificio para la población, y la evaluación detallada, que describe el nivel de daño estructural y su clasificación.

La formulación de una metodología y la elaboración de las herramientas necesarias para la evaluación de la habitabilidad de los edificios permite identificar, después de ocurrido un terremoto moderado o severo, los edificios que hayan sufrido daños graves y que puedan representar peligro para la comunidad, así como también edificios seguros que pueden servir como refugios temporales a personas que hayan perdido sus viviendas o que hayan sido evacuadas por estar comprometida la seguridad de los edificios que ocupaban. Este tipo de evaluación no sólo permite dar recomendaciones para la seguridad de la población definiendo la posible ocupación o no de las viviendas, sino que proporciona recomendaciones técnicas sobre el acordonamiento de áreas inseguras, el apuntalamiento de los edificios o elementos inestables o la demolición de elementos en peligro de caer, entre otros.

De manera complementaria, las evaluaciones detalladas de daño no sólo sirven para caracterizar los daños estructurales y no estructurales en los edificios, también permiten evaluar los efectos locales de los suelos, estimar de manera aproximada el impacto económico y social, y generar información para la toma de decisiones por parte de las autoridades, para la formulación posterior de proyectos para la reconstrucción y la definición de estrategias que permitan a largo plazo reducir los efectos de futuros eventos sísmicos. Permiten, hacer mejoras a las normas sismorresistentes vigentes, identificando las fallas en los sistemas estructurales y también posibilitan la construcción de curvas de vulnerabilidad empírica, útiles también para el estudio de los edificios.

En el desarrollo de metodologías para la evaluación de daños causados por terremotos se destacan las realizadas en la ex República Yugoslava de Macedonia, Estados Unidos (California), Japón, México, Italia, Turquía, Grecia y Colombia.

Los procesos realizados en los diferentes países no han sido independientes, por el contrario, los desarrollos de unos han servido de base para trabajos posteriores. Los primeros trabajos realizados en Japón y California, sirvieron como base para los trabajos del ATC 20 (1989a/b) y posteriormente el ATC 20i (2003) y el ATC 20-1 (2005) en Estados Unidos. Los trabajos de la Ex-República Yugoslava de Macedonia y Japón fueron utilizados en México en la evaluación de los

daños del sismo de 1985 y sirvieron como base junto con el ATC-20 para las diferentes versiones realizadas posteriormente en 1995 y 1998.

Los procedimientos de evaluación de daños en las distintas metodologías se aplican por medio de diferentes niveles o etapas de desarrollo, las cuales se han clasificado en evaluaciones rápidas, evaluaciones detalladas y evaluaciones de ingeniería.

Las metodologías detalladas o evaluaciones que describen el nivel de daño estructural y su clasificación pueden ser realizadas por muchos motivos, en general se hace con el objetivo de revisar la seguridad de aquellos edificios sobre los cuales se tiene alguna duda por los cortos alcances de la evaluación rápida y la poca experiencia de sus evaluadores. Este tipo de evaluación normalmente tiene otros objetivos que varían según el país, por ejemplo en Japón se hace con el fin de definir el uso a largo plazo de los edificios, por lo tanto el resultado de la evaluación es una sugerencia al propietario de que repare, refuerce o demuela su edificio, mientras que en Italia el propósito es evaluar globalmente las pérdidas económicas directas y calcular funciones de vulnerabilidad de edificios, ya que la decisión del uso a largo plazo del edificio se hace mediante una evaluación de ingeniería contratada independientemente por los propietarios, al igual que en Estados Unidos y México.

Los principales elementos para una metodología de evaluación de daños son: la clasificación de los daños, la definición de las posibilidades de uso de los edificios que sufrieron daños, la organización para la recogida de los datos y el análisis y procesamiento de la información, Carreño *et al.* (2005b).

2.3 ANTECEDENTES DE PARÁMETROS URBANÍSTICOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

En este apartado vamos a describir la evaluación de la vulnerabilidad que realizan las metodologías más conocidas y usadas en Europa. Centraremos el estudio en el análisis de los modificadores por comportamiento que clasifican, prestando especial atención en los que tienen características urbanísticas, estudiando sus definiciones y su ponderación dentro de cada metodología.

2.3.1 Método del índice de vulnerabilidad

El método *del índice de vulnerabilidad*, se basa en las propuestas de Benedetti y Petrini (1982) y de Angeletti et al. (1988). En estos métodos, tanto la vulnerabilidad de los edificios como el daño se cuantifican mediante índices, que eventualmente pueden normalizarse para que tomen valores entre 0 y 1 o entre 0 y 100.

Este método para analizar la vulnerabilidad y el daño en los edificios, requiere los siguientes parámetros: *la acción sísmica, el daño y la vulnerabilidad*. La acción sísmica se puede caracterizar mediante la Intensidad o la aceleración efectiva, el daño suele caracterizarse, en estos métodos, mediante un índice que va desde cero (sin daño) a uno (colapso) o de cero a 100 si se prefiere representar en porcentaje, finalmente la vulnerabilidad pretende ser una medida cuantitativa de la

propensión de un edificio a sufrir daño cuando se somete a un terremoto. A través de funciones de vulnerabilidad se relaciona el índice de vulnerabilidad con el índice de daño, para cada intensidad se establecen los niveles de daño esperado en función del índice de vulnerabilidad.

El método propuesto por Benedetti y Petrini (1982) fue el primero en utilizar el índice de vulnerabilidad para evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones y ha sido el germen de la metodología de primer nivel del proyecto RISK-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

En la siguiente Figura 2.2 puede verse un esquema de la metodología del índice de vulnerabilidad, indicando todos los artículos y estudios que han hecho algún aporte significativo a esta metodología, desde la clasificación de los edificios hasta la evaluación del tipo de daño y la clasificación en funciones de vulnerabilidad.

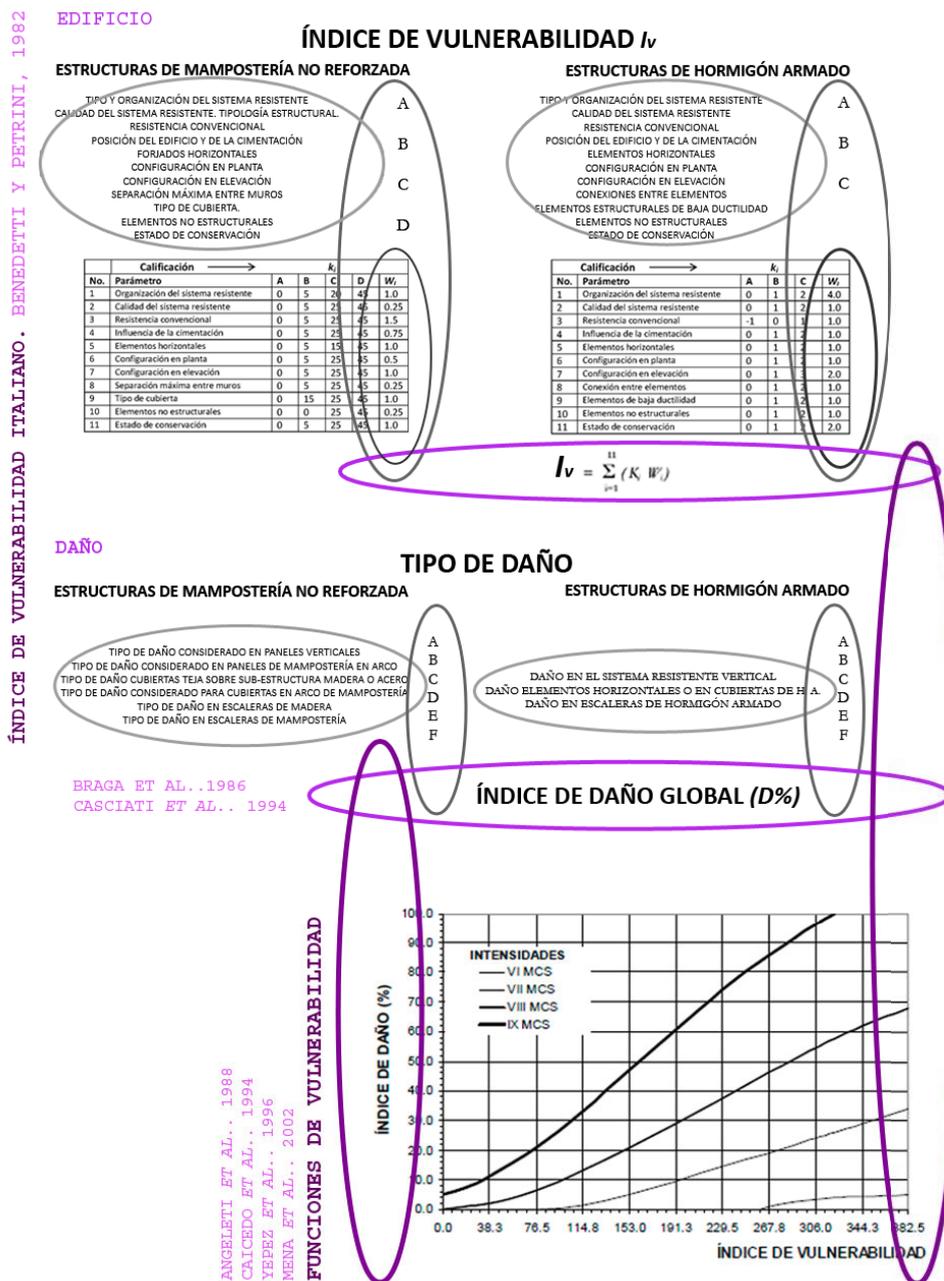


Figura 2.2 Esquema de la metodología del índice de vulnerabilidad y de las propuestas que desarrollan esta metodología

2.3.1.1 Análisis de parámetros relacionados con aspectos que pueden considerarse en normas urbanas

Tanto para las tipologías de mampostería no reforzada como para las tipologías de hormigón armado el método del índice de vulnerabilidad (Benedetti y Petrini, 1984) identifica los parámetros más importantes que controlan el daño en los edificios causados por un terremoto. El método califica diversos aspectos de los edificios tratando de distinguir las diferencias existentes en un mismo tipo de construcción o tipología. Ésta es una ventaja sobre los métodos que clasifican las construcciones por tipología, material o año de construcción como es la escala de intensidad EMS-98 entre otros. Esta metodología evalúa parámetros de los edificios como la configuración en planta y elevación, el tipo de cimentación, los elementos estructurales y no estructurales, el estado de conservación y el tipo y calidad de los materiales, que calificados individualmente en una escala numérica (afectada por un peso W_i , que trata de enfatizar su importancia relativa en el resultado final), proporciona un valor numérico de la calidad estructural o vulnerabilidad sísmica de los edificios.

A partir de la experiencia de los expertos se han identificado once parámetros cuya influencia sobre el daño sísmico de los edificios de mampostería no reforzada y de hormigón armado es determinante. Su lista se encuentra en las siguientes Tablas:

Tabla 2.2 Escala numérica del índice de vulnerabilidad de Benedetti y Petrini 1984 **a)** edificios de mampostería no reforzada y **b)** edificios de hormigón armado

Calificación →		K_i				
No.	Parámetro	A	B	C	D	W_i
1	Organización del sistema resistente	0	5	20	45	1.0
2	Calidad del sistema resistente	0	5	25	45	0.25
3	Resistencia convencional	0	5	25	45	1.5
4	Influencia de la cimentación	0	5	25	45	0.75
5	Elementos horizontales	0	5	15	45	1.0
6	Configuración en planta	0	5	25	45	0.5
7	Configuración en elevación	0	5	25	45	1.0
8	Separación máxima entre muros	0	5	25	45	0.25
9	Tipo de cubierta	0	15	25	45	1.0
10	Elementos no estructurales	0	0	25	45	0.25
11	Estado de conservación	0	5	25	45	1.0

a)

Calificación →		K_i				
No.	Parámetro	A	B	C	D	W_i
1	Organización del sistema resistente	0	1	2	4.0	
2	Calidad del sistema resistente	0	1	2	1.0	
3	Resistencia convencional	-1	0	1	1.0	
4	Influencia de la cimentación	0	1	2	1.0	
5	Elementos horizontales	0	1	2	1.0	
6	Configuración en planta	0	1	2	1.0	
7	Configuración en elevación	0	1	3	2.0	
8	Conexión entre elementos	0	1	2	1.0	
9	Elementos de baja ductilidad	0	1	2	1.0	
10	Elementos no estructurales	0	1	2	1.0	
11	Estado de conservación	0	1	2	2.0	

b)

Cada parámetro se califica en una escala de A a D en edificios de mampostería no reforzada y de A a C en edificios de hormigón armado, ordenados en forma decreciente, conforme la calidad del parámetro decrezca. Una vez realizadas las calificaciones en clases de calidad A, B, C ó D de los once parámetros, se asignan valores numéricos K_i a cada una de dichas clases de acuerdo con una escala propuesta por Benedetti y Petrini (1984). El valor del índice de vulnerabilidad I_v , que sintetiza en un único número la calidad del diseño y construcción sismorresistente del edificio, se realiza sumando los valores K_i de los once parámetros, ponderados por W_i (ver ecuación 2.5):

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} (K_i \cdot W_i) \quad [2.5]$$

Tanto en mampostería no reforzada como en hormigón armado, de los once parámetros, los que no sólo tienen aspectos estructurales, sino también propiedades urbanísticas que pueden ser

reguladas en las Normas Urbanísticas de un Plan General, son los parámetros seis y siete, configuración en planta y configuración en elevación. Como puede verse, el peso de ponderación W_i tanto en edificios de mampostería como en edificios de hormigón armado, es el doble en el parámetro configuración en elevación, lo que hace que este factor suponga una mayor penalización en la cuantificación de la vulnerabilidad de un edificio. A continuación se hace una descripción y análisis de cada uno de ellos.

•**CONFIGURACIÓN EN PLANTA**

En los edificios de mampostería no reforzada.

Según el método del índice de vulnerabilidad la forma y la disposición en planta de los edificios son determinantes en su comportamiento ante excitaciones sísmicas. La asignación de las calificaciones posibles se puede ilustrar mediante la Figura 2.3, definiendo los parámetros $\beta_1 = a/L$ y $\beta_2 = b/L$, donde a representa la dimensión menor del edificio, L la dimensión mayor y b la dimensión de los elementos que sobresalgan de las dimensiones principales a y L de la planta.

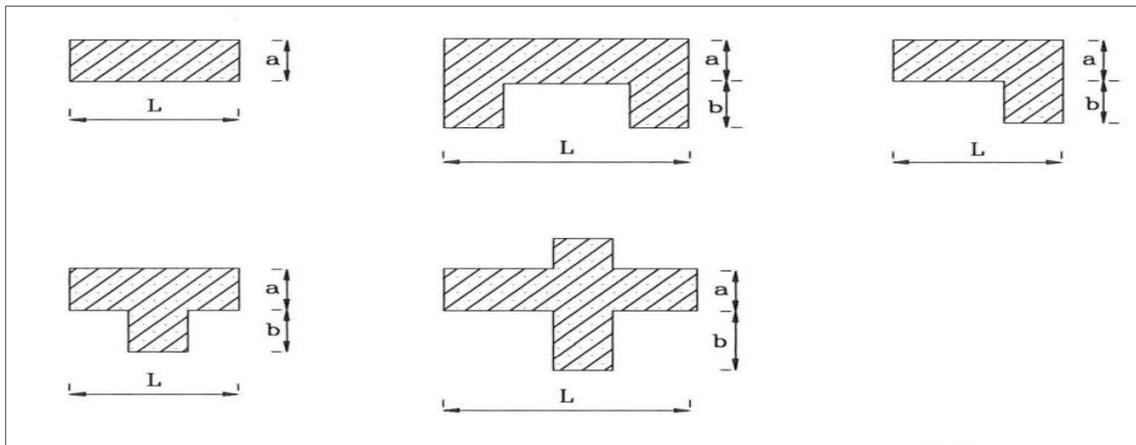


Figura 2.3 Parámetro evaluador de la configuración en planta según el método del índice de vulnerabilidad en los edificios de mampostería no reforzada (GNDT 1986).

La asignación de las calificaciones se realiza como se detalla a continuación:

- A. Estructura con $\beta_1 \geq 0.8$ y $\beta_2 \leq 0.1$
- B. Estructura con $0.6 \leq \beta_1 < 0.8$ o $0.1 < \beta_2 \leq 0.2$
- C. Estructura con $0.4 \leq \beta_1 < 0.6$ o $0.2 < \beta_2 \leq 0.3$
- D. Estructura con $\beta_1 < 0.4$ o $0.3 < \beta_2$

En los edificios de hormigón armado

Este parámetro también tiene en cuenta la forma en planta del edificio. La asignación de las calificaciones se realiza a partir de los factores $\beta_1 = a/L$, $\beta_2 = e/d$, $\beta_3 = \Delta d/d$ y $\beta_4 = c/b$ que se calculan en función de las dimensiones especificadas en la Figura 2.4

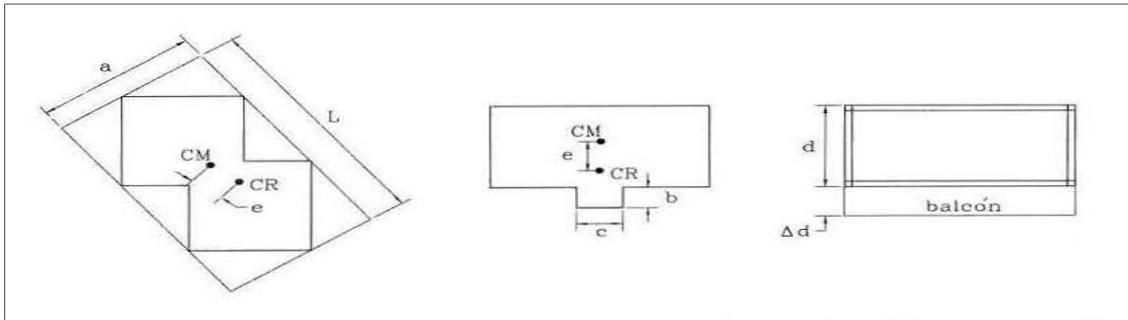


Figura 2.4 Parámetro evaluador de la configuración en planta según el método del índice de vulnerabilidad en los edificios de hormigón armado (GNDT 1986).

En esta Figura, a es la dimensión menor del rectángulo que circunscribe al edificio, L es la dimensión mayor del mencionado rectángulo, e es la excentricidad (distancia entre el centro de masa CM y el centro de rigidez CR), d es la menor dimensión en planta del edificio, mientras que b y c son las dimensiones del mayor elemento que sobresale del cuerpo principal del edificio. Para los factores β_2 y β_3 se toman sus valores máximos posibles, mientras que para β_4 se toma su valor mínimo posible. La calificación del parámetro se realiza como sigue, a partir de los valores de los factores β :

A Estructura con planta regular que cumple las siguientes condiciones:

- $\beta_1 > 0.4$
- $\beta_2 < 0.2$
- Al menos el 70% de los elementos cumplen la condición $\beta_3 < 0.2$
- Para todos los elementos que sobresalen del cuerpo principal del edificio $\beta_4 > 0.5$

B Edificio que no cumple las condiciones necesarias para que sea calificado en las clases de calidad A o C .

C Estructura con planta muy irregular que cumple al menos una de las siguientes condiciones:

- $\beta_1 < 0.2$ y más del 30% de los elementos cumplen la condición $\beta_3 > 0.2$
- $\beta_2 > 0.4$
- Más del 70% de los elementos satisfacen la condición $\beta_3 > 0.2$
- Existe al menos un elemento que sobresale del cuerpo principal que cumple la condición $\beta_4 < 0.25$

De esta manera se tiene en cuenta la regularidad e irregularidad en planta de las edificaciones, considerando que las edificaciones con mayor irregularidad en planta son más vulnerables.

• CONFIGURACIÓN EN ELEVACIÓN

En los edificios de mampostería no reforzada.

La irregularidad en elevación de edificios de mampostería suele estar determinada por la presencia de torretas y porches. Para evaluar la presencia de torretas puede recurrirse a la Figura 2.5, en la cual

se muestran las dimensiones consideradas para los parámetros H y T, con cuya relación se procede a la evaluación de este parámetro. Adicionalmente, se consideran factores como la variación de la masa δM entre pisos sucesivos ($\pm \delta M/M(\%)$), donde M es la masa del piso inferior, o también la variación entre superficies δA de pisos consecutivos, especialmente para evaluar porches ($\pm \delta A/A(\%)$), donde A es la superficie del piso inferior. Se considerará para la calificación el factor más desfavorable de la siguiente manera:

- A. Estructura con $-\delta M/M < 10\%$.
- B. Estructura con una superficie de porche menor al 10% o con $10\% \leq -\delta M/M < 20\%$.
- C. Estructura con una superficie de porche entre el 10 y el 20% o con $-\delta M/M > 20\%$ o $T/H < 2/3$.
- D. Estructura con una superficie de porche mayor al 20%, con $\delta M/M > 0$ o con $T/H > 2/3$.

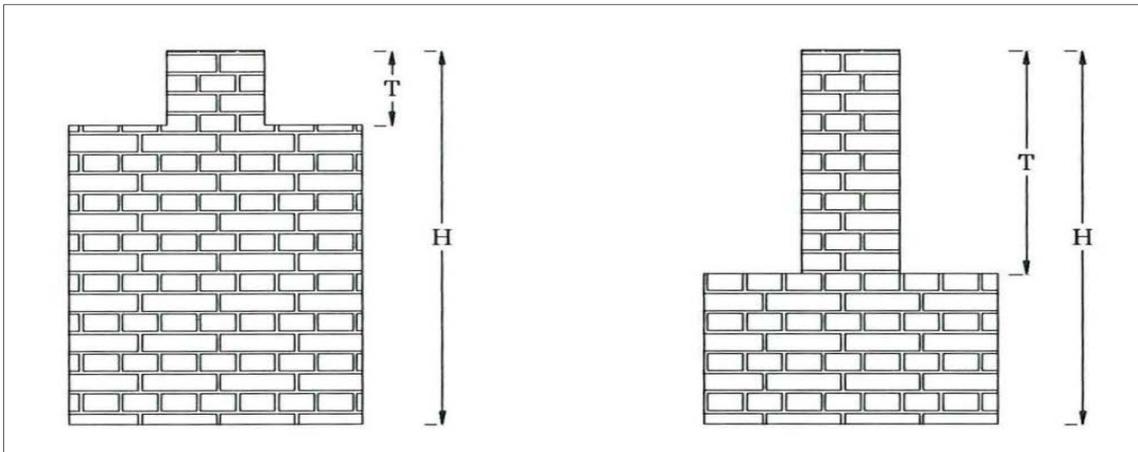


Figura 2.5. Parámetro evaluador de la configuración en elevación según el método del índice de vulnerabilidad en los edificios de mampostería no reforzada (GNDT 1986).

En los edificios de hormigón armado

El método del índice de vulnerabilidad considera tres criterios para evaluar el parámetro que evalúa la configuración en elevación. El primero de ellos tiene en cuenta las irregularidades en elevación del edificio. El segundo compara factores que cuantifican la variación de masa o también la variación de superficies entre pisos consecutivos. El tercer criterio considera la variación con la altura de la rigidez lateral del sistema resistente, tal como puede observarse en la Figura 2.6.

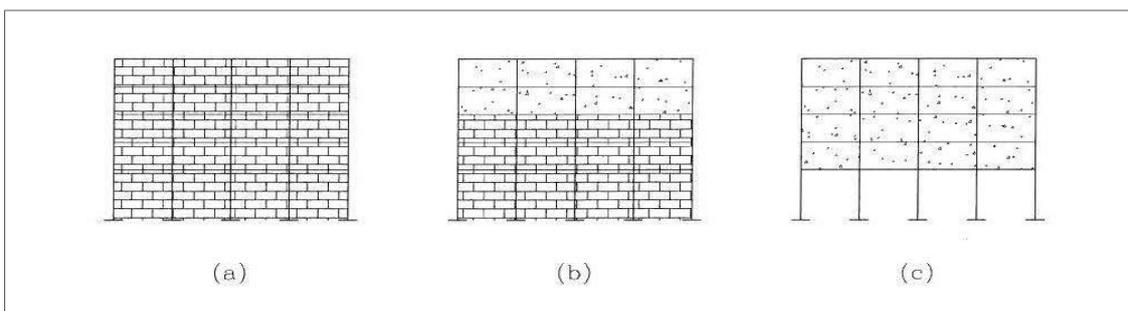


Figura 2.6 Distintos casos de variación de la rigidez lateral de un edificio con sus alturas (Barbat, 1998).

Las variaciones de rigidez pueden producirse debido a un cambio del material utilizado en el sistema resistente. Por ejemplo, en la Figura 2.6a el pórtico tiene muros de mampostería en toda su altura, mientras que el de la Figura 2.6b presenta un cambio de mampostería a hormigón, lo que produce un cambio brusco de su rigidez. En la Figura 2.6c puede verse una situación que se produce habitualmente en el caso de los edificios destinados a comercios, en los que se suprimen algunos de los elementos divisorios interiores para disponer de un mayor espacio. Esto hace que los daños se concentren en el primer piso, lo que puede generar mecanismos de fallo por traslación al formarse rótulas en los dos extremos de las columnas.

Utilizando estos criterios, el parámetro se califica de la siguiente forma:

A La estructura no presenta variaciones significativas del sistema resistente entre dos pisos consecutivos.

B Edificio que no cumple con los requisitos especificados para su calificación en las clases de calidad *A* o *C*.

C Edificio con variaciones en elevación del sistema resistente, tanto en lo referente a su organización como en la cantidad, calidad y tipo de los elementos resistentes utilizados; edificio con una diferencia de masa superior al 20% entre pisos consecutivos; edificio sin variaciones significativas del sistema resistente, pero con un aumento de masa superior a un 40% entre dos pisos consecutivos.

Tanto en los edificios de mampostería no reforzada como en los edificios de hormigón armado, se estudian los factores que cuantifican la variación de masa y la variación de superficies entre pisos consecutivos. Los edificios de mampostería lo hacen estudiando los porches y torretas y los de hormigón armado a través del piso blando o un cambio brusco de rigidez entre diferentes pisos. Se puede apreciar fácilmente que el método califica favorablemente la inexistencia de variaciones excesivas en la masa de dos pisos consecutivos o en la superficie del porche.

En resumen:

1. La irregularidad en planta de un edificio es un parámetro urbanístico que afecta con menor peso que el parámetro configuración irregular en alzado a la vulnerabilidad total del edificio ante un sismo.
2. Como irregularidad en planta, el método evalúa la condición de simetría en planta de los edificios, tomando el parámetro valores más altos cuando las dimensiones en planta se asemejan a secciones cuadradas sin protuberancias adicionales y penalizándose las secciones excesivamente alargadas o con protuberancias demasiado grandes, que pueden provocar problemas de torsión en planta y concentraciones de esfuerzos en las esquinas y en los elementos más alejados de los centros de gravedad y de rigidez.

3. Como irregularidad en alzado, el método evalúa la existencia de pisos blandos o débiles en alguna planta de la edificación (variación de masa) y la variación de superficies entre pisos consecutivos.

2.3.2 Método de la EMS-98

La Escala de intensidades EMS-98 es una actualización de la escala MSK-64 y, en referencia a los edificios, quizás la aportación más novedosa es la inclusión de un mayor número de tipologías constructivas y el concepto de “clase de vulnerabilidad”. Se observa como diferentes tipos de edificios pueden pertenecer a una misma clase de vulnerabilidad y edificios con la misma tipología pueden presentar respuestas sísmicas diferentes (Barbat y Pujades, 2004).

La palabra "vulnerabilidad" se usa a lo largo de esta escala para expresar las diferencias en la forma en la que responden los edificios a las vibraciones ocasionadas por terremotos. Si dos grupos de edificios son sometidos exactamente a la misma vibración ocasionada por un terremoto y un grupo responde mejor que el otro, se puede decir que los edificios menos dañados poseen una menor vulnerabilidad sísmica que los edificios más dañados, o que los edificios menos dañados eran más sismorresistentes que los otros y viceversa.

En la EMS hay seis clases de vulnerabilidad decreciente (A-F), de las cuales las primeras tres representan la resistencia de una vivienda "típica" de adobe, una construcción de ladrillos y una estructura de hormigón armado (HA). Las clases D y E pretenden representar descensos aproximadamente lineales en la vulnerabilidad como resultado de mejores diseños sismorresistentes (DSR), y también acomodar los casos de construcciones de madera bien construidas, mampostería reforzada o confinada, y estructuras de acero, de las cuales se conoce su resistencia a las vibraciones ocasionadas por terremotos. Con la clase F se pretende representar la vulnerabilidad de una estructura con un nivel alto de diseño sismorresistente, que por ello alcanza la más alta resistencia a terremotos.

La mayor diferencia entre la escala EMS-98 y las otras escalas de intensidad radica en el detalle con el cual se definen los diferentes términos usados, en concreto el tipo de edificio, el grado de daño y las cantidades, de tal manera que éstos se consideran ahora individualmente. También, la Escala Macrosísmica Europea es la primera escala de intensidad en ser ilustrada. Varios dibujos muestran de forma gráfica y precisa lo que significan los distintos grados de daño. El propósito de estas ilustraciones es la estandarización del uso de la escala.

2.3.2.1 Factores que afectan a la vulnerabilidad de los edificios

Existen varios factores que afectan a la vulnerabilidad general de una estructura además del tipo de construcción. La EMS-98 pondera estos factores de una manera subjetiva. Estos factores afectan generalmente a todo tipo de estructuras, independientemente de si están construidas con o sin técnicas de ingeniería, con o sin diseño sismorresistente (DSR). Los factores que se han

considerado en la EMS-98 son: calidad y fabricación, estado de preservación, regularidad, ductilidad, localización, refuerzo y diseño sismorresistente (DSR). De estos factores, el que mejor describe y pondera la EMS-98 es el del diseño sismorresistente (DSR).

Los parámetros de la EMS-98 que tienen características urbanísticas son el parámetro de regularidad y el parámetro de localización. La EMS-98 describe estos parámetros de la siguiente manera:

• **REGULARIDAD**

Según la EMS-98 “Desde el punto de vista de la sismorresistencia, el edificio ideal sería un cubo en el cual todas las variaciones en la *rigidez* (como las cajas de las escaleras) están dispuestas en forma simétrica. Cuanto mayor sea la discrepancia en *simetría y regularidad*, mayor será la vulnerabilidad del edificio con relación a la vibración sísmica, y con frecuencia es posible observar en edificios dañados cómo las irregularidades han contribuido claramente al daño (por ejemplo por el colapso de *pisos débiles*)”

“La regularidad se debe considerar en un sentido global, es decir, la regularidad es más que la simetría externa en plano y elevación. En el sentido de esta escala macrosísmica, la regularidad incluye tanto las características naturales del edificio como, en el caso de las estructuras construidas con técnicas de ingeniería, las medidas tomadas en el interior para asegurar un comportamiento simple y hasta cierto punto controlado en caso de terremoto. Es de esperarse que las estructuras construidas con técnicas de ingeniería incorporen medidas en correspondencia con las reglas del diseño sismorresistente para garantizar la regularidad”.

“Con frecuencia se encuentran casos de edificios en los cuales un piso (normalmente el más bajo) es significativamente más débil que los otros; a menudo es muy abierto, con columnas sin muros que soportan los pisos superiores. Tales casos se conocen como “pisos débiles” y son muy susceptibles de colapsar. Unos ventanales a lo largo de un edificio pueden introducir efectos similares”.

En algunos casos las modificaciones subsecuentes pueden afectar negativamente a edificios que tenían un buen nivel de regularidad. Por ejemplo, la transformación del primer piso en un edificio en un garaje o local comercial puede debilitarlo (creando un piso débil); igualmente, la construcción de una extensión de un edificio puede introducir irregularidades en la planta e irregularidades de rigidez y periodo sobre toda la estructura. Los edificios antiguos de mampostería pueden haber sido modificados considerablemente a lo largo de varios años, resultando en pisos a distintos niveles cuya planta no concuerda, cimientos en distintos niveles de una pendiente y casos similares.

• **LOCALIZACIÓN**

“La localización de un edificio con respecto a otros edificios vecinos puede afectar su

comportamiento durante un terremoto. En el caso de una fila de viviendas en una manzana urbana, por lo general son las viviendas situadas en los extremos de la fila o las situadas en las esquinas las que se ven más afectadas. Un extremo de la vivienda está anclado a la vivienda vecina, mientras que el otro lado no lo está, generando una irregularidad en la rigidez general de la estructura que provoca un daño mayor.”

Cuando dos edificios altos con períodos naturales distintos están situados muy cerca el uno del otro se pueden producir daños de importancia. Durante el terremoto, ambos edificios pueden oscilar a frecuencias distintas y chocar el uno contra el otro, causando un efecto conocido como *"golpeteo"* especialmente grave si las cotas de forjado no coinciden y los golpes afectan directamente a las columnas. Tal daño no representa una medida de la fuerza de la vibración del terremoto y debe ser descartado al asignar la intensidad.

2.3.3 Proyecto Risk UE

El Proyecto Risk-UE es un proyecto financiado con fondos comunitarios que pretende desarrollar una propuesta avanzada sobre los escenarios de riesgo de terremoto para su posible aplicación en distintas ciudades europeas.

El principal objetivo de Risk-UE era proponer métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico que permitieran incorporar las características de los edificios, del patrimonio cultural y de las sociedades urbanas típicas de Europa. Risk-UE desarrolla y aplica metodologías homogéneas y avanzadas para el estudio de la amenaza, de la vulnerabilidad y del riesgo sísmico en áreas urbanas europeas. Esta iniciativa se centra en los edificios actuales e históricos, las líneas vitales y la organización social y funcional, es decir, el sistema urbano propio de la ciudad.

La organización modular del proyecto comprendió los siguientes módulos de trabajo:

- WP1: Características distintivas europeas. Sistema de Información Geográfica (GIS), inventario, base de datos y tipologías de los edificios.
- WP2: Estudio de peligrosidad sísmica.
- WP3: Análisis de la Exposición del Sistema Urbano (USE).
- WP4: Estudio de vulnerabilidad de los edificios actuales.
- WP5: Estudio de vulnerabilidad del casco antiguo de las ciudades, de los monumentos y edificios históricos.
- WP6: Estudio de vulnerabilidad de las líneas vitales y las estructuras esenciales.
- WP7: Escenarios de riesgo sísmico

Los módulos comprendidos entre el WP8 y WP14, ambos inclusive, se dedicaban a la aplicación de las metodologías propuestas a siete ciudades europeas. Concreta y respectivamente a: Barcelona en

España, Bitola en Macedonia, Bucarest en Rumania, Catania en Italia, Niza en Francia, Sofía en Bulgaria y Tesalónica en Grecia.

El módulo WP4: "*Estudio de la vulnerabilidad de los edificios actuales*" propone dos metodologías para evaluar la vulnerabilidad y la fragilidad de los edificios residenciales de la ciudad. La primera metodología se basa en el método del índice de vulnerabilidad; la segunda en espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

La metodología del índice de vulnerabilidad (MIV), llamado en Risk UE de Nivel I, clasifica el parque inmobiliario de la ciudad en clases de vulnerabilidad, para después realizar un análisis de vulnerabilidad de cada edificio individual. La acción sísmica se considera en términos de intensidad macrosísmica EMS-98.

El método del espectro de capacidad (MEC), llamado en Risk UE de Nivel II, requiere la obtención del espectro de capacidad y curvas de fragilidad específicas para los edificios analizados y la acción sísmica se considera en términos de espectros de respuesta inelástica o espectros de demanda.

En esta tesis doctoral vamos a analizar la metodología de Nivel I centrándonos en los modificadores por comportamiento que también influyen de manera decisiva en la vulnerabilidad de las edificaciones. Estudiaremos los modificadores que derivan de características urbanísticas. Como hemos descrito anteriormente, en esta línea de investigación consideramos que un parámetro modificador deriva de características urbanísticas si puede ser regulado en la Normativa Urbanística de un Plan General de Ordenación Urbana. Se realizará una descripción de cada modificador según cada metodología o investigador y una comparativa entre las distintas ponderaciones de los modificadores.

2.3.3.1 Tipologías constructivas e índices de vulnerabilidad representativos

La matriz de clasificación de edificios (*Building Typology Matrix, BTM*) incluida en el WP4 sintetiza las diferentes características del inventario de edificios construidos en los países europeos participantes en el proyecto Risk-UE: Bulgaria, Grecia, Francia, Italia, FYRoM (Antigua República Yugoslava de Macedonia; en inglés Former Yugoslav Republic of Macedonia), Rumania y España.

La BTM del Risk-UE (Tabla 2.3) contiene 23 clases de edificios (10 de mampostería, 7 de hormigón armado, 5 de estructura metálica y 1 con estructura de madera), agrupados por su tipología estructural y material de construcción.

RISK-UE propone índices de vulnerabilidad específicos para su BTM considerando, para cada tipo de edificio hasta 4 índices con funciones de pertenencia χ definidas mediante los siguientes rangos: el más probable ($\chi=1$), el posible o plausible ($\chi=0.6$) y el menos probable ($\chi=0.2$).

Tabla 2.3 Índices de vulnerabilidad propuestos para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de Risk-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)

TIPOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	ÍNDICES DE VULNERABILIDAD REPRESENTATIVOS					
		I_V^{min}	I_V^-	I_V^*	I_V^+	I_V^{max}	
MAMPOSTERÍA	M1.1	Muros de carga con mampostería de piedra y cascotes	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
	M1.2	Muros de carga con roca simple	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M1.3	Muros de carga con roca masiva	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
	M2	Adobe	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
	M 3.1	Muros de carga de fábrica y forjados de madera	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M3.2	Muros de carga de fábrica y bóvedas de mampostería	0.46	0.65	0.776	0.953	1.02
	M3.3	Muros de carga de mampostería no reforzada con forjados mixtos de acero y cerámica	0.46	0.527	0.704	0.83	1.02
	M3.4	Muros de carga de mampostería no reforzada y forjados de losas de HA	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
	M4	Muros de carga de mampostería confinados y reforzados	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
	M5	Edificios de mampostería totalmente reforzada	0.3	0.490	0.694	0.953	1.02
HORMIGÓN	RC1	Estructuras de hormigón resistentes al momento	-0.02	0.047	0.442	0.8	1.02
	RC2	Estructuras de hormigón resistentes al cortante	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
	RC3.1	Estructuras de hormigón con tabiquería regular	-0.02	0.007	0.402	0.76	0.98
	RC3.2	Estructuras de hormigón armado irregulares tabicadas	0.06	0.127	0.522	0.88	1.02
	RC4	Sistemas duales de muros y pórticos de HA	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
	RC5	Prefabricados de hormigón	0.14	0.207	0.384	0.51	0.7
	RC6	Prefabricados de hormigón resistentes al cortante	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
ACERO	S1	Estructuras metálicas resistentes al momento	-0.02	0.467	0.363	0.64	0.86
	S2	Estructuras metálicas arriostradas	-0.02	0.467	0.287	0.48	0.7
	S3	Metálicas con muros de relleno de fábrica	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
	S4	Metálicas con muros de corte	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
	S5	Sistemas compuestos de acero y HA	-0.02	0.257	0.402	0.72	1.02
MADE RA	W	Estructuras de madera	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Basándose en las funciones de pertenencia de un edificio a las clases de vulnerabilidad de la EMS-98 del proyecto RISK-UE, Lagomarsino and Giovinnazzi (2006) establecieron el índice de vulnerabilidad para las tipologías constructivas de la EMS-98. La EMS-98 describe la diferente pertenencia a una tipología constructiva en los términos “clase de vulnerabilidad más probable”, “rango probable” y “rango de casos excepcionales, menos probables”.

Milutinovic y Trendafiloski (2003) proporcionan una serie de directrices para la modificación de los índices de vulnerabilidad de cada edificio mediante la suma de valores de penalización o de mejora, basados en la propuesta de la ATC-21 y la National Group for Defense from Earquake (GNDT)

atendiendo, tanto a la calidad y cantidad de la información disponibles, como a las características específicas de los edificios analizados. El índice de vulnerabilidad característico de cada edificio en particular, $V_{I-\text{edificio}}$, se evalúa según la siguiente ecuación [2.6] (Feriche, 2012):

$$\bar{I}_{v-\text{edificio}} = I_{v-\text{clase}}^* + \Delta M_R + \sum_{j=1}^n M_{Cj} \quad [2.6]$$

donde se modifica el índice de vulnerabilidad básico de la clase a la que pertenece el edificio ($I_{v-\text{clase}}^*$, cuyos valores se representan en la Tabla 2.3) sumando un modificador regional, ΔM_R , y una serie de modificadores por comportamiento M_{Cj} .

El modificador regional valora la calidad particular de determinadas tipologías de edificios según la región donde se encuentran y se asigna en función del juicio experto y/o de la vulnerabilidad observada. Modificará el índice de vulnerabilidad básico de la clase al que pertenece el edificio. Para determinar el valor de este modificador en la zona donde se encuentra se tienen en cuenta las distintas normativas sismorresistentes y su fecha de aplicación.

En el apartado 2.4.3.2 se describen los modificadores por comportamiento del índice de vulnerabilidad básico de la clase tanto para edificios de mampostería no reforzada y para edificios de hormigón armado.

2.3.3.2 Clasificación, cuantificación y descripción de los modificadores por comportamiento

El método empírico del proyecto RISK-UE caracteriza los edificios con el índice de vulnerabilidad y la acción sísmica en términos de intensidad macrosísmica. Este método considera, de acuerdo con la EMS-98, seis grados o estado de daño. Una vez conocido el índice de vulnerabilidad de un edificio y la intensidad esperada en su emplazamiento, el establecimiento del daño probable se efectúa a partir de un parámetro de daño, que define la función de distribución de probabilidad de los estados de daño para este edificio, para este emplazamiento y para esta intensidad esperada. El establecimiento de este tipo de relaciones entre intensidad, vulnerabilidad y daño son fundamentales para determinar el daño probable y los escenarios de daño y riesgo sísmico.

Antecedentes

Como se ha observado en la EMS-98, el comportamiento de un edificio a un terremoto no sólo depende de su sistema estructural y de su construcción, existen muchos otros factores como la calidad de su construcción, la altura, sus irregularidades y su mantenimiento.

Las características particulares de cada edificio se tienen en cuenta en los modificadores por comportamiento del índice básico de la clase a la que pertenece el edificio. El modificador por comportamiento es la suma de modificadores parciales M_{Cj} . Estos modificadores permite tener en cuenta factores urbanísticos que califican la situación relativa del edificio dentro de una manzana, bloque o conjunto del edificio del que forma parte y con los que está unido formando una manzana

o agregados de edificios. Además de estos aspectos, también se tienen en cuenta modificadores como el número de pisos, la irregularidad en altura, la irregularidad en planta, la longitud en fachada y el estado de conservación, alguno de los cuales de ellos se pueden también regular en las normas urbanísticas.

Los modificadores por comportamiento se han identificado de forma empírica, a través de la observación de patrones de daño típicos en terremotos, teniendo en cuenta las inspecciones visuales (ATC 21 1988, Benedetti y Petrini 1984, UNDP/UNIDO 1985) y otras propuestas (Coburn y Spence 1992). La puntuación del modificador ha sido dada por el conocimiento de expertos en terremotos tras analizar evaluaciones de vulnerabilidad anteriores y bases de datos del daño producido en edificios.

Clasificación y cuantificación de los modificadores por comportamiento, M_c

El proyecto Risk_UE realiza una clasificación de los modificadores por comportamiento según la tipología estructural del edificio al que pertenecen. La Tabla 2.4 contiene los factores de comportamiento para edificios de mampostería no reforzada cuantificando cada uno de los modificadores definidos para esta tipología estructural y la Tabla 2.5 contiene los modificadores de comportamiento para edificios de hormigón armado cuantificándolos según el nivel de diseño sismorresistente, código de nivel bajo, código de nivel medio y código de nivel alto.

Tabla 2.4 Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad I_v para edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)

FACTORES DE COMPORTAMIENTO	PARÁMETROS	VALORES DE M_c
Estado de conservación	Buen mantenimiento	-0.04
	Mal mantenimiento	+0.04
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.02
	Medio (3, 4 o 5)	+0.02
	Alto (6 o más)	+0.06
Sistema estructural	Grosor de los muros	-0.04, +0.04
	Distancia entre muros	
	Atado de muros: tirantes, abrazaderas....	
	Conexión forjado-muros	
Piso Blando (Soft-story)	Planta diáfana / cambio de rigidez	+ 0.04
Irregularidad en planta	+0.04
Irregularidad vertical	+0.04
Plantas superpuestas	añadidos	+0.04
Cubierta	Peso y empuje de la cubierta	+0.04
	Conexiones con la cubierta	
Intervenciones	reparaciones	-0.08, +0.08
Elementos artísticos	Barbacanas, arbotantes, contrafuertes	

Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio	-0.04
	Esquina	+0.04
	Terminal	+0.06
Edificio en agregado: posición en elevación	Plantas escalonadas	+0.02
	Edificios adyacentes de diferente altura	-0.04, +0.04
Cimientos	Cimientos a diferentes niveles	+0.04
Morfología del terreno	Pendiente	+0.02
	Precipicio o acantilado	+0.04

Tabla 2.5 Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad I_v para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)

FACTORES DE COMPORTAMIENTO		Puntuaciones M_G según el nivel de diseño sismorresistente		
		Código de nivel bajo (Pre or Low code)	Código de nivel medio (Medium code)	Código de nivel alto (High code)
Nivel de código		+0.16	0	-0.16
Mantenimiento deficiente		+0.04	+0.02	0
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 3)	-0.04	-0.04	-0.04
	Medio (4 o 7)	0	0	0
	Alto (8 o más)	+0.08	+0.06	+0.04
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	+0.02	0
	Torsión	+0.02	+0.01	0
Irregularidad vertical		+0.04	+0.02	0
Columna corta		+0.02	+0.01	0
Ventanas en arco		+0.04	+0.02	0
Edificios en agregado (con juntas de dilatación insuficientes)		+0.04	0	0
Cimientos	Zunchos	-0.04	0	0
	Zapatas corridas	0	0	0
	Zapatas aisladas	+0.04	0	0
Morfología del terreno	Pendiente	+0.02	+0.02	+0.02
	Precipicio o acantilado	+0.04	+0.04	+0.04

Se ha marcado en naranja los modificadores por comportamiento que tienen características urbanísticas.

En edificios de mampostería no reforzada la mayor penalización es para los edificios con altura superior a 6 plantas y los edificios en posición terminal dentro de una manzana, su puntuación es de +0.06. Los modificadores que disminuyen la vulnerabilidad de un edificio al tener valores negativos son: edificios con altura de uno a dos plantas y edificios adyacentes de altura superior, en ambos casos el valor del modificador es de -0.02.

En edificios de hormigón armado, la mayor penalización se da para edificios de código de nivel bajo con altura superior a 8 plantas, +0.08 y la reducción del índice de vulnerabilidad en edificios de una a tres plantas para los tres niveles de código, bajo, medio y alto, -0.04.

Como puede observarse en las Tablas 2.4 y 2.5 la puntuación del modificador varía en el rango $\pm 0,02$. Esta jerarquía se mantendrá en todos los estudios posteriores.

Descripción de los Modificadores por comportamiento, Mc

El proyecto Risk UE describe estos modificadores de acuerdo al informe de la ATC-21, recogido en FEMA 154, March 2002 “*Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*”. A continuación se definen los modificadores con características urbanísticas según FEMA 154:

• **ALTURA O NÚMERO DE PLANTAS**

Con este modificador se clasifican los edificios en tres grupos en función del número de plantas (tanto para edificios de mampostería no reforzada como para edificios de hormigón armado): baja (edificios con 1 o 2 plantas), media (edificios con 3, 4 o 5 plantas) y alta (edificios con 6 o más plantas). La cuantificación en los edificios de hormigón armado se hace en función del nivel de diseño sismorresistente.

• **IRREGULARIDAD VERTICAL**

Este modificador se aplica tanto a los edificios de mampostería no reforzada como a los edificios de hormigón armado. Los edificios que presentan irregularidad vertical se representan en la Figura 2.7, edificios con retranqueos en alzado, en ladera y edificios con pisos blandos.

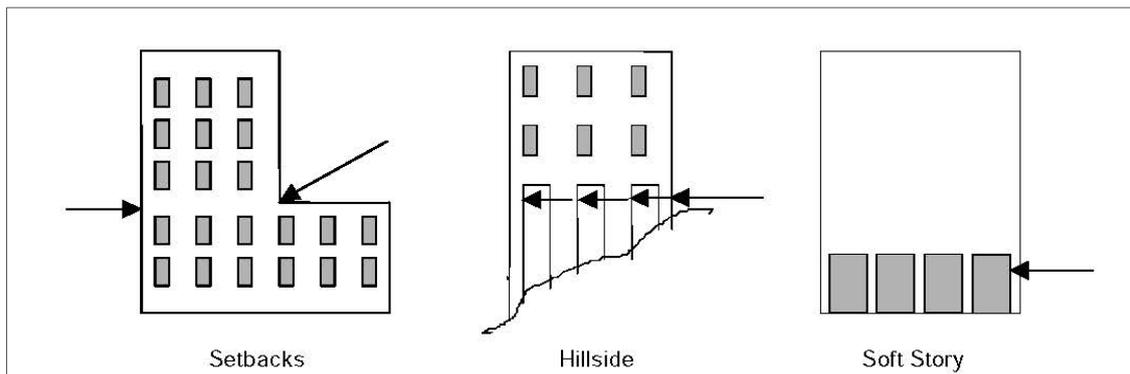


Figura 2.7 Descripción del modificador irregularidad vertical en los edificios (FEMA 154)

Si el edificio tiene forma irregular en alzado, o si alguna de sus paredes no son regulares, entonces también se aplica este modificador.

Si el edificio se encuentra en una zona empinada de tal manera que exista una diferencia de altura casi de un piso, se debe tener en cuenta este modificador, porque existirá una diferencia entre la

fuerza horizontal en el piso bajo y en el superior. Además, se está produciendo un efecto de columna corta.

El piso blando aparece cuando hay una rigidez en una planta del edificio muy distinta a la del resto de plantas.

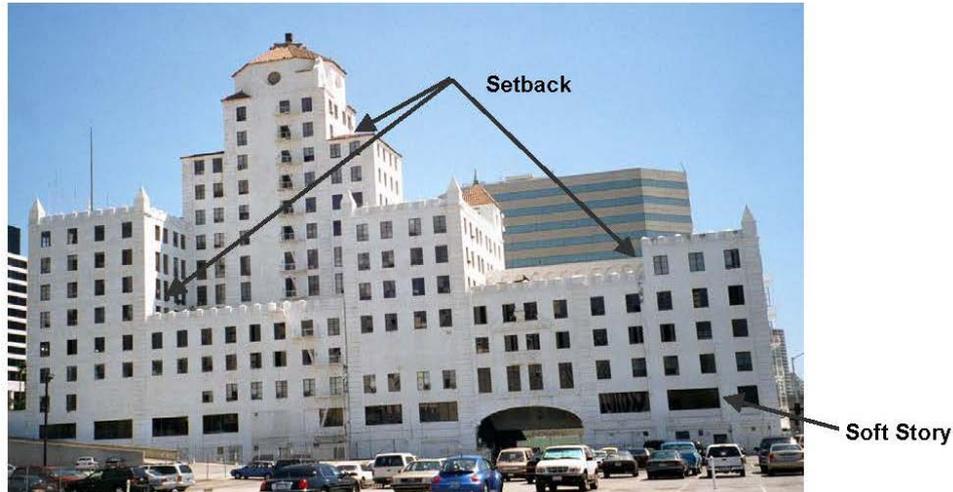


Figura 2.8 Imagen. Ejemplo de retranqueos y piso blando (FEMA 154)

• IRREGULARIDAD EN PLANTA

La irregularidad en planta puede afectar a todo tipo de edificios (mampostería no reforzada y hormigón armado). Ejemplos de plantas irregulares incluye edificios con esquinas entrantes, donde es más probable que se produzca daño, edificios con buena resistencia a cargas laterales en una dirección pero no en la otra, y edificios con mayores excentricidades en la estructura resistente, que causa torsiones alrededor del eje vertical.

Los edificios con esquinas entrantes incluyen las siguientes formas E, L, T, U o +.

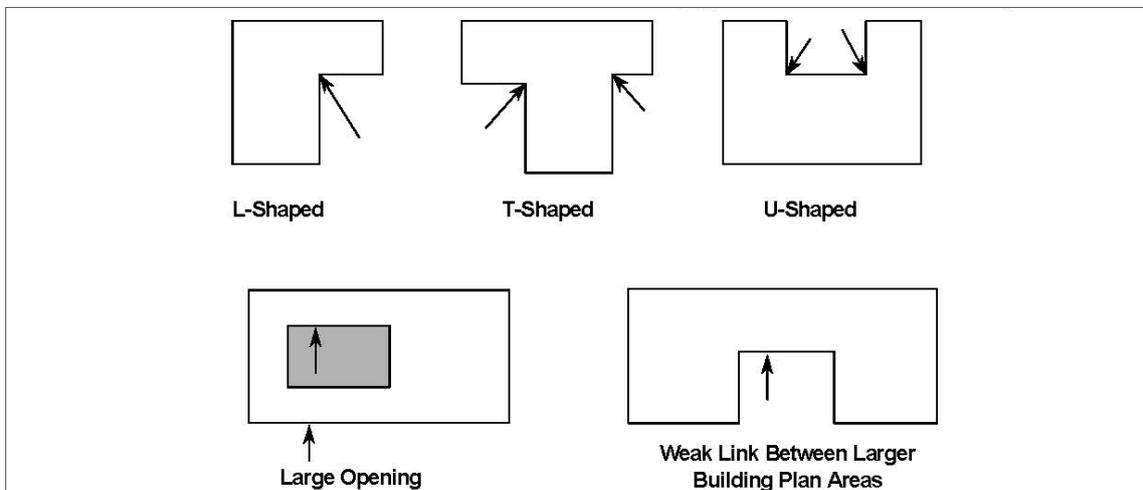


Figura 2.9 Ejemplo de plantas irregulares. Las flechas indican donde se produce el daño (FEMA 154)

Posterior al proyecto RISK-UE hay bastantes líneas de investigación que han analizado estos factores de comportamiento en distintas áreas y los han ponderado. Cabe destacar las tesis doctorales de Sonia Giovinnazzi (2005), Nieves Lantada (2007) y Mercedes Feriche (2012). A continuación se van a describir los modificadores de cada uno de estos proyectos y se van a comparar con los modificadores del proyecto RISK-UE.

2.3.4 Desarrollos posteriores a Risk UE

• **GIOVINNAZZI (2005)**

Clasificación y cuantificación de los modificadores por comportamiento, Mc

Sonia Giovinnazzi (2005) propuso una calibración de los modificadores del proyecto Risk-UE de acuerdo a los factores que afectan a la vulnerabilidad de los edificios (Tabla 2.6). La descripción de los modificadores por comportamiento es la misma que la descrita en el proyecto Risk-UE, los cambios se realizaron en la ponderación de los modificadores. Estas variaciones son:

- los edificios de mampostería sufren una penalización en el parámetro altura de la edificación, los edificios de 1 a 2 alturas y los de 3 a 5 disminuyen su vulnerabilidad, de -0.02 en Risk-UE a -0,08 y de +0.02 en Risk-UE a 0 respectivamente. Los de más de 6 alturas aumentan su vulnerabilidad de +0.06 en Risk-UE a +0.08.
- en los edificios de hormigón armado se modifica la ponderación para código bajo o medio de DSR (diseño sismorresistente) en alturas entre 1 y 3 pisos y alturas superiores a 8 pisos, en ambos casos el valor del modificador es inferior. Giovinnazzi considera que en los edificios de hormigón armado no se debe penalizar tanto la altura del edificio como en los edificios de mampostería.
- El factor piso blando y morfología del terreno Giovinnazzi no los valora.

Tabla 2.6 Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Giovinnazzi, 2005)

FACTORES DE COMPORTAMIENTO	MAMPOSTERÍA		HORMIGÓN ARMADO		
			Pre or Low code	Medium code	High code
	Mc	Mc	Mc	Mc	
Estado de conservación	Buen mantenimiento	- 0.04	Buen mantenimiento	-	-
	Mal mantenimiento	+0.04	Mal mantenimiento	+0.04	0
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.08	Bajo (1 o 3)	-0.02	-0.02
	Medio (3, 4 o 5)	0	Medio (4 a 7)	0	0
	Alto (6 o más)	+0.08	Alto (8 o más)	-0.04	-0.04
Sistema estructural	Grosor de los muros Distancia entre muros Atado de muros Conexión forjado-muros	-0.04/+0.04			
Irregularidad en planta	Forma	+0.04	Forma	-0.04	-0.02
	Torsión		Torsión	+0.02	+0.01
Irregularidad vertical	Torsión	+0.04	Torsión	+0.04	+0.02
	Forma		Forma		0
Plantas superpuestas		+0.04			

Cubierta	Peso y empuje de la cubierta Conexiones con la cubierta	+0.04				
Intervenciones	Reparaciones	-0.08÷ +0.08				
Elementos antisísmicos	Barbacanas, arbotantes, contrafuertes	- 0.04				
Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio	-0.04	con juntas de dilatación insuficientes	+0.04	+0.02	
	Esquina	+0.04				
	Terminal	+0.06				
Edificio en agregado: posición en elevación	Plantas escalonadas	+0.04				
	Edificios adyacentes de diferente altura	-0.04÷ +0.04				
Cimientos	Cimientos diferentes niveles	+0.04	Zunchos	-0.04	0	0
			Zapatas corridas	0	0	0
			Zapatas aisladas	+0.04	0	0
Morfología del terreno						
Columna corta				+0.02	+0.01	0
Ventanas en arco				+0.04	+0.02	0

• **LANTADA (2007)**

Clasificación y cuantificación de los modificadores por comportamiento, Mc

En el año 2007, Nieves Lantada en su tesis doctoral evaluó el riesgo sísmico en la ciudad de Barcelona. Realizó la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios con el método empírico y con el método analítico. En el método empírico realizó una tabla con los valores de los modificadores por comportamiento de acuerdo a las tipologías constructivas de mampostería y de hormigón armado (Tabla 2.7). Al evaluar los modificadores, Lantada realizó modificaciones respecto a los estudios anteriores tanto en la descripción de los modificadores como en la cuantificación. Al insertar todos los datos en un GIS para poder luego cuantificarlos de forma automática, Lantada realizó modificaciones en la descripción de los modificadores. En la valoración de los modificadores se tuvieron en cuenta las técnicas actuales de construcción en Barcelona, las tipologías estructurales existentes y la evolución de las distintas normas sismorresistentes.

Tabla 2.7 Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Lantada, 2007)

FACTORES DE COMPORTAMIENTO	MAMPOSTERÍA		HORMIGÓN ARMADO		
			Pre or Low code	Medium code	
	Mc		Mc	Mc	
Estado de conservación	Buen mantenimiento	- 0.04	Buen mantenimiento	-0.04	-0.04
	Mal mantenimiento	+0.04	Mal mantenimiento	+0.04	+0.04
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2)	-0.02(≤ 1940) -0.04(> 1940)	Bajo (1 o 3)	-0.04	-
	Medio (3, 4 o 5)	-0.02(≤ 1940) 0(> 1940)	Medio (4 a 7)	0	-
	Alto (6 o más)	+0.06(≤ 1940) +0.04(> 1940)	Alto (8 o más)	+0.08	-
Sistema estructural					
Irregularidad en planta	RC < 0.5	+0.04	RC < 0.5	+0.04	+0.04
	0.5 > RC < 0.7	+0.02	0.5 > RC < 0.7	+0.02	+0.02
Irregularidad vertical	1 < δ ≤ 3	+0.02	1 < δ ≤ 3	+0.02	+0.02

	$\delta > 3$	+0.04	$\delta > 3$	+0.04	+0.04
Plantas superpuestas					
Cubierta	Peso y empuje de la cubierta	+0.04			
	Conexiones con la cubierta				
Intervenciones	Reparaciones	-0.08÷ +0.08			
Elementos antisísmicos					
Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio	-0.04	Intermedio	-0.04	-0.04
	Esquina	+0.04	Esquina	+0.04	+0.04
	Terminal	+0.06	Terminal	+0.06	+0.06
Edificio en agregado: posición en elevación	E. A. misma altura	0.00	E. A. misma altura	0.00	0.00
	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	+0.02
	E.A. más bajos	+0.04	E.A. más bajos	+0.04	+0.04
	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	-0.02
	E.A. más altos	-0.04	E.A. más altos	-0.04	-0.04
Cimientos					
Morfología del terreno					
Piso Blando (Soft-story)					
Columna corta					
Ventanas en arco					
Longitud de fachada		+0.04 (L=30)			
		+0.013 (L=20)			

Descripción de los Modificadores por comportamiento, M_c

A continuación se describen brevemente los modificadores por comportamiento con características urbanísticas adoptados por Lantada (2007) teniendo en cuenta si son parámetros propios del edificio (número de plantas, irregularidad en altura e irregularidad en planta) o si están relacionados con otros edificios adyacente (diferencia de altura y posición del edificio en altura).

• NÚMERO DE PLANTAS

Este modificador por comportamiento en función del número de plantas se aplica con criterios diferentes para los edificios de hormigón armado y de mampostería, un edificio de mampostería de tres plantas es considerado como edificio de altura media, y sin embargo sería considerado como un edificio bajo en el caso de tener su estructura de hormigón armado.

Para cuantificar el modificador para edificios de mampostería se tiene en cuenta la antigüedad del edificio según dos categorías, los edificios construidos antes de 1940 y los edificios construidos a partir de 1940. Para los edificios de hormigón armado, más modernos, se ha tenido en cuenta el nivel de protección sísmica, aplicándose la corrección sólo a los edificios con un bajo nivel de diseño sismorresistente.

• IRREGULARIDAD EN ALTURA

La cuantificación de la irregularidad en altura se hace estudiando el número de alturas de cada edificio dentro de las subparcelas al que pertenecen (ver Figura 2.10).

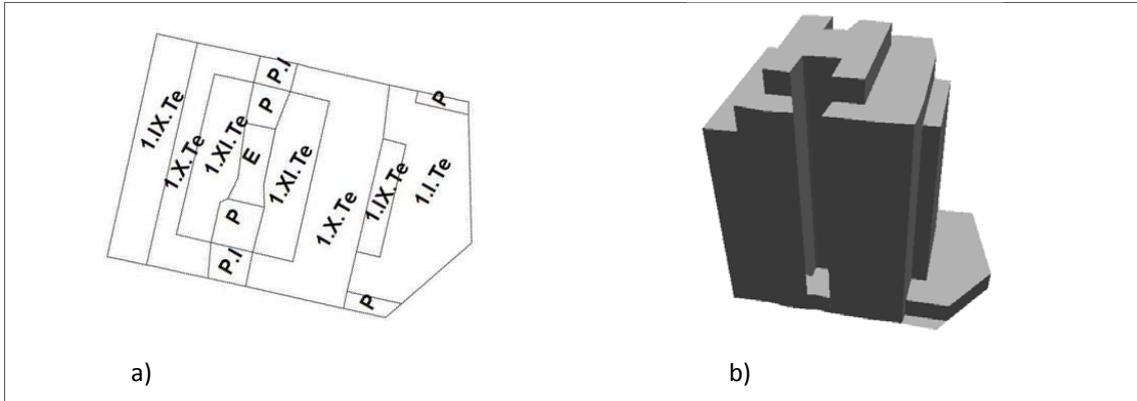


Figura 2.10 Diferencia de alturas en las subparcelas de un edificio a) vista en planta b) vista en 3D. Tesis Lantana (2007).

Estudiando estas diferencias de alturas dentro de un edificio, se genera la función [2.7] que considera la altura, o número de plantas (h_v) que tendría un edificio con el mismo volumen total que el estudiado y su misma superficie en planta.

La diferencia entre este número de plantas, h_v y el número máximo de plantas del edificio h_{max} , es el valor del parámetro δ , que determinará el modificador a aplicar según la ecuación [2.8.] y [2.9.].

$$\delta = h_{max} - h_v = h_{max} - \frac{\sum_{k=1}^n (A_k \cdot h_k)}{\sum_{k=1}^n A_k} \quad [2.7]$$

donde h_k y A_k son respectivamente el número de plantas y el área de porción del edificio o subparcela k . El valor de h_m es el número medio de plantas del edificio.

$$M_{th} = +0.02 \text{ si } 1 < \delta \leq 3 \quad [2.8]$$

$$M_{th} = +0.04 \text{ si } \delta > 3 \quad [2.9]$$

• IRREGULARIDAD EN PLANTA

Se penalizan aquellos edificios que tienen una forma irregular en planta. Según Lantada (2007), la forma geométrica de un objeto se puede definir por medio de la relación de la posición y distancia de los puntos de su perímetro respecto a un centro que puede ser por ejemplo el centro de masas u otro punto típico. De los diferentes métodos existentes para evaluar la geometría en planta del edificio, así como de los numerosos índices que intentan dar una medida precisa y cuantitativa del nivel de regularidad de una línea poligonal, Lantada utilizó para evaluar este modificador el denominado Razón de Compacidad/Circularidad (Compactness Ratio, RC) definido por la ecuación [2.10]. (Udwin, 1981).

$$RC = \sqrt{\frac{A}{A_c}} \quad [2.10]$$

donde A es el área del polígono estudiado, y A_c la del círculo que tiene el mismo perímetro que el polígono. El índice de compacidad vale 1 cuando el polígono es un círculo, y toma valores entre 1 y 0 para cualquier otra forma. Cuanto más diferentes de un círculo sea el polígono estudiado, más se acercará a 0 el valor de RC. Este índice se fundamenta en la comparación de las formas de los objetos problemáticos con las de figuras geométricas regulares. Los valores de este modificador se encuentran en las ecuaciones siguiente:

$$M_{ip} = +0.04 \quad RC < 0.5 \quad [2.11]$$

$$M_{ip} = +0.02 \quad 0.5 \geq RC < 0.7 \quad [2.12]$$

• DIFERENCIA DE ALTURA

Para cada edificio, este modificador se cuantifica en función de las diferencias entre su número de plantas y el número de plantas de los dos edificios adyacentes. La Figura 2.11 esquematiza los casos considerados y cuantifica los modificadores. Estos modificadores sólo se aplican cuando la diferencia entre el número de plantas del edificio estudiado y los edificios contiguos difieren en al menos 2 plantas.

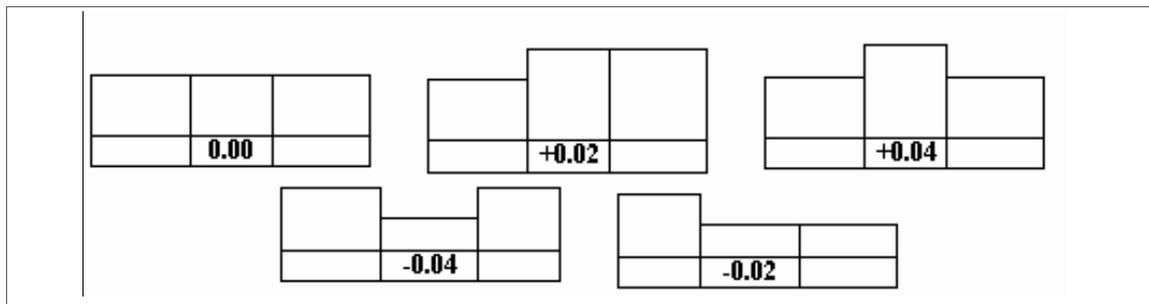


Figura 2.11 Modificadores M_{ib} , en función del número de plantas de los edificios adyacentes. Tesis Lantana (2007).

• POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA

Es conocido que los edificios que situados en esquina y finales de agrupaciones de edificios sufren más daño que aquellos que se hallan de alguna forma más protegidos por hallarse entre otros edificios en posiciones centrales de la agrupación. Se cuantifica el modificador según estos efectos. Se consideran tres tipos de edificios según su posición en la manzana o agregado de edificios: edificio en esquina, edificio terminal y edificio intermedio. Se aplica un modificador de vulnerabilidad positivo para los edificios en esquina, penalizando los edificios terminales y se ha bonificado la vulnerabilidad de los edificios intermedios. La Figura 2.12 esquematiza los tres tipos de edificios considerados y cuantifica los modificadores asignados.

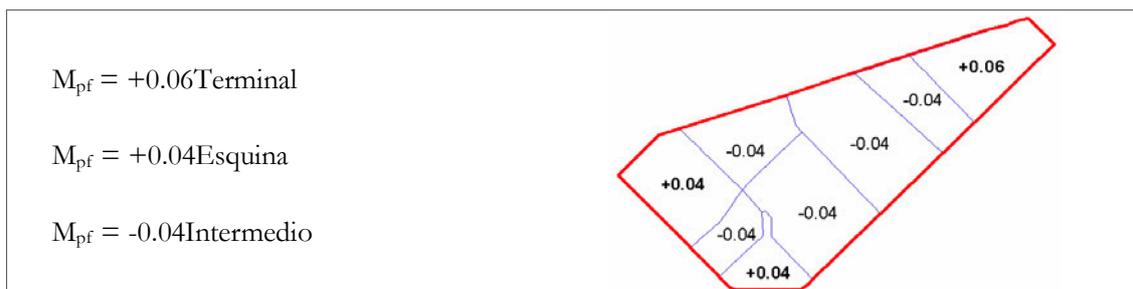


Figura 2.12 Modificadores en función de la posición dentro de la manzana y esquema de los modificadores asignados a las parcelas de una manzana. Tesis Lantana (2007).

• **FERICHE (2012)**

Clasificación y cuantificación de los modificadores por comportamiento, M_c

Recientemente, Feriche (2012) presentó su tesis doctoral “Elaboración de Escenarios de daños sísmicos en la ciudad de Granada”. Feriche conocía la tesis doctoral de Lantada, por lo que la mayoría de los modificadores por comportamiento los cuantificó igual pero adaptándose a las tipologías constructivas y estructurales de Granada (Tabla 2.8). Además, tras el reciente terremoto de Lorca de 2011, adaptó muchos de estos modificadores a los daños que habían sufrido las edificaciones en ese terremoto.

Tabla 2.8 Modificadores por comportamiento para las tipologías de mampostería y de hormigón armado (Feriche, 2012)

FACTORES DE COMPORTAMIENTO	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO		
			Pre or Low code	Medium code
		M_c	M_c	M_c
Estado de conservación	Buen mantenimiento -0.04(rehab) 0 (>1925)	Buen mantenimiento	0	0
	Mal mantenimiento +0.04 (≤1925)	Mal mantenimiento	+0.02 (>1996)	
	Ruina +0.06	Ruina	+0.04 (≤1996)	
Altura o número de plantas	Bajo (1 o 2) -0.02(≤1925) -0.04(>1925)	Bajo (1 o 3)	-0.04	-0.04
	Medio (3, 4 o 5) -0.02(≤1925) 0(>1925)	Medio (4 a 7)	0	0
	Alto (6 o más) +0.06	Alto (8 o más)	+0.08	+0.06
Sistema estructural	Grosor de los muros			
	Distancia entre muros +0.04(≤1925) 0(>1925)			
	Atado de muros -0.04 (rehabil)			
	Conexión forjado-muros			
Irregularidad en planta	RC < 0.5 +0.04	RC < 0.5	+0.04	+0.04
	0.5> RC <0.7 +0.02	0.5> RC <0.7	+0.02	+0.02
Irregularidad vertical	+0.02		+0.06	+0.06
Plantas superpuestas				
Cubierta	Peso y empuje de la cubierta Conexiones con la cubierta +0.04			
Intervenciones				
Elementos antisísmicos		Con juntas antisísmicas insuficientes	+0.04	0
Edificio en agregado: posición en planta	Intermedio -0.04	Intermedio	-0.04	-0.04
	Esquina +0.04	Esquina	+0.04	+0.04
	Terminal +0.06	Terminal	+0.06	+0.06

Edificio en agregado: posición en elevación	E. A. misma altura	0.00	E. A. misma altura	0.00	0.00
	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	Un E.A. misma altura y otro más bajo	+0.02	+0.02
	E.A. más bajos	+0.04	E.A. más bajos	+0.04	+0.04
	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	Un E.A. misma altura y otro más alto	-0.02	-0.02
	E.A. más altos	-0.04	E.A. más altos	-0.04	-0.04
Cimientos					
Morfología del terreno	Pendiente	+0.04	Pendiente	+0.04	+0.04
	Precipicio	+0.04	Precipicio	+0.04	+0.04
Piso Blando (Soft-story)		+0.04		+0.06	+0.06
Columna corta				+0.08	+0.08
Ventanas en arco					
Longitud de fachada		+0.04 (L=30)			
		+0.013 (L=20)			

Los modificadores por número de plantas (excepto en el año 1925), por irregularidad en planta, por diferencia de altura con los colindantes y por posición del edificio en la manzana tienen la misma clasificación, cuantificación y descripción que Lantada (2007).

Descripción de los Modificadores por comportamiento, M_c

A continuación se describen los modificadores que se han considerado de distinta forma que los descritos en los estudios anteriores:

- IRREGULARIDAD EN ALTURA

Feriche (2012), identifica este modificador como causa de incremento de daño en las edificaciones en caso de terremotos, sobre todo por los problemas de pilar corto y de piso débil, piso blando (*soft story*) o planta diáfana. El estudio de los daños provocados por el terremoto de Lorca (Murcia) en mayo de 2011 no sólo ratifica la importancia de ambos problemas sino que los resalta, puesto que la mayoría de los edificios con alguno de estos problemas ha sufrido algún tipo de daño (Feriche et al, 2012) siendo los edificios con pilares cortos los más gravemente afectados. Con este modificador, Feriche (2012) evalúa la tipología constructiva y el número de plantas. Considera que la mayoría de las edificaciones de tipología de hormigón armado de más de tres plantas tienen piso blando y que las de hormigón armado con semisótano especificado por el catastro tienen pilar corto. No considera los semisótanos en edificaciones de mampostería, puesto que no se trata de pilares, sino de muros de carga. Se muestran los diferentes valores de este modificador:

$$M_{ih} = +0.02 \text{ Torreones (mampostería)}$$

$$M_{ih} = +0.06 \text{ Planta diáfana o piso débil}$$

$$M_{ih} = +0.08 \text{ Pilares cortos (hormigón armado)}$$

- **PENDIENTE DEL TERRENO**

Feriche (2012) consciente de la influencia de la pendiente del terreno en los daños de las edificaciones tras el terremoto de Lorca de 2011, incrementa el valor del modificador propuesto por Milutinovic y Tredanfiloski (2003) de +0.02 a + 0.04.

2.3.5 Análisis comparativo de los distintos valores propuestos para modificadores por comportamiento en tipologías de mampostería no reforzada y hormigón armado

Tras definir y analizar la cuantificación de los modificadores por cada uno de los expertos relacionados con los parámetros urbanísticos que van a ser desarrollados en esta tesis doctoral, se han realizado unos gráficos comparativos de las cuatro propuestas (Risk-UE, Giovinazzi, Lantada y Feriche). Este análisis nos permite poder tener una primera visión de la posible cuantificación de cada modificador y la tendencia que ha tenido la calibración desde el año 2003 con el proyecto Risk-UE hasta el año 2012 con la tesis de Feriche. Esta ponderación está relacionada con los daños evaluados por los expertos en diferentes terremotos y por el conocimiento de la construcción y urbanización de las ciudades donde se aplica.

En todas las metodologías el valor de los modificadores por comportamiento varía en rangos de valor entre ± 0.02 .

Como puede verse en la Figura 2.13, en los edificios de mampostería, en el parámetro altura o número de plantas Giovinazzi penaliza, respecto a las otras metodologías, a los edificios de más de seis alturas y premia a los edificios de 1 y 2 alturas. En la evaluación de parámetro irregularidad en planta Feriche y Lantada premian a las edificaciones de acuerdo a los valores de la razón de Compacidad/Circularidad (Compacness Ratio, RC) definido por la ecuación [2.10] y en la irregularidad en alzado Lantada define el parámetro δ (ver ecuación 2.7) que determinará el modificador a aplicar, también premiando a las edificaciones con valores $1 < \delta \leq 3$.

Los modificadores en la tipología estructural de hormigón armado (Figura 2.14A y Figura 2.14B) se clasifican en dos categorías “*pre or low code*” y “*medium code*”. En el parámetro altura de la edificación, en ambas categorías, Giovinazzi premia respecto a las otras metodologías a los edificios de 1 a 3 plantas y a los edificios con altura superior a 8 plantas. Feriche calibra los modificadores por comportamiento de acuerdo a los daños que se produjeron en el terremoto de Lorca, penaliza principalmente dos parámetros en los edificios de hormigón armado, el parámetro columna corta, al ser el principal causante del colapso del único edificio en Lorca, y el parámetro de piso blando, ambos con un valor de + 0.06.

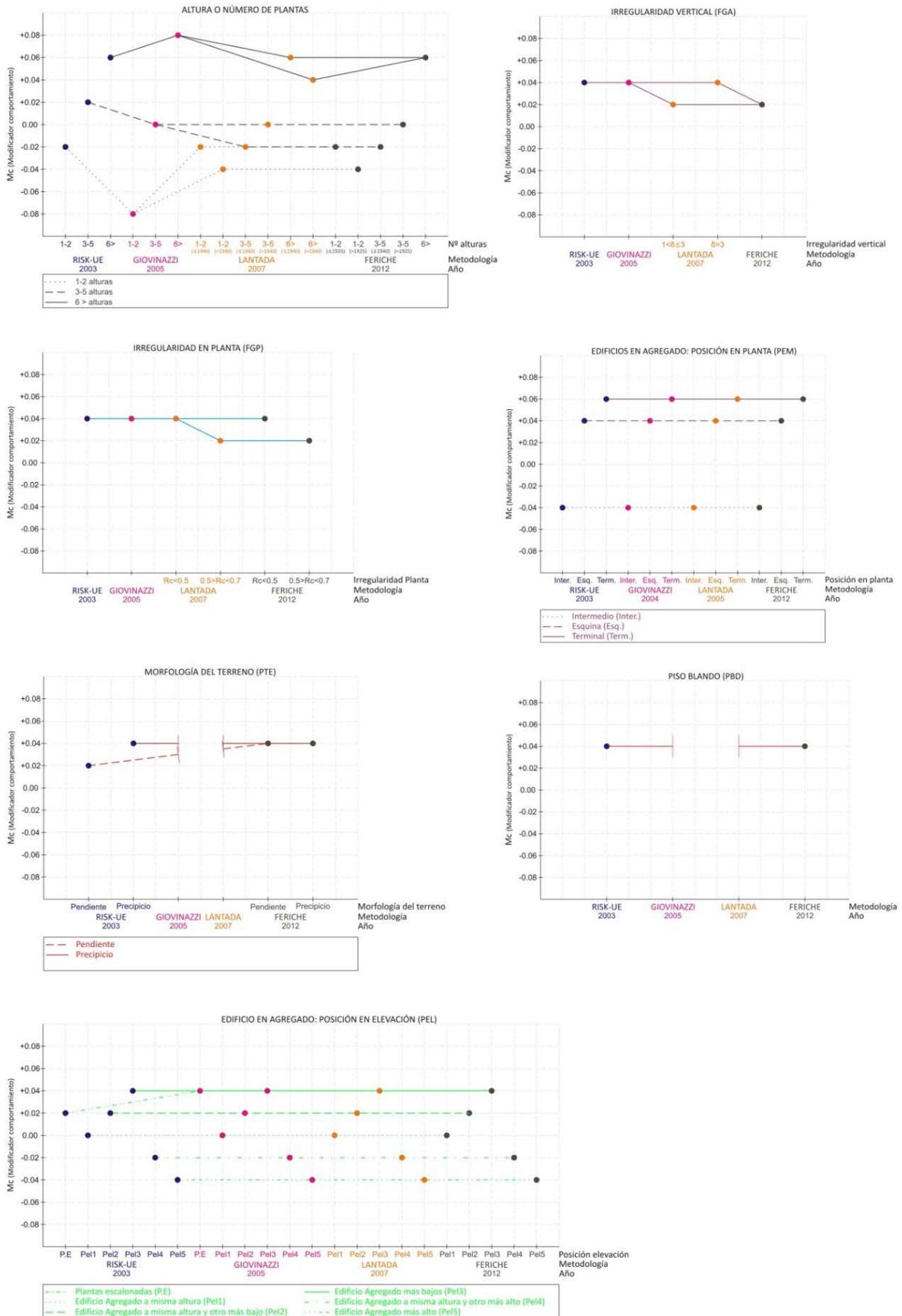


Figura 2.13 Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de mampostería (Risk-UE 2003, Giovinazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012)

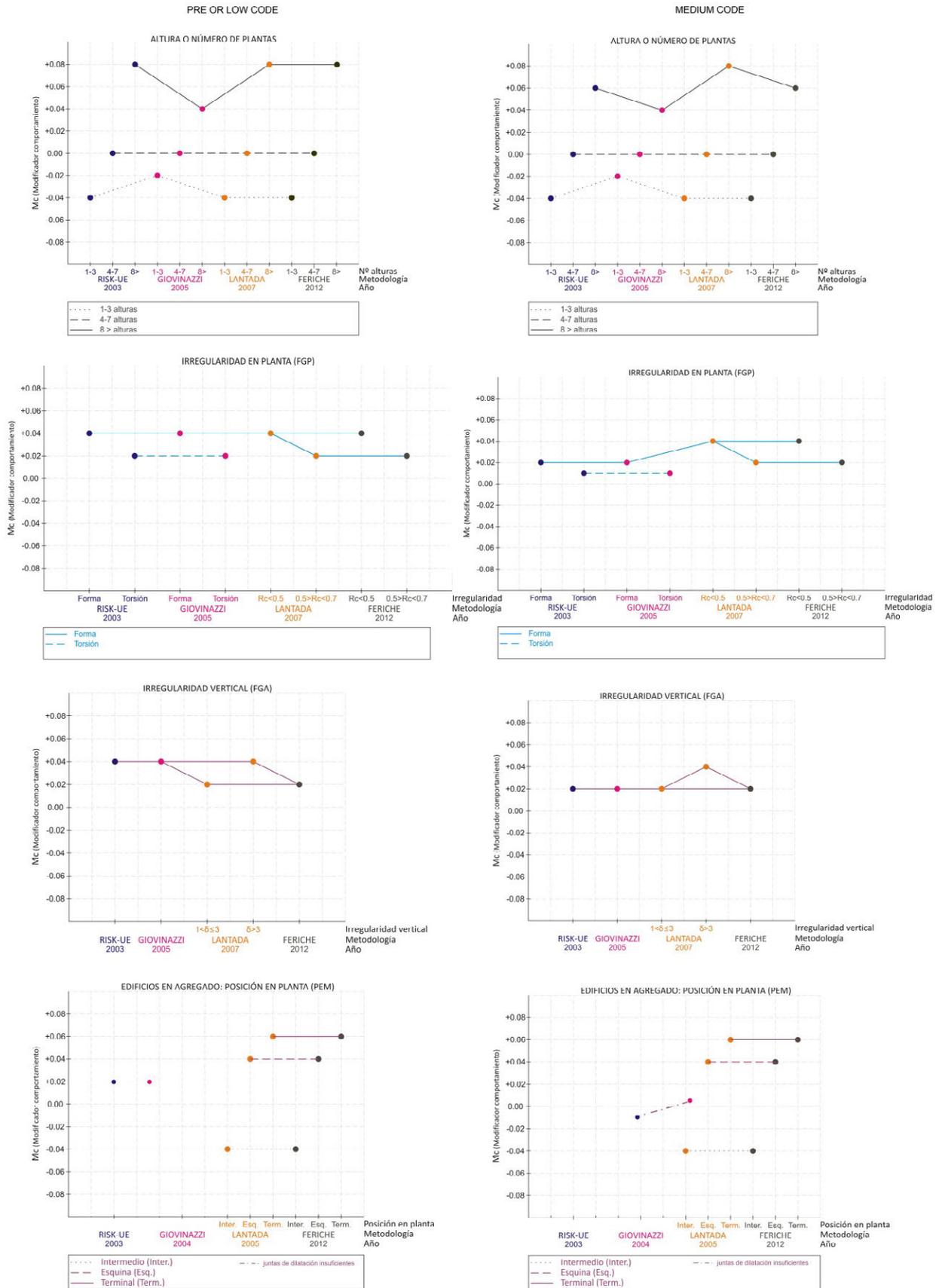


Figura 2.14A Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de hormigón armado (Risk-UE 2003, Giovinazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012)

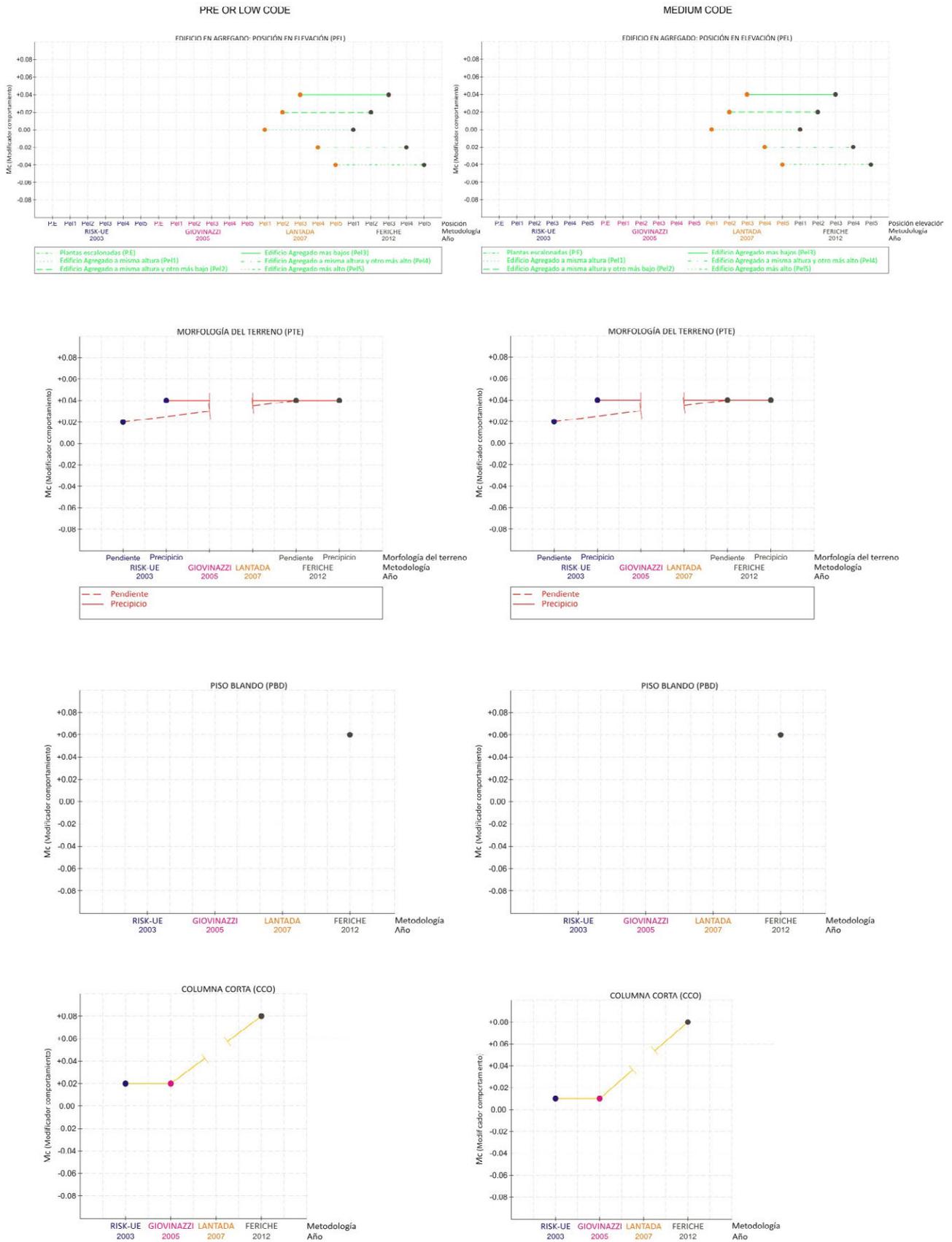


Figura 2.14B Análisis comparativo de la cuantificación de los modificadores por comportamiento en edificios de hormigón armado (Risk-UE 2003, Giovinnazzi 2005, Lantada 2007 y Feriche 2012)

2.4 NORMATIVA SISMORRESISTENTE

La norma sismorresistente es la norma para el diseño y construcción de edificios sismorresistentes (de aquí en adelante la llamaremos norma sísmica) y es el instrumento legal en que se establece oficialmente el conjunto de requerimientos mínimos exigibles con el fin primordial de salvaguardar las vidas humanas cuando ocurre un sismo. Las normas sísmicas consideran el control de la seguridad de los edificios individuales. Lamentablemente, el conjunto de la ciudad y su planeamiento urbanístico se ha descuidado en las normas sísmicas.

El objetivo principal de la mayoría de las normas sísmicas no es garantizar que los edificios no tengan daños durante un sismo, sino salvaguardar las vidas humanas. Como menciona la NCSE-02: “la finalidad última de estos criterios es la de evitar la pérdida de vidas humanas...”.

En la mayoría de las normas sísmicas no se incluyen todos los casos posibles de configuraciones, materiales y sistemas constructivos ni para el diseño de nuevos edificios ni para la remodelación o reparación de edificios existentes. La gama de materiales, sistemas constructivos y configuraciones que hoy en día se ofrece al diseñador, hace difícil la labor de tipificar cada una de las combinaciones posibles en el diseño de edificios singulares y aún más complicados considerar las numerosas combinaciones que se pueden presentar en la ciudad como un todo sistémico. Mucho menos se tiene en cuenta el problema del desempeño sismorresistente de la ciudad como un todo orgánico y resiliente (el enfoque sistémico ampliado), teniendo en cuenta aspectos económicos, sociales y políticos, que siguen siendo ignorados en las normas sísmicas. (Configuraciones urbanas en zonas sísmicas, Teresa Guevara 2012).

Los edificios existentes que conforman una ciudad no sólo tienen diferentes edades, sino que responden a una gama de usos, materiales y técnicas constructivas, desde las utilizadas en los tiempos antiguos, hasta las estructuras más modernas que utilizan técnicas y materiales desarrollados recientemente. En zonas sísmicas es difícil de establecer un patrón que contenga todas las soluciones posibles para la reducción de la vulnerabilidad sísmica de todos los tipos de edificios individuales, su relación con las otras estructuras de la ciudad y su aplicación en diferentes contextos.

Las disposiciones contenidas en cada norma sísmica se revisan periódicamente y pueden sufrir cambios significativos para adaptarlos a los avances en el estado de conocimiento, obtenidos de los estudios sobre las técnicas de diseño, el comportamiento de las estructuras y los nuevos materiales, y de las lecciones aprendidas de los sismos recientes.

Las normas sísmicas están pensadas y estructuradas para ser utilizadas por profesionales con niveles avanzados de conocimiento sobre el cálculo y diseño estructural de estructuras sismorresistentes, ingenieros estructurales. La comunidad científica internacional en el ámbito del diseño sismorresistente, la sismología y la ingeniería geotécnica, los académicos, las asociaciones de

profesionales y, en algunos casos, los legisladores y miembros del Poder ejecutivo local encargados de elaborar las normas sísmicas han contribuido al avance en el conocimiento del comportamiento sismorresistente de los edificios y, en algunos casos, de la ciudad. Todavía existe una resistencia a que los arquitectos e ingenieros de instalaciones (sanitarias, eléctricas y mecánicas) asuman su responsabilidad en el diseño de estructuras sismorresistente, y que los ingenieros estructurales acepten que la responsabilidad debe ser compartida y negociada con los otros profesionales que intervienen en el diseño y construcción de los edificios.

Con la creación de la Unión Europea (UE) se ha logrado formalizar los *Eurocódigos estructurales* con el fin de unificar las normas para ser utilizadas por todos los Estados miembro de la UE. Entre éstos se encuentra el Eurocódigo 8 de 1998 “*Proyecto para resistencia al sismo de las estructuras*”

NCSE-02

La norma actual de España NCSE-02 se basa en las normas de los países europeos, especialmente en los Eurocódigos estructurales antes mencionados, aunque en las últimas versiones han tomado en cuenta las lecciones proporcionadas por los sismos ocurridos en Chile y México en 1985, Armenia 1988, California 1989 y 1994, Japón 1995, Turquía y Taiwán 1999 y el nuevo enfoque de las normas sísmicas de EE.UU y Japón.

La norma sísmica española NCSE-02 (al igual que su predecesora NCSE-94) utiliza los métodos tradicionales de proyecto sismorresistente basados en la resistencia. En ella, la acción sísmica se caracteriza en términos de fuerzas mediante espectros elásticos de respuesta. Dichas fuerzas sísmicas de cálculo están reducidas en función de la ductilidad de la estructura. La NCSE-02 emplea el análisis modal espectral como método general de cálculo. Se trata de una norma centrada fundamentalmente en la verificación de la seguridad, es decir, en la consideración de un estado límite último en el que la estructura sometida al terremoto más severo esperable en la zona con una probabilidad razonable (terremoto de proyecto) no colapsa, pero puede sufrir daños estructurales que la norma califica de “..... más o menos importantes....” pero sin cuantificarlos. La norma no considera de forma explícita y directa otros estados límites orientados al control del daño, aunque indica en su articulado que los tiene en cuenta de forma indirecta a través de la limitación del valor máximo del coeficiente de comportamiento por ductilidad μ .

2.4.1 Concepción estructural de edificios

Dentro del marco conceptual en el que se encuentra esta tesis doctoral, la reciente publicación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia “guía para la definición de una estrategia antisísmica en el proyecto de edificios de nueva planta” en su apartado 7. Concepción estructural de los edificios, indica que la concepción estructural adecuada para un comportamiento correcto del edificio frente a las acciones sísmicas es un requisito fundamental que debe ser planteado desde el comienzo del proyecto, de forma simultánea a la concepción arquitectónica. Ello requiere una

interacción eficiente entre el equipo de arquitectura y, en su caso, los responsables del proyecto estructural.

Los aspectos particulares a tener en cuenta en la concepción estructural en el proyecto de una estructura de edificación en zona sísmica se pueden agrupar a partir de los requerimientos de la normativa. Los aspectos que se tratan a continuación están recogidos de forma más o menos expresa en el Capítulo 4 de la NCSE-02, de *Reglas de diseño y prescripciones constructivas en edificación*.

2.4.1.1 Configuraciones simétricas de elementos resistentes

En este Capítulo 4, se presenta una serie de prescripciones constructivas que deben cumplir todas las edificaciones a las que se aplique la norma. Se dan disposiciones de simetría, geometría y mecánica, disposiciones de masa y ubicaciones de los elementos resistentes. Respecto a los parámetros urbanísticos objeto de este estudio, la NCSE-02 especifica lo siguiente en su artículo 4.2.1:

- La disposición geométrica en planta será tan simétrica y regular como sea posible, tratando de conseguir en el edificio, en los elementos resistentes, y en los arriostramientos, una composición con dos ejes de simetría ortogonales.
- En edificios asimétricos se pueden conseguir estructuras simétricas separándolas en cuerpos regulares independientes mediante juntas verticales.
- Igualmente debe procurarse una disposición geométrica en alzado tan regular como sea posible, evitando las transiciones bruscas de forma o rigidez entre un piso y el siguiente.

En las siguientes Figura 2.15 se muestran algunas configuraciones irregulares en planta a evitar, preferentemente, en edificios en zona sísmica.

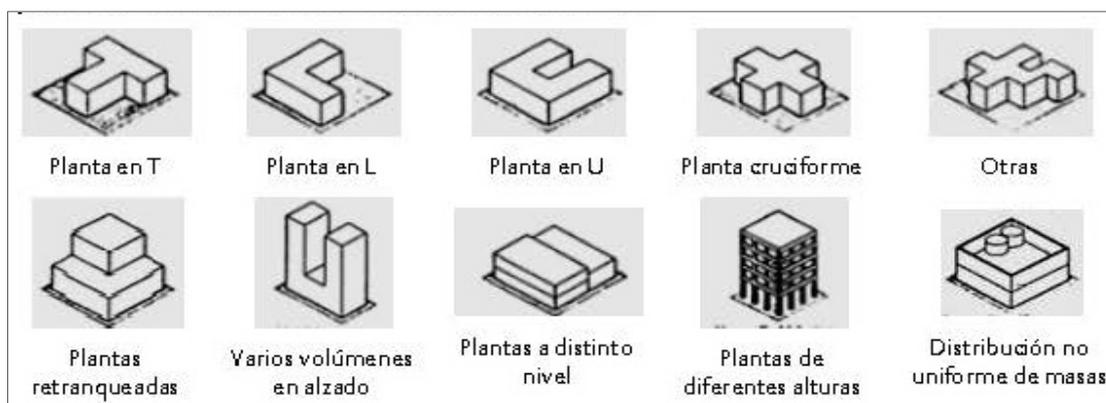


Figura 2.15 Configuraciones irregulares en planta (guía para la definición de una estrategia antisísmica en el proyecto de edificios de nueva planta, 2012)

La NCSE-02 establece además la necesidad de que, en edificios asimétricos, se eviten estos efectos disponiendo las correspondientes juntas de modo que los cuerpos independizados formen estructuras simétricas. Por otro lado la presencia de juntas implica la existencia de movimientos relativos entre las partes a un lado y otro de la junta, y esto requiere de espacio físico entre las partes

del edificio para absorber dichos movimientos, lo que refuerza el argumento de evitar las asimetrías en planta o, alternativamente, sugiere la conveniencia de que la estructura sea lo suficientemente rígida como para que los movimientos se minimicen en la medida de lo posible.

2.4.1.2 Rigidez y continuidad de la estructura vertical

En relación a los elementos verticales de la estructura, la NCSE-02 establece en su artículo 4.2.3 Disposición de elementos estructurales que “debe procurarse una distribución uniforme y simétrica de rigideces en planta y una variación gradual de rigideces a lo largo de la altura. Ningún elemento estructural debe cambiar bruscamente de rigidez”. Un caso típico de cambio de rigidez son las plantas bajas diáfanas en edificios de plantas superiores muy compartimentados.

Se debe evitar la falta de continuidad en la estructura vertical, así como cambios abruptos de rigidez, tal y como muestran los ejemplos gráficos de la Figura 2.16.



Figura 2.16 Falta de continuidad en la estructura vertical y cambios de rigidez (guía para la definición de una estrategia antisísmica en el proyecto de edificios de nueva planta, 2012)

CAPÍTULO 3

PLANEAMIENTO URBANÍSTICO EN ZONAS SÍSMICAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Las normativas sísmicas de los distintos países plantean la necesidad de dotar a los sistemas constructivos habituales de un método de cálculo que haga posible la siguiente premisa de partida “después de un fenómeno sísmico – de una intensidad no superior a la esperada estadísticamente – el edificio debe seguir permaneciendo en pie”. Uno de los vacíos que tiene la normativa sísmica es la ausencia de unas especificaciones sísmico-urbanísticas, la investigación dirigida a analizar la respuesta dinámica de las estructuras debe ir acompañada de una seria reflexión sobre las incorrectas tendencias urbanísticas que se aprecian en el diseño de los ensanches de las ciudades en áreas sísmicas.



Figura 3.1. Takahisa Enomoto. Daños en un complejo residencial en Dali, Taiwan, debido al sismo de Chi-Chi del 21 de septiembre de 1999 (*Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas*, 2012)

Existen toda una serie de decisiones que deben tomarse en la fase de redacción de los planes urbanísticos y que de ser inadecuadas gravaran de forma importante a las futuras construcciones. De acuerdo a Green, Norman B. (1980) recogiendo criterios ya generalizados dentro de la bibliografía sísmica y algunos aspectos procedentes de normas precursoras en este campo (por ejemplo, las peruanas), se podrían establecer inicialmente estos principios urbanístico-sísmicos:

1. En la urbanización de un conjunto situado en una zona sísmica no deben realizarse modificaciones importantes en la topografía original. Es más lógico forzar la pendiente de los viales que proyectar un sistema de desmontes y terraplenes que aumente la altura de los taludes naturales y disminuyan su seguridad. Deberán evitarse los rellenos artificiales.
2. No deben considerarse como solares edificables aquellos que:
 - por tener el subsuelo heterogéneo pueden inducir aceleraciones diferenciales entre distintos puntos de la cimentación del edificio
 - se encuentren próximos o sobre grandes fallas naturales
 - se encuentren próximos o sobre grandes taludes naturales o artificiales.
3. La densidad de población en las zonas urbanas sísmicas debe ser lo más baja posible, con amplios espacios próximos accesibles sin atravesar circulación rodada, que permitan refugiarse caso de presentarse un seísmo de un grado inusitado.
4. El tipo de edificio a construir (forma y estructura) debe determinar una rigidez del mismo lo más lejana posible de la del suelo. Sobre suelos deformables (cuaternarios, medios y blandos) los edificios más apropiados son los bajos y rígidos. En suelos duros (rocas y suelos terciarios) se absorberán mejor los impactos si los edificios son altos y flexibles.

5. La forma en planta de los edificios, debe ser lo más regular posible, es decir, su organización debe ser simétrica o casi. Son desaconsejables, por tanto, las plantas de formas en L, T, U, Z y otras análogas.

Si tales disposiciones son necesarias, es aconsejable independizar los distintos cuerpos de la construcción mediante juntas de un grosor adecuado. Cuando dos edificios próximos tengan distinta altura y/o distinta rigidez, deberá arbitrarse una junta de independización que evite el impacto entre ambos durante la vibración diferenciada de los mismos.

Por uno y otro motivo es necesario que el desarrollo de núcleos urbanos en régimen de medianería se realicen a partir de construcciones absolutamente homogéneas: en sistema constructivo, en altura y en uso. Cuando esta homogeneidad no sea posible, es totalmente inviable este modelo urbanístico y, por lo tanto, las construcciones deben realizarse aisladas o dotadas de juntas de amplitud suficiente. En casi todas las normas se expone un método de dimensionado de estas juntas.

6. En zonas sísmicas, no es conveniente que las construcciones individuales o un conjunto de las mismas, en régimen de medianería, tengan una longitud superior a los 60 m ya que cualquier heterogeneidad del suelo o de la vibración (por ejemplo, ecos por variación de los estratos profundos o la proximidad de grandes sótanos o de laderas) puede ocasionar movimientos diferenciales de consideración.
7. Debe procurarse que la distribución de las masas sea lo más uniforme posible, lo que se consigue cuando las distintas plantas tienen una organización y usos parecidos. Debe evitarse la acumulación de masas hacia la coronación del edificio. Por este motivo son desaconsejables las plantas inferiores diáfanos y la disposición de piscinas y depósitos en las terrazas superiores de los edificios.
8. En el diseño de las instalaciones urbanas y en el de su conexión a los edificios, deben preverse empalmes que permitan absorber, sin desorganizarlos, los importantes movimientos diferenciales que se aplican durante el sismo.

Todos estos principios urbanísticos nos darían lugar a ciudades que podrían ser consideradas óptimas en el diseño sismorresistente. En este apartado de la memoria vamos a describir el marco legal del planeamiento urbanístico en España. Realizaremos un primer estudio general de la Ordenación Territorial y urbanística, los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) y los parámetros urbanísticos que se determinan en las Normas Urbanísticas de un Plan General. Posteriormente analizaremos el Plan General de Ordenación Urbana de Lorca, sus Normas Urbanísticas y las Normas complementarias para facilitar el realojo, la reconstrucción y reparación de inmuebles afectados por acciones sísmicas y catastróficas redactadas con posterioridad al terremoto del 11 de mayo de 2011 en Lorca. Tras este estudio seremos capaces de identificar

aquellos parámetros urbanísticos que definen las Normas Urbanísticas de un PGOU y que pueden ser susceptibles de aumentar la vulnerabilidad sísmica de las ciudades. Una vez identificado los parámetros, haremos un análisis descriptivo basándonos en los estudios realizados por Guevara, 2012. Con estos conceptos y los descritos en la parte de ingeniería sísmica, tenemos el estado del conocimiento necesario para desarrollar una metodología que permita reducir la vulnerabilidad de las ciudades. Posteriormente, en esta tesis doctoral, esta metodología se aplicará y calibrará en la ciudad de Lorca.

3.2 ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

Toda ordenación territorial y urbanística, es decir de planeamiento, debe regirse por unos principios básicos de desarrollo territorial y urbano sostenible, de función social de la propiedad evitando la especulación y de aplicación del régimen jurídico a cada clase de suelo, de protección del medio ambiente y del medio físico natural, de protección, rehabilitación y mejora del medio urbano, de dirección y control por los poderes públicos, de discrecionalidad, justificación y motivación, de no indemnizabilidad, de participación de la comunidad de las plusvalías generadas y de equidistribución de cargas y beneficios, de información y participación y de fomento de la participación privada.

El término Ordenación del Territorio es relativamente reciente en la literatura científica española, pudiendo remontar su origen a 1960. Según la Carta Europea de la Ordenación del Territorio (CEMAT: 1983), la Ordenación del Territorio es la expresión espacial de la política económica, social, cultural y ecológica de toda la sociedad.” Por su parte, el Urbanismo, podría definirse como el “arte de proyectar ciudades”, es una disciplina que se ocupa de la ordenación de la ciudad. Tratando de esquematizar las diferencias entre ordenación del territorio y urbanismo, pueden apuntarse las siguientes:

- *Por su ámbito de aplicación*, la ordenación del territorio tiene un ámbito de aplicación básicamente autonómico, regional o subregional (también estatal o europea), mientras que el urbanismo es de aplicación básicamente municipal o inframunicipal.

- *Por su ámbito administrativo*, la ordenación del territorio es de competencia esencialmente de los órganos de las Comunidades Autónomas, provinciales o insulares, mientras que el urbanismo en cuanto a la planificación y ejecución es de competencia esencialmente municipal o local (aunque la aprobación definitiva del planeamiento pueda corresponder a las Comunidades Autónomas).

- *Por su finalidad*, la ordenación del territorio establece directrices que habrán de ser tenidas en cuenta en la redacción del planeamiento general municipal, mientras que la finalidad del urbanismo básicamente se encuadra en el modelo territorial local.

- *Por su contenido*, la ordenación del territorio tiene un contenido integral, básico, económico, social, cultural, etc. Da las grandes magnitudes de la estructura del territorio y trata de obtener un

desarrollo equilibrado de las regiones. El urbanismo, sin embargo, aunque tiene similares contenidos materiales es esencialmente de ámbito local y preciso.

- *Por su eficacia*, la ordenación del territorio produce una vinculación esencialmente pública, es fundamentalmente un conjunto de directrices y criterios que vinculan a otras administraciones públicas. El urbanismo es concreto y afecta directamente al derecho de propiedad privada del suelo, por lo que vincula a los propietarios y a las Administraciones Públicas.

- *Por su jerarquía*, la ordenación del territorio está en un plano superior respecto del urbanismo. El urbanismo está por debajo, como una planificación sectorial de ella y coordinado por aquella.

Los elementos del medio natural que se deben tener en cuenta en la metodología de la ordenación territorial son: el suelo, el subsuelo, el agua, la vegetación y el paisaje. Serían los geológico-geotectónicos, hidrológicas y topográficos del terreno los que afectan a la peligrosidad sísmica al modificar la señal sísmica e influyen en el daño sísmico de las edificaciones.

3.2.1 Geología superficial. Efecto local o de sitio

A la hora de planificar ciudades en zonas sísmicas los planos geológicos, geotectónicos y topográficos son muy importantes, ya que gracias al estudio de los terremotos que han afectado a zonas urbanas, se ha comprobado que existe una amplificación de las ondas sísmicas (en un rango de frecuencias) en terrenos blandos, sobre todo en caso de gran potencia, en relación a las registradas en roca dura, fenómeno conocido como *efecto local o de sitio*. La presencia de terrenos blandos implica un incremento de los valores máximos del movimiento en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento (PGA, PGV y PGD), una variación en los valores alcanzados de estos parámetros en diferentes rangos de frecuencias, y también un aumento en la duración de la sacudida sísmica (SISMOSAN, 2007). Así, las variaciones locales de las condiciones del suelo, y por tanto, de las características dinámicas del terreno, pueden conducir a diferencias espaciales de la intensidad y pueden tener una influencia notable en el nivel de daños, incluso para terremotos moderados (Navarro et al., 2000; Feriche et al., 2006).

El parámetro más importante que caracteriza la amplificación de las sacudidas sísmicas en un lugar es la *velocidad de las ondas de cizalla (V_s)* de las capas más superficiales del terreno (Tiedemann, 1992). La velocidad de la onda S es un factor que se utiliza como índice de resistencia, densidad y compactación, y ha sido uno de los factores más estudiados en los últimos años, comprobándose que la variación en los valores de la respuesta sísmica local estaba en muchos casos asociada a variaciones laterales de la velocidad de las ondas de cizalla en la superficie (Zaré et al, 1999, Álvarez-Rubio et al, 2004).

Esto hace que sea muy importante estudios específicos en zonas de riesgo sísmico que tengan en cuenta los efectos locales y la influencia que tendrán en el comportamiento dinámico de las

estructuras allí construido, además de las características de las mismas. En los últimos años ha habido una gran proliferación de trabajos que han descrito como las propiedades físicas de los materiales geológicos bajo el lugar de registro modifican significativamente el contenido espectral del movimiento del suelo registrado en ese lugar. Se ha comprobado que el movimiento del suelo durante un terremoto puede ser amplificado por las condiciones locales del terreno (Bard, 1999) y son muchos los ejemplos de terremotos destructores donde la geología superficial de un área urbana ha influido notablemente en el nivel de la sacudida sísmica, amplificando ciertos rangos de frecuencias (Seed et al., 1985; Towhaka y Roteix, 1988; Okada et al, 1991; Field, 1996). Así, la distribución de los daños ocasionados por un terremoto en un lugar está fuertemente influenciada por las características dinámicas del suelo, sobre todo en el rango de periodos que coinciden con el periodo de vibración de las estructuras dañadas (Navarro et al., 2000, 2005, 2007).

3.2.2 Caracterización del terreno en los Códigos Sísmicos

Tal es la importancia de la influencia del suelo en la modificación de las características de la acción sísmica, que entre las mejoras introducidas recientemente en los códigos sísmicos de construcción, tanto nacionales como europeos, figuran la inclusión de nuevos tipos de suelo y la de parámetros ligados a la amplificación sísmica debido a ellos, tal y como refleja, la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) y el Eurocódigo 8 (2004).

La caracterización del terreno es un factor clave en la definición de la acción sísmica de cálculo, dado que la sollicitación en cada sección de la estructura dependerá, entre otros parámetros, de efectos locales asociados al terreno que alteran en mayor o menor medida las características de las ondas sísmicas. Como se ha comentado antes, en general la intensidad sísmica aumenta en lugares de suelos menos compactos, donde suelen concentrarse los mayores daños.

3.2.2.1 Clasificación del terreno según la NCSE-02.

La Norma de Construcción Sismorresistente clasifica en su artículo 2.4 los terrenos en función de las características de los 30 primeros metros, la velocidad de la ondas S, la resistencia a la penetración en ensayos estáticos o dinámicos para terrenos granulares, los valores de resistencia a compresión simple para terrenos cohesivos y su coeficiente del terreno C, que depende de sus características en los 30 m más superficiales (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Clasificación del terreno propuesto por la NCSE-02

Tipo de terreno	Descripción Geológica	Vs (m/s)	Nspt	Resistencia a compresión	Coficiente terreno (C)
I	Roca compacta, con suelo cementado o granular muy denso.	> 750	>40	>20MPa	1,0
II	Roca muy fracturada, suelos granulares densos o cohesivos duros.	750 - 400	20-40	200KPa-20MPa	1,3
III	Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme.	400 - 200	10-20	100-200 KPa	1,6
IV	Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando.	<200	<10	<100KPa	2,0

3.2.2.2 Clasificación del terreno según el EC-8.

El Eurocódigo establece, que en el lugar del emplazamiento de la construcción no deberían presentar riesgos de ruptura del terreno, de inestabilidad de taludes, y de asentamientos permanentes causados por la licuefacción o la densificación del terreno, en caso de terremoto. Además señala que, dependiendo de la importancia de la estructura, será necesario o no, realizar un estudio del terreno.

El Eurocódigo 8 define cinco tipos de terrenos, que pueden ser empleados para tener en cuenta la influencia de las condiciones locales del terreno, en caso de una acción sísmica. En la siguiente Tabla 3.2 se muestra la clasificación:

Tabla 3.2. Clasificación del terreno propuesto por el EC8

Tipo de terreno	Descripción Geológica	Vs (m/s)	Nspt (Golpes/30cm)	Resistencia a compresión
A	Roca u otra formación geológica similar a roca, incluyendo como máximo 5 m de material más débil en superficie.	>800	-	-
B	Depósitos de arena muy densa, gravas, o arcilla muy dura, de al menos, varias decenas de metros de espesor caracterizado por un incremento de las propiedades mecánicas en profundidad.	360-800	>50	>250
C	Depósitos profundos arena densa o de densidad media, grava o arcilla dura con un espesor de unas decenas de metros hasta muchos centenares de metros.	180-360	15-50	70-250
D	Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo, con o sin algunas capas de débil cohesión, o de suelo de ligera a gran cohesión predominantemente	<180	<15	<70
E	Un perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial con valores de Vs de tipo C o D, y con un espesor entre 5 y 20 m, encima de un material duro De Vs > 800 m/s.			
S ₁	Depósitos consistiendo o conteniendo una capa de 10 m de espesor como mínimo, con arcillas/limos blandos con un índice de plasticidad alto (IP>40) y un alto contenido de agua.	<100 (indicativo)	-	10-20
S ₂	Depósitos de suelos licuefactables, arcillas sensibles, o cualquier otro perfil no incluido entre los tipos A a E o S1			

Con esta clasificación del suelo, se generan mapas de microzonificación o microzonación sísmica que son muy útiles en zonas de riesgo sísmico. Estas cartografías sirven como instrumento para:

- a) establecer parámetros locales para el diseño urbano y el diseño de nuevos edificios
- b) identificar las áreas apropiadas para la ubicación de los nuevos edificios esenciales (edificios hospitalarios, escolares, de telecomunicaciones, cuarteles de bomberos y otros) y líneas vitales (plantas de energía, acueductos, redes de servicios, agua, luz, gas y otros)
- c) evaluar las condiciones sismorresistentes de los edificios existentes en la zona para la estimación de los diferentes niveles de vulnerabilidad
- d) identificar el grado de riesgo de desastres en las microzonas, para definir si es necesaria la aplicación de medidas restrictivas como la prohibición de construcción y la reubicación de edificios

e) estudiar el potencial probable de daño para elaborar planes de riesgo y de contingencia para un eventual sismo

3.3 PLANEAMIENTO URBANÍSTICO

Los Planes Urbanísticos vienen a constituir verdaderas normas jurídicas que concretan las determinaciones de las Leyes Urbanísticas para cada punto específico del territorio. Constituyen prolongaciones de la Ley, por lo que tienen carácter reglamentario, y su existencia es imprescindible para la puesta en práctica de la misma.

Es evidente que la Ley no puede regular de forma individualizada las determinaciones de cada una de las parcelas del territorio, y por ello necesita ser desarrollada mediante un sistema de planeamiento que en definitiva, constituye una aplicación real y concreta para cada punto del territorio de los preceptos de la Ley.

El sistema de planeamiento está compuesto por Planes. Sin embargo dichos Planes están relacionados entre sí formando una estructura que compone el sistema. Cada Plan tiene una misión dentro de esa estructura, en la cual se articulará y coordinará con los demás mediante una serie de relaciones de orden entre ellos.

La estructura del sistema de planeamiento urbanístico es un elemento fundamental para el buen funcionamiento del sistema, valorándose positivamente aspectos como su flexibilidad, operatividad y coordinación.

Los agentes del planeamiento lo constituyen las Administraciones Públicas, los propietarios del suelo, que ven limitado y concretado mediante el planeamiento su derecho de propiedad y, en general, todos los ciudadanos, que viven en la ciudad generada por este planeamiento.

Los Planes Urbanísticos son los instrumentos que la Ley prevé para establecer las diversas determinaciones del Planeamiento. La palabra Plan tiene su origen en la palabra plano, aludiendo al contenido gráfico característico de estos documentos. Los instrumentos de planeamiento están estructurados de forma jerárquica, para el caso español en la cúspide figuraba el Plan Nacional de Urbanismo, instrumento que no se llegó a desarrollar nunca pero que se reflejaba en anteriores legislaciones. A nivel regional, estarían los Planes Estratégicos Territoriales, denominados de muy diversas formas por las legislaciones de las Comunidades Autónomas, estos planes proporcionan directrices de ordenación y estrategia para un ámbito superior al del término municipal. Así se llega hasta los planes municipales donde se encuentran, básicamente, los Planes Generales de Ordenación Urbana y las Normas Subsidiarias de Planeamiento Municipal, éstos regulan la ordenación urbanística de manera global abarcando todo un término municipal completo y fijando una ordenación estructurante. Finalmente existen otros planes que concretan y desarrollan la ordenación estructurante de los anteriores tales como Planes Parciales, Programas de Actuación

Urbanística, Planes de Sectorización, Planes Especiales y Estudios de Detalle, las Comunidades Autónomas utilizan en sus legislaciones distintas denominaciones para referirse a estos planes. En la Figura 3.2 se ha realizado un esquema con los distintos tipos de planes, su ordenación, determinaciones y desarrollo.

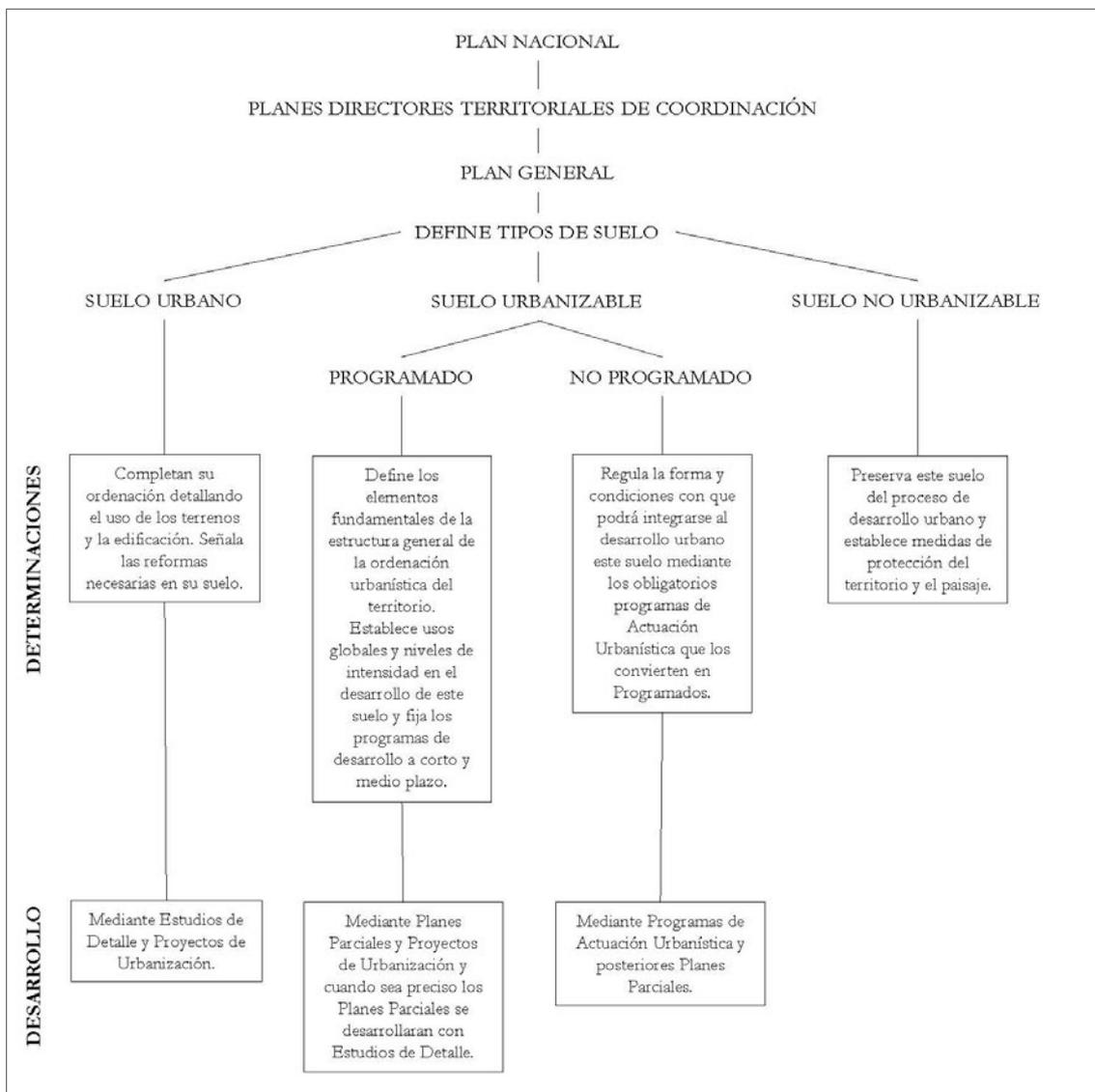


Figura 3.2. Cuadro de tipos de planes (Manual de planeamiento Urbanístico, 1998)

3.3.1 Plan General de Ordenación Urbana

El Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) constituye la figura básica del planeamiento municipal. La legislación define los Planes Generales de Ordenación Urbana como instrumentos de ordenación integral del territorio de uno o varios términos municipales (art. 70 TR, 1992), abarcará términos municipales completos y tendrán por objeto principal la clasificación del suelo y el establecimiento de las determinaciones estructurantes y, en su caso, pormenorizadas. El Plan General establecerá sobre la totalidad del término municipal todas las determinaciones estructurantes de la ordenación urbanística, para lo cual, entre otras determinaciones, adscribirá el

suelo municipal a algunas de las clases y categorías de suelo, establecerá las condiciones básicas de ordenación y definirá las redes públicas supramunicipales y generales de infraestructuras, equipamientos y servicios públicos justificando su suficiencia y funcionalidad.

3.3.1.1 Objetivos generales y específicos del Plan General

Los objetivos generales que constituyen la función primordial del plan (art. 70.1 TR, 1992) son:

- La clasificación del suelo para la vinculación del mismo a un destino urbanístico básico y al régimen jurídico correspondiente.
- La definición de los elementos fundamentales de la estructura general adoptada para la ordenación urbanística del territorio.
- El establecimiento de un programa para su desarrollo y ejecución, así como el plazo mínimo de vigencia de sus determinaciones.

La clasificación del suelo, es una técnica por la cual se divide el territorio en distintas clases de suelo, estas son: Suelo Urbano, Suelo Urbanizable o Suelo Apto para Urbanizar y Suelo No Urbanizable o Rural; las distintas legislaciones urbanísticas adoptan distintas denominaciones para referirse a las distintas clases de suelo estableciendo un régimen jurídico específico para cada una de ellas.

Al objeto de acotar con mayor precisión los objetivos urbanísticos del Plan, la Ley complementa el enunciado de las funciones básicas del Plan General con una serie de objetivos específicos de planeamiento (arts. 71 TR, 1992 y 16, 17 y 18 RP, 1978) que matizan el comportamiento diferencial del Plan en cada una de las clases de suelo.

3.3.1.2 Determinaciones urbanísticas generales

La Ley no se limita a formular un sistema de objetivos, sino que establece adicionalmente una enumeración pormenorizada de las determinaciones que ha de contener un Plan General, distinguiendo aquellas que corresponden a los objetivos de carácter general, de aquellas otras de carácter complementario y específico para cada clase de suelo.

Se pueden agrupar las previsiones legales en los siguientes conceptos:

- a) Determinaciones sobre la estructura general y orgánica del territorio (art.25 RP, 1978).
- b) Determinaciones sobre la clasificación del suelo (arts. 20-24 RP, 1978).
- c) Determinaciones sobre delimitación de Áreas de Reparto de beneficios y cargas (cap. 2 TR, 1992).
- d) Determinaciones sobre programación temporal de las previsiones de planeamiento (art. 26 RP, 1978).
- e) Determinaciones sobre protección del medio ambiente natural y urbano.

Dentro de las determinaciones específicas que debe contener el plan en cada clase de suelo, en el suelo urbano la Ley establece necesario las siguientes determinaciones: a) delimitación de su perímetro, b) asignación de usos y tipologías pormenorizadas y niveles de intensidad correspondientes a las diferentes zonas, c) delimitación de espacios libres y dotaciones y d) trazado y características de la red viaria y servicio de infraestructuras.

3.3.1.3 Contenido documental del Plan General. Normas Urbanísticas

Los documentos para el diseño legal del Plan General, en los que deben plasmarse las determinaciones generales y específicas son la Memoria y estudios complementarios, las Normas Urbanísticas, el Programa de Actuación, el Estudio Económico Financiero y los documentos gráficos.

Las Normas Urbanísticas constituyen el núcleo clásico de la ordenación urbanística formulada por el Plan. Enlazan la ordenación planimétrica de los terrenos y las ordenanzas o regulación de la edificación.

La organización más frecuente de la Normas Urbanísticas se estructura en los siguientes aspectos:

- Disposiciones generales, referidas a la vigencia, contenido y efectos del Plan; condiciones de su desarrollo y ejecución y de su modificación o revisión.

- Régimen de las distintas clases de suelo.

En Suelo Urbano se establece que las Normas tendrán el carácter de las tradicionales Ordenanzas de Uso del Suelo y Edificación, comprendiendo la reglamentación detallada de los usos pormenorizados, volumen, condiciones higiénico-sanitarias de los terrenos y construcciones y características estéticas de la ordenación, de la edificación y de su entorno. En Suelo Urbanizable Programado el objeto de las Normas se circunscribe al establecimiento del régimen general de los distintos usos del suelo, a la definición de las características de los Sistemas Generales y a la fijación de las condiciones mínimas de los servicios e infraestructuras. En el Suelo Urbanizable No Programado las determinaciones normativas se refieren al establecimiento del régimen de los usos del suelo, a la fijación de las características, magnitudes y dotaciones mínimas de las actuaciones integradas, así como a la definición del concepto núcleo de población, ya que en tanto no se programen las actuaciones del régimen de suelo es asimilable al de No Urbanizable.

- Parámetros y condiciones generales de la edificación, contemplando la definición de los conceptos básicos de las regulaciones tales como las condiciones de parcela y de la posición del edificio en la misma, las condiciones de edificabilidad y aprovechamiento, las condiciones de volumen, forma, calidad e higiene de los edificios, etc.

- Condiciones de los usos, estableciendo qué categorías se contemplan como se definen y bajo qué condiciones se regulan. Habitualmente se definen como usos básicos el residencial, industrial,

terciaria (oficinas y comercial), dotacional y espacios libres. Cada una de estas grandes clases puede a su vez desglosarse y matizarse en tipologías muy diversas en función de las intenciones de ordenación del Plan. Ahora bien, estas categorías no deben confundirse con las tipologías edificatorias. Así por ejemplo, la residencia puede dividirse en razón al uso en colectiva y unifamiliar comunitaria y, en razón al sistema de ordenación en abierta o cerrado, aislado o adosado, etc.

- Sistemas reguladores en Suelo Urbano. Regulación de la ordenación y de la edificación de las áreas morfológicamente diferenciadas, contemplando los diversos valores de los parámetros físicos de la edificación en función del sistema de ordenación característico, así como los usos permitidos, prohibidos y compatibles en cada zona.

-Regulación específica de las áreas remitidas a planeamiento de desarrollo (Planes Especiales de Sistemas, PERIs, Planes Parciales y Estudios de Detalle), que suelen adoptar el carácter de fichas de especificaciones de carácter particular, tanto de orden morfológico, como relativas a los sistemas reguladores y usos admisibles y regulación de aquellas áreas en las que el Plan asuma – con eventuales alteraciones-el planeamiento anteriormente vigente.

Como puede verse, a través de las Normas Urbanísticas de un Plan General se puede controlar la utilización de configuraciones arquitectónicas que contribuyan a aumentar la vulnerabilidad sísmica de los edificios en las ciudades ubicadas en zonas sísmicas.

Diversos aspectos de la planificación urbana y arquitectónica de la ciudad han sido identificados como causa importantes de su vulnerabilidad cuando se encuentran ubicadas en zonas que han sido identificadas como sísmicamente activas. Las disposiciones de las Normas Urbanísticas y las Normas Sanitarias para el diseño de edificios y espacios circundantes tienen una gran influencia en la generación de configuraciones peculiares, arquitectónicas y estructurales, de edificios singulares, que son consideradas como irregulares en el diseño sismorresistente. Por ello para poder estudiar los posibles mecanismo de reducción de vulnerabilidad sísmica en las ciudades se estudian cuáles son los parámetros urbanísticos que aumentan la vulnerabilidad y se pueden regularizar en las Normas Urbanísticas de un Plan General (tipo de edificación, ubicación de la edificación en la parcela...) y así poder dar recomendaciones en la redacción de Normas Sísmico-Urbanísticas.

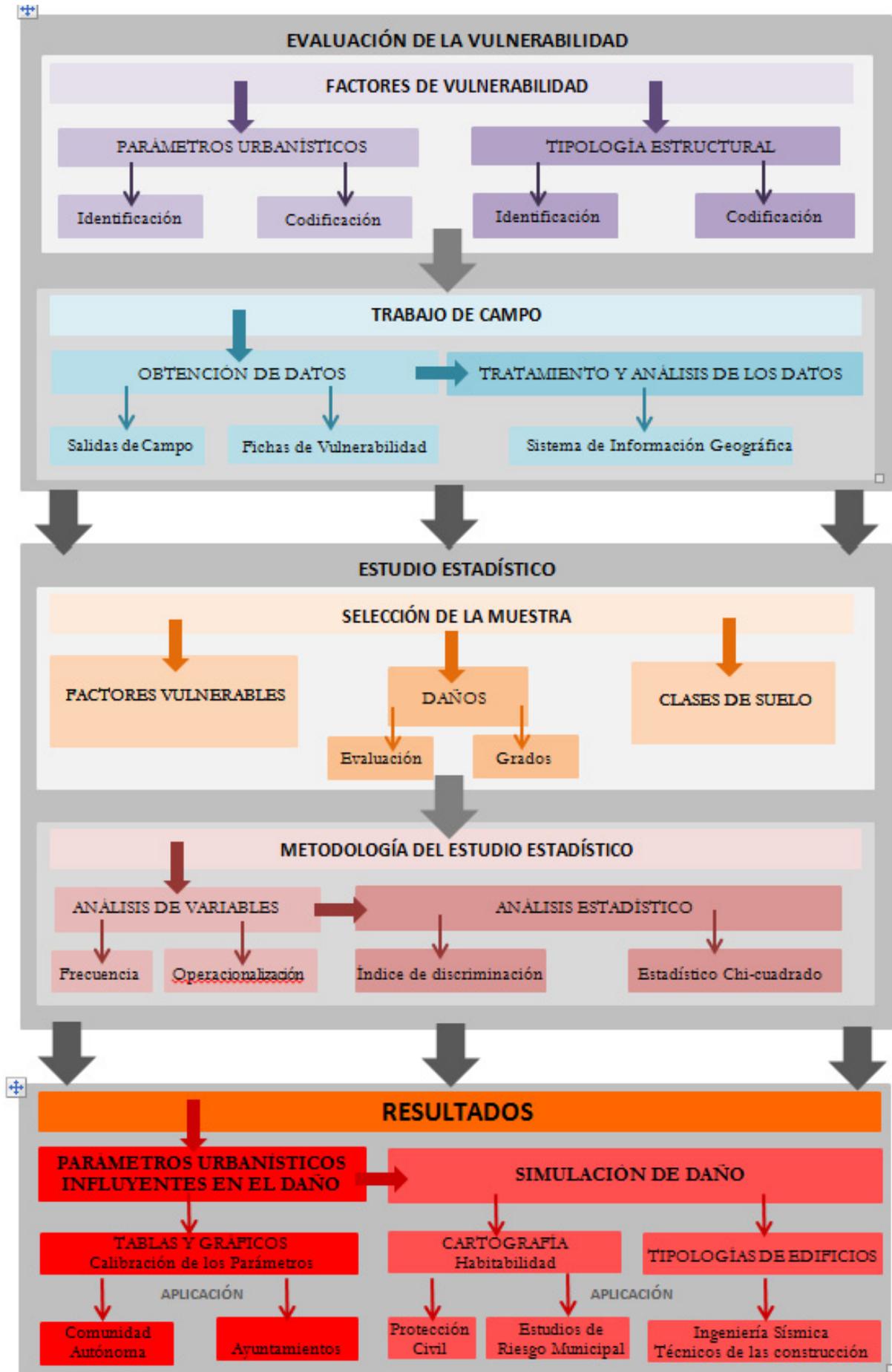
CAPÍTULO 4

LÍNEA METODOLÓGICA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a describir el flujo de trabajo y la línea metodológica desarrollada en esta tesis doctoral. Como hemos visto en los capítulos anteriores, en las distintas metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, existen unos modificadores por comportamiento que afectan a la vulnerabilidad de los edificios, independientemente de su estructura. Estos modificadores se definen y calibran. A nosotros nos interesan, en esta línea de investigación los modificadores que podemos regular en las normas urbanísticas de las ciudades. El primer punto de partida de esta línea metodológica será identificar, definir y posteriormente calibrar los parámetros urbanísticos que afectan a la vulnerabilidad de los edificios y por consiguiente modifiquen el daño tras un terremoto.

La línea metodológica se divide en tres bloques (ver esquema de la página siguiente). El primer bloque, evaluación de la vulnerabilidad, identifica y codifica los parámetros urbanísticos y constructivos que se deben de tener en cuenta a la hora de definir la vulnerabilidad sísmica de un edificio para posteriormente realizar un trabajo de campo donde se obtendrán los datos que se implementarán en un Sistema de Información Geográfica. El bloque segundo del estudio estadístico selecciona una muestra válida sobre la que se realiza el análisis estadístico. El último bloque de resultados, identifica los parámetros urbanísticos que tienen una mayor relación con el daño, y con la unión de los que mayor correlación tienen, se obtiene una simulación de daño.



4.2 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Las dos partes que definen este bloque son la identificación y calibración de los Factores vulnerables, en este caso los parámetros urbanísticos y el marco teórico previo a la aplicación del trabajo de campo con la ejecución de las fichas de vulnerabilidad para obtener datos y la preparación de un SIG para posteriormente tratar y analizar los datos.

4.2.1 PARÁMETROS URBANÍSTICOS IRREGULARES DESDE UNA PERSPECTIVA ANTISÍSMICA

A continuación se describen las irregularidad en las configuraciones de los edificios, que se generan debido a concepciones arquitectónicas y urbanas establecidas internacionalmente y su influencia en la generación de vulnerabilidad sísmica de la ciudad como un todo, basándonos en los estudios realizados por (Guevara Pérez, 2012).

4.2.1.1 Irregularidad geométrica en planta

Desde comienzos del siglo XX se ha considerado que las edificaciones con plantas irregulares, es decir, las plantas geométricas con áreas entrantes de dimensiones significativas, influyen de manera representativa en la vulnerabilidad de las edificaciones. Durante años se ha observado que cuando ocurre un sismo, dichas edificaciones generalmente sufren más daño que aquellas que tienen una forma regular en planta y cuyas dimensiones y proporciones están dentro de un determinado rango.

Por este motivo este parámetro se debe analizar al estudiar la vulnerabilidad sísmica urbana de la ciudad. Se considera como planta irregular la unidad constructiva que carece de alguna de estas tres propiedades geométricas:

- ✓Convexidad
- ✓Simetría
- ✓Proporciones y dimensiones

A continuación se explican de forma detallada estas propiedades geométricas para poder identificar las irregularidades geométricas en planta en una ciudad.

a) Propiedad geométrica de convexidad

Con esta propiedad se puede identificar la presencia de áreas entrantes o retranqueos, que generan varios volúmenes o cuerpos rectangulares, los cuales se acoplan en direcciones diferentes para conformar una sola unidad estructural. Entendiendo por geometría rectangular, aquella en el que los lados de las áreas entrantes se unen ortogonalmente, como por ejemplo, las que se asemejan a las formas de +, H, T, L y U y sus combinaciones, que al mismo tiempo pueden ser simétricas o no.

Estas áreas entrantes o retranqueos determinan la condición de *no convexidad*. Por lo tanto, las formas geoméricamente irregulares proyectadas sobre los planos horizontales están representando

polígonos *no convexos*. Según, Teresa Guevara, 2012 “no se debe confundir el término *no convexo* con el término *cóncavo* comúnmente utilizado en óptica para definir la cara interior de una superficie curva. El término utilizado en geometría para definir una figura que no cumple con las características para ser convexo no es cóncavo sino *no convexo*”. Un polígono es convexo cuando todos los segmentos que unen un par de sus puntos, están completamente dentro de su perímetro. Mientras que un polígono no convexo, es aquel en el que no todos los segmentos que unen un par de sus puntos interiores están completamente dentro de la figura sin cortar su perímetro. A continuación se muestra la Figura 4.1 en la que se ilustra unidades constructivas con esta característica.

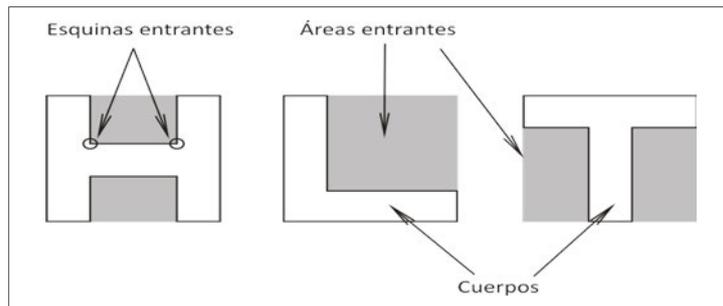


Figura 4.1 Unidades constructivas con áreas entrantes (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

En estas situaciones, las unidades constructivas que presentan esquinas entrantes definen los puntos de unión de los diferentes cuerpos y estas son las zonas en las que se va a concentrar más esfuerzo en el momento de producirse un sismo.

Cuando se produce un terremoto y vibra el terreno, cada uno de estos cuerpos que están unidos para formar una única unidad constructiva, oscila en dirección y con frecuencia diferente con relación uno al otro, debido a sus propias características dinámicas y su orientación con relación a la relación predominante del movimiento del terreno. Aunque las características de la unidad constructiva sean las mismas, es decir, tengan la misma estructura y los mismos materiales, el cuerpo cuyo eje longitudinal es paralelo a la dirección predominante del movimiento del terreno se desplazaría, pero teóricamente no sufriría mayores rotaciones, mientras que en el cuerpo cuyo eje longitudinal es perpendicular a la dirección predominante del movimiento se podría producir una rotación y un desplazamiento, llegando a provocar una ruptura entre ambos cuerpos.

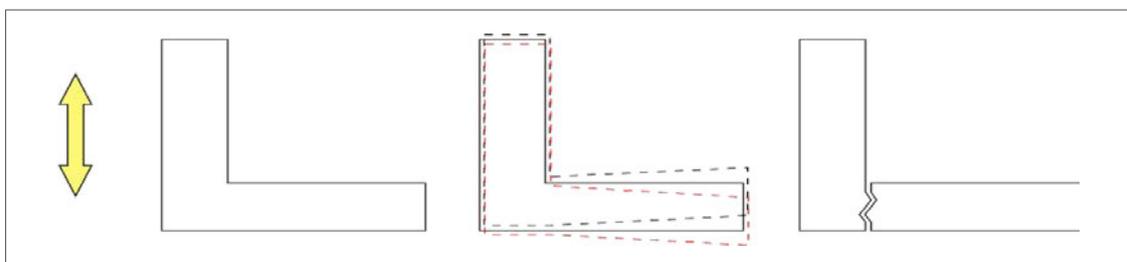


Figura 4.2 Fractura entre ambos cuerpos dirección del movimiento N-S (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

En la Figura 4.2 se muestra como una unidad constructiva en forma de L ante un sismo con la dirección predominante (N-S), el cuerpo paralelo a esta dirección presentaría desplazamientos, mientras que el cuerpo ubicado en la dirección (E-O) podría sufrir rotaciones en el diafragma y un efecto de torsión.

Puesto que los cuerpos no pueden moverse independientemente, se produce una concentración de esfuerzos en los ángulos de unión. Cada cuerpo tratará de seguir su propia dirección y ritmo, pero al estar rigidizados por la unión de ambos, se generarán excentricidades en cada uno de los cuerpos y rotación en el extremo exterior del cuerpo cuyo eje no sea paralelo a la dirección predominante del movimiento del terreno.

Cuando se produce un terremoto, en realidad el terreno no se moverá en una única dirección, sino que el terreno se moverá con un patrón irregular en diferentes direcciones al mismo tiempo, por lo que ambos cuerpos se moverán de forma diferente. Cada uno de los cuerpos tiene su propio centro de masa y su propio centro de rigidez, pero al estar unidos actuarán como un único cuerpo, generándose en este cuerpo unido un único centro de masa y de rigidez. Si los dos cuerpos no estuviesen unidos, cada uno de ellos oscilaría de forma diferente, evitando así, la fractura entre ambos cuerpos.

Dos factores determinantes de esta propiedad geométrica son por un lado, el número de áreas entrantes que puede llegar a tener cada unidad constructiva y por otro lado la ubicación de las áreas entrantes. A mayor número de áreas entrantes en planta, mayor será el número de esquinas entrantes donde se va a generar mayor concentración de esfuerzos.

Para explicar estos factores, Teresa Guevara en su libro “Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas” ilustra una matriz con dos tipos de grupos en los que se compara la ubicación y el número de áreas entrantes.

Grupo I: Este grupo engloba los cuerpos que tienen áreas entrantes exteriores, es decir, aquellos cuerpos que cada una de las áreas entrantes rectangulares tiene dos de sus lados en el perímetro exterior del cuadrado que circunscribe a la forma irregular.

Grupo II: Este grupo engloba los cuerpos que tiene áreas entrantes interiores, es decir, aquellos cuerpos que cada una de las áreas entrantes rectangulares tiene uno solo de sus lados en el perímetro exterior del cuadrado que circunscribe a la forma irregular.

En la Figura 4.3 se ilustra la matriz con los dos tipos de grupos. Se observa que la planta “a”, con una sola área entrante exterior, genera dos cuerpos o bloques y una esquina crítica; mientras que la planta “e”, con una sola área entrante interior, genera tres cuerpos o bloques diferentes de la edificación, y dos esquinas críticas. De igual forma se puede comparar cada una de las otras plantas contenidas en el grupo I con las del grupo II.

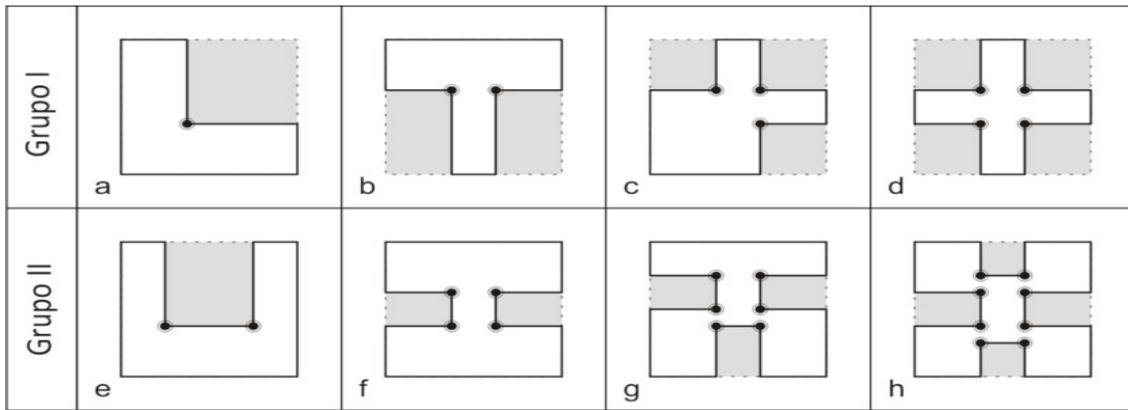


Figura 4.3 Matriz Grupo I y Grupo II. Modificado (*Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas*, Guevara Pérez, 2012)

En definitiva, a las conclusiones a las que se llegan sobre estas formas geométricas son las siguientes:

- Cuanto mayor es el número de esquinas entrantes o esquinas críticas, mayor será la vulnerabilidad de la edificación.

- Las áreas entrantes interiores, aun teniendo el mismo número de esquinas entrantes que una exterior, genera un mayor número de esquinas críticas y a su vez un mayor número de bloques o cuerpos de las edificación que reaccionará de una manera diferente ante las fuerzas generadas por un sismo. Este tipo de áreas entrantes interiores, además, crean discontinuidades en el plano del diafragma.

b) Plantas triangulares

Las plantas triangulares o sistemas no paralelos están caracterizadas por tener las direcciones de acción horizontal de los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica no paralelas.

Este tipo de edificios cuando colindan con otros, suelen presentar una distribución irregular de la distribución de la rigidez y la resistencia, ya que se deja una fachada ciega, sin ventanas, cerrada por muros portantes o por paredes no estructurales.

A pesar de que el triángulo es una forma geométrica regular, desde el punto de vista de la ingeniería sísmica, la planta triangular no suele ser compatible con una solución estructural con tres ejes de simetría que aseguran la simetría.

c) Propiedad geométrica de simetría

La simetría es una propiedad muy importante, cuando se describe la irregularidad de una planta en términos sismorresistentes. Esta propiedad es determinante para un comportamiento sismorresistente adecuado, cuando la distribución de la masa reactiva, la rigidez y la resistencia sísmica son simétricas y concéntricas.

El grado de irregularidad se determina por las dimensiones y las características dinámicas de los componentes estructurales y no estructurales; y la distribución simétrica de la masa, la rigidez y la resistencia en planta y alzado. La distribución asimétrica de los componentes rígidos, estructurales y no estructurales genera excentricidad por el desplazamiento del centro de rigidez con relación al centro de masa.

En la Figura 4.4 se observa las excentricidades en el eje x y eje y provocado por un edificio con diferentes centro de masa y de rigidez.

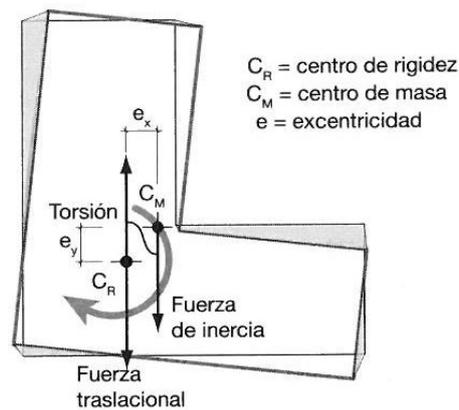


Figura 4.4 Excentricidad por diferencia de centros de masa y rigidez (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

De igual forma, una distribución simétrica de la rigidez pero asimétrica de la masa, puede conducir también a generar excentricidades que resultan en rotación alrededor del eje vertical.

A la hora de diseñar un edificio en zonas con riesgo sísmico se debe de tener en cuenta las siguientes recomendaciones en relación con la propiedad geométrica de simetría:

- La planta deberá de ser geoméricamente simétrica, es decir, que la dirección de sus ejes de simetría coincida con la dirección de los ejes ortogonales principales de la planta estructural y que no tenga áreas entrantes de dimensiones significativas.
- La distribución de las masas reactivas de la edificación deberán de ser simétricas
- La distribución de la rigidez de la edificación, a través de sus componentes verticales y horizontales, sea simétrica, elástica e inelásticamente.

d) Propiedad geométrica de proporciones y dimensiones

Las proporciones y dimensiones de las edificaciones es otro factor a tener en cuenta para identificar el grado de irregularidad geométrica en planta.

Esta regularidad se encuentra generalmente en formas rectangulares regulares, donde una de las dimensiones en planta es significativamente mayor que la otra, como por ejemplo, un edificio independiente con planta regular alargada de grandes dimensiones.

Mientras más alargado sea un edificio en planta, mayor es la posibilidad de que se apliquen simultáneamente en sus extremos movimientos sísmicos diferentes, llegando a producir grandes deformaciones en su estructura.

4.2.1.2 Irregularidad geométrica en alzado

Dentro del parámetro de irregularidad geométrica, el presente estudio se centra en el análisis de las edificaciones que presentan algún tipo de retranqueo, entendiendo por retranqueo, el desplazamiento de varias porciones de la pared exterior del edificio con relación a los límites establecidos en los planos verticales del volumen envolvente o la pared de la fachada de otra porción superior o inferior.

Estos retranqueos si tienen un mal diseño sismorresistente, pueden conducir a la discontinuidad e irregularidad en la distribución de los elementos resistentes y se pueden producir cambios bruscos en la masa reactiva, la resistencia y la rigidez entre las diferentes partes de la edificación y, por lo tanto, un comportamiento inadecuado ante un sismo, por concentraciones de daños en dicha posición.

Los tipos de retranqueos más comunes son los siguientes:

- El escalonamiento en la parte superior del edificio
- Los voladizos
- Base y torre
- Los cuerpos entrantes y salientes
- El tipo péndulo invertido
- Las edificaciones piramidales
- La falsa regularidad volumétrica con vacíos interiores

A continuación se describen los que retranqueos más comunes en la fachada de las edificaciones, voladizos, base y torre y escalonamiento.

a) Voladizos

Entendemos por voladizo, aquel elemento de construcción que vuela o sobresale horizontalmente de la vertical de un edificio o pared. Este tipo de parámetro urbano se observa con mucha frecuencia en el parque inmobiliario de las ciudades españolas.

Debido a las vibraciones del terreno, cuando se produce un sismo, se generan fuerzas verticales de inercia de carácter reversible en los elementos horizontales, como vigas y losas de piso, las cuales aumentan o disminuyen los efectos de la gravedad y pueden causar momentos en la base del

voladizo y deflexiones diferenciales importantes, con el consecuente agrietamiento en el hormigón armado por la vibración.

Al debilitarse el hormigón armado en la base del voladizo, como el acero longitudinal no trabaja bien a corte y debido a la falta de redundancia, se produce el fallo y puede llegar hasta el colapso. Se recomienda evitar en los voladizos la concentración de masas excesivas, sobre todo en el extremo, debido a que aumenta el momento en la base.

El uso de los voladizos es habitual en las ciudades españolas, debido a que las normas urbanísticas de algunos ayuntamientos reflejan en su normativa, que las áreas de los balcones o cuerpos salientes no computan como superficie edificada, o si computan lo hacen por un 50% de superficie edificada. Dependiendo del ayuntamiento esto puede variar.

b) Base y torre

Denominamos a los edificios como base y torre a aquellos que están compuestos por dos volúmenes con características dinámicas diferentes. En zonas de riesgo sísmico, si no se toman las medidas adecuadas en el diseño de estos edificios, al producirse un sismo puede generar frecuencias de vibración diferente entre los dos volúmenes, y concentración de esfuerzos de corte elevados y una gran demanda de ductilidad en las zonas donde se unen ambos volúmenes (Figura 4.5).

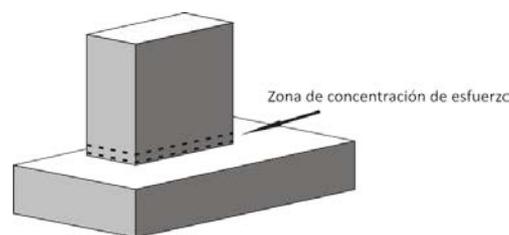


Figura 4.5 Esquema base y torre (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

c) Escalonamiento

Una de las configuraciones urbanas que se utiliza con frecuencia en el parque inmobiliario español es el escalonamiento en los pisos superiores del edificio. Este efecto se produce al desplazar el muro de fachada sucesivamente en horizontal en varios de los pisos superiores de un edificio con relación a un plano exterior vertical, de manera semejante a una serie de escalones.

Es frecuente encontrar este tipo de retranqueo en las últimas plantas de los edificios más modernos. En las normas sismorresistentes de Venezuela (*Sección 6.5 Clasificación según la regularidad de la estructura*) sólo se tiene en cuenta esta irregularidad cuando el retranqueo horizontal sea para más de una planta, es decir, no se tienen en cuenta los retranqueos de la última planta.

Los edificios con escalonamientos pueden generar asimetrías en la distribución de la masa reactiva, cambios bruscos en la resistencia y rigidez en la parte superior de la edificación, concentración de esfuerzos en las zonas de unión de los cuerpos que se forman y conducir a la discontinuidad e

irregularidad en la distribución de los componentes estructurales verticales. Todo esto puede llevar un comportamiento sismorresistente inadecuado del edificio.

4.2.1.3 El muro urbano

Por lo general, las normativas urbanísticas de los centros urbanos actuales incluyen disposiciones para crear un borde urbano continuo, es decir, que se construyan los bloques de edificios adosados formando una volumetría que contribuye a mantener una anchura constante en las vías sobre las que están contruidos los edificios. A esta configuración urbana la denominaremos muro urbano (Guevara Pérez, 2012). Gracias al muro urbano se generan volúmenes homogéneos alineados al borde de la línea de las calles, ayudando a que se conserve un cierto orden en los centros urbanos.

Inicialmente, la forma urbana de la Edad Media se caracteriza por tener calles muy estrechas y de trazado accidental debido a la ausencia de normas urbanísticas, los núcleos urbanos de esa época se desarrollaban de forma compacta.

En el siglo XIX, llegan a España los ensanches y el muro urbano en esa época se desarrolla de forma homogénea, guardando las alineaciones, el ancho de vial y las alturas de los edificios. El muro urbano guardaba una coherencia formando un perfil regular, con configuraciones arquitectónicas similares.

A finales del siglo XX se vive un cambio, en el que prima la especulación, por encima de la estética. Se rompe la regularidad del muro urbano y se comienza a observar como edificaciones tradicionales conviven con edificaciones modernas (Figura 4.6), de características diferentes, ya no desde el punto de vista estético, sino que también desde el punto de vista estructural. Se insertan nuevas edificaciones en el muro urbano, diseñadas y calculadas como unidades independientes, y al producirse un sismo se ha observado que la relación entre la edificación tradicional y moderna no es la más adecuada para cuando se produce un sismo.

Las configuraciones irregulares del muro urbano que producen una mayor vulnerabilidad sísmica en las ciudades podrían clasificarse en:

- El efecto de golpeteo provocado por la diferencia de alturas en los forjados de los edificios colindantes y el efecto de medianería.
- La diferencia de altura con sus edificios colindantes.
- Las alineaciones de los edificios.
- La posición del edificio en la manzana.



Figura 4.6 Edificación tradicional adosada a edificación moderna, Lorca 2012

El efecto golpeteo se produce entre edificaciones colindantes debido a los golpes, casi siempre poco fuertes pero seguidos, que se dan unas edificaciones con otras como consecuencia de las vibraciones del terreno. Los daños que se originan debido a este efecto no se deben generalmente a fallos producidos por un mal diseño o errores de construcción en las edificaciones afectadas, sino al choque que se produce entre las edificaciones contiguas por no haberse previsto. Las causas que generan el efecto de golpeteo y el daño entre las edificaciones son diversas, a continuación se describen las más comunes:

a) Diferencia de altura en los forjados de los edificios colindantes. Efecto golpeteo.

Este parámetro es una de las causas que suele causar daños graves cuando se produce el efecto de golpeteo debido a un sismo.

Debido a la diferencia de rigidez y de altura entre los forjados de cada una de las edificaciones colindantes, si se produce el efecto golpeteo cuando cada una de las edificaciones se mueve de acuerdo a su propio periodo de vibración, la situación se puede agravar porque los forjados se desplazarán horizontalmente y golpearán perpendicularmente a los componentes estructurales verticales de la edificación vecina (Figura 4.7).

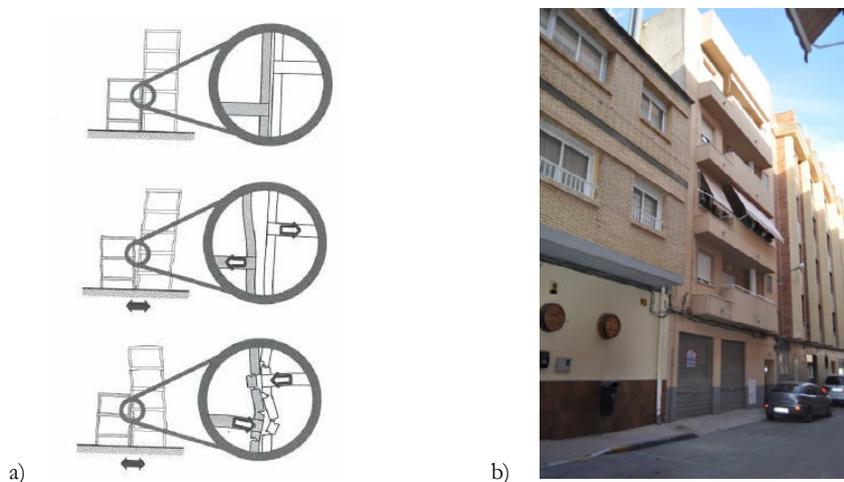


Figura 4.7 a) Diferencia de altura entre los forjados de dos edificaciones contiguas (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012) y b) foto de la ciudad de Lorca

b) Efecto de medianería en centros históricos

Se ha observado una práctica común en los centros históricos que ha generado la vulnerabilidad sísmica tanto en edificaciones tradicionales que subsisten como de las modernas que se han incorporado a las manzanas tradicionales. Los edificios modernos presentan un comportamiento estructural muy diferente a los construidos en centros históricos; cada uno de ellos actúa independientemente de los colindantes a diferencia de los tradicionales, que actuaban en bloque con el resto de los edificios de la manzana. Éste es un factor muy importante cuando se toma la decisión de demoler una edificación en un centro histórico para construir una nueva edificación contigua a las ya existentes.

En los centros históricos de España era muy frecuente compartir medianería entre las casas colindantes. Se entiende, que se comparte medianería, cuando las casas colindantes compartían el muro, generalmente de tapia estructural, que lo utilizaban para apoyar el techo y los forjados de madera. El eje medio de este muro estructural definía el límite de las propiedades, como se muestra en la Figura 4.8.

Cuando se elimina una de estas edificaciones para construir una nueva, se quitan los componentes estructurales horizontales (techo y forjados de madera) y se mantienen completos los muros estructurales de la medianería, o se dividen por la mitad acorde con el límite de la propiedad. Se recomienda en cualquiera de los casos utilizar estructuras temporales que apuntalen ambos muros hasta que se pueda garantizar la estabilidad definitiva de las edificaciones vecinas existentes.

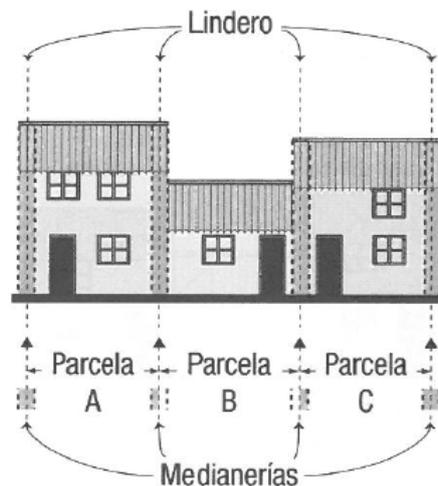


Figura 4.8 El eje medio del muro estructural definía el límite de las propiedades (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

c) Diferencia de altura de los edificios colindantes

El Plan General de Ordenación Urbana nos facilita un plano y unas ordenanzas con todas las alturas de las edificaciones. Es muy importante en un estudio de vulnerabilidad sísmica urbana identificar las diferencias de alturas de los edificios con sus colindantes, con vista a poder analizar la inmovilización parcial de las edificaciones altas por las edificaciones colindantes bajas.

Al producirse un sismo y se da la situación anterior, sucede que los primeros pisos de la edificación alta quedan confinados por las edificaciones bajas colindantes, quedando su movimiento restringido, mientras los pisos de las plantas superiores, generalmente más flexibles, se mueven libre e independientemente.

Los pisos de las plantas bajas actúan junto con las edificaciones bajas colindantes como si conformaran un bloque y a menudo se producen daños importantes en el nivel de transición entre los pisos inmovilizados y los pisos libres (Figura 4.9).

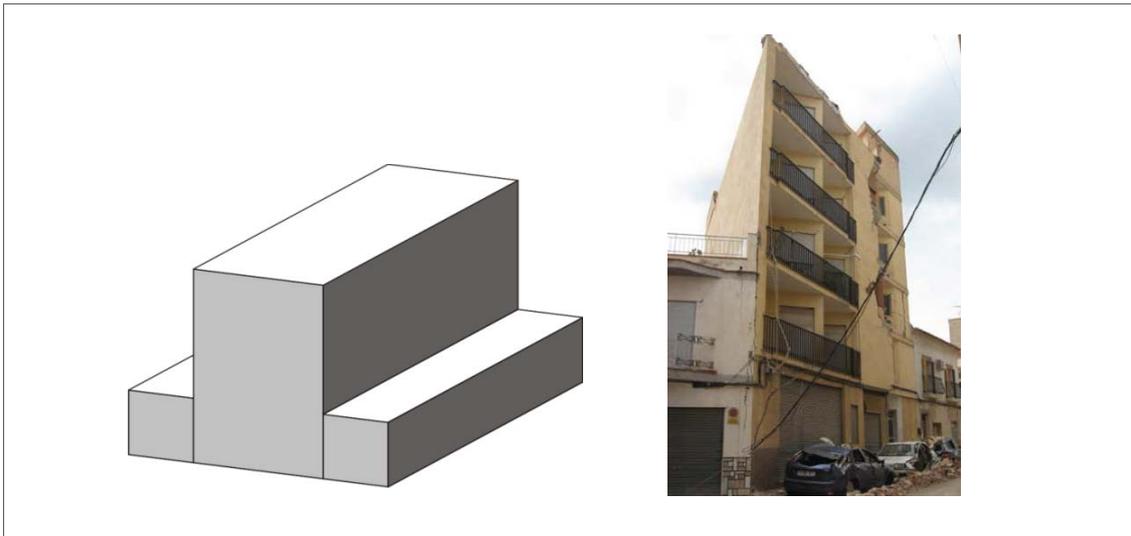


Figura 4.9 Efectos del terremoto de Lorca en las edificaciones (M. Feriche et al., 2012)

En la imagen anterior se muestra una edificación de 5 alturas, en el que no se aprecian daños estructurales, pero sí daños no estructurales muy importantes en la tercera planta. Esto puede deberse a la rigidización de las dos primeras plantas por los edificios colindantes.

d) Alineaciones

El muro urbano de una ciudad puede ir variando su ocupación en el territorio de acuerdo a las alineaciones de las edificaciones. A medida que se van creando nuevas normativas urbanísticas y actualizando el nuevo territorio, se observan zonas en las que conviven edificaciones históricas con edificaciones modernas, en las que las modernas se encuentran alineadas según la nueva normativa y las históricas se ubican fuera de línea.

Es importante analizar si estas edificaciones que se encuentra fuera de línea, al producirse un sismo, pueden verse más afectadas por el efecto de golpeteo, ya que los forjados de las edificaciones nuevas colindantes pueden colisionar sobre estas y producir daños graves.

e) La posición del edificio en la manzana

Otro factor influyente en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones es la posición que ocupa en la manzana urbana.

La posición del edificio en la manzana se clasifica de cuatro formas, como se puede observar en la siguiente Figura 4.10:

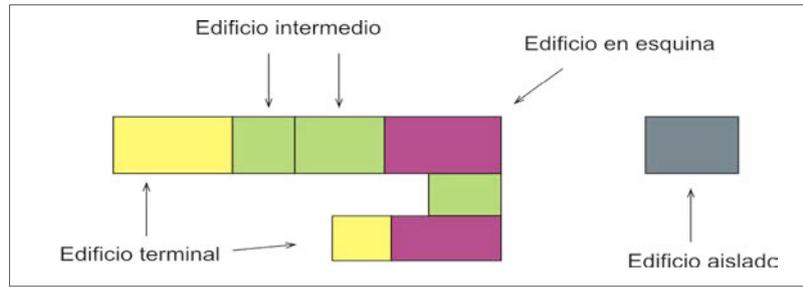


Figura 4.10 Posición del edificio en la manzana

Se debe hacer especial mención a los edificios que se ubican en esquina o terminalmente, ya que pueden presentar mayores problemas que los edificios ubicados en las parcelas intermedias. Esta condición desfavorable se debe a la falta de previsión de considerar no sólo los desplazamientos que se pueden generar en los edificios, sino las rotaciones de los forjados que comúnmente se producen en los edificios en esquina, y en el que se puede llegar a generar irregularidad torsional en planta.

La irregularidad torsional, para este caso, se presenta cuando una edificación se ubica en la esquina de la manzana urbana conformada por edificaciones continuas. Dos de las fachadas del edificio, son “ciegas” (*wall exterior sin aberturas en su plano*), en ángulo recto, que son las que van adosadas a las edificaciones colindantes, y las otras dos fachadas exteriores con ventanas que permiten la iluminación y la ventilación se consideran flexibles. Las dos fachadas “ciegas” producen un efecto de rigidez.

Es común que se produzca el efecto de golpeteo entre este tipo de edificación y sus colindantes. Generalmente, la edificación que está en esquina presenta una falsa simetría debido a la distribución irregular de la rigidez perimetral.

En la siguiente Figura 4.11 se ilustra como la distribución asimétrica de la rigidez perimetral generará excentricidades y, por lo tanto, efectos torsionales en la edificación con los correspondientes desplazamientos y rotaciones de sus diafragmas que pueden llevar a chocar con los edificios colindantes.

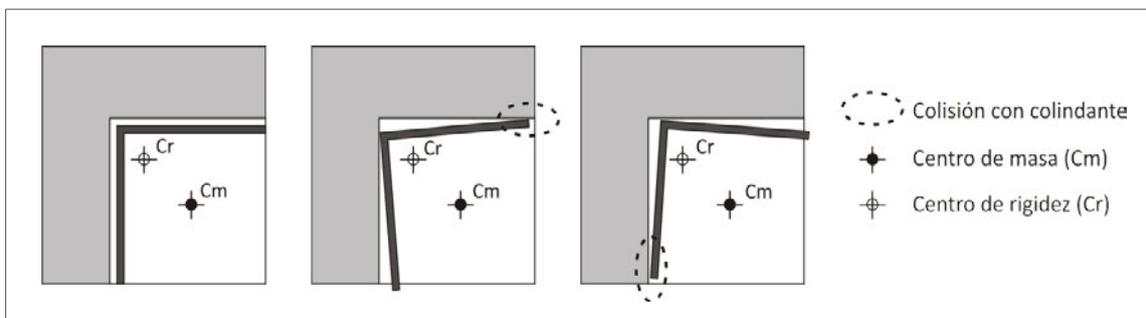


Figura 4.11 Distribución asimétrica de la rigidez perimetral (*Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012*)

4.2.1.4 Piso blando y débil

La diferencia entre el concepto de la irregularidad por piso blando como por piso débil reside en la diferencia significativa que existe entre la rigidez o la resistencia de uno de los pisos de una edificación con la del resto de los pisos. Cualquiera de estas dos irregularidades se conoce en términos arquitectónicos como planta libre.

Las edificaciones con alguno de estos dos parámetros urbanísticos, frecuentemente se ven afectadas por daños estructurales serios cuando ocurre un movimiento sísmico.

A continuación se detalla cada uno de estos dos conceptos:

a) Piso blando o flexible

Las fuerzas inducidas por un movimiento sísmico tienden a distribuirse en la edificación mediante un patrón uniforme y continuo. La fuerza cortante generalmente es mayor en la planta baja. Si la masa es uniforme en la altura de la edificación, entonces las fuerzas inerciales en los pisos superiores serán mayores que en los inferiores, debido a que las aceleraciones aumentan con la altura.

Si la estructura presenta una porción más flexible en un piso y una porción más rígida arriba en los pisos superiores, la mayoría de la energía de entrada será absorbida por la porción más flexible y la restante será distribuida entre los pisos superiores más rígidos, produciéndose mayores deformaciones en el piso inferior.

La irregularidad en la configuración de la edificación, conocida como piso blando, se refiere justamente a la existencia de un nivel o piso del edificio que presenta una rigidez significativamente menor que el resto de los pisos de la edificación; por ello se llama también piso flexible.

Es frecuente que el piso blando se genere accidentalmente a raíz de la eliminación o disminución del número de paredes no estructurales en uno de los pisos de la edificación, o por cambiar la distribución de la planta, añadiendo componentes rígidos que no fueron tomados en cuenta en el diseño y análisis de la estructura, deformando los componentes estructurales en el resto de pisos. Suele ser habitual que estas condiciones se den en las plantas bajas de las edificaciones, pero también se puede dar el caso de encontrarlo en un nivel intermedio de la edificación, como se muestra en las siguiente Figura 4.12.

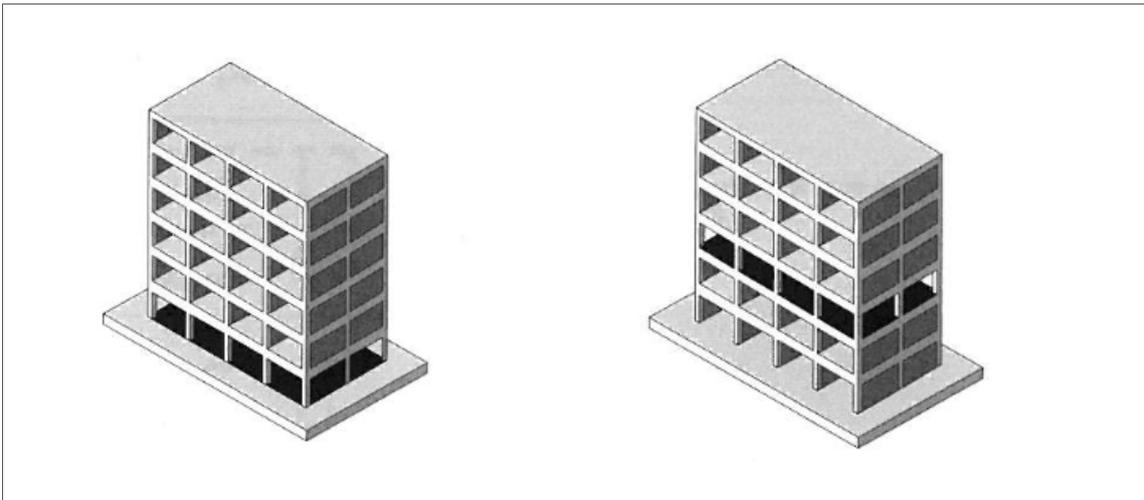


Figura 4.12 Piso blando en planta baja u piso blando en planta intermedia (*Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012*)

Debido al desplazamiento relativo que se genera entre el forjado de un nivel y el del nivel inmediato (deriva) cuando ocurre un sismo, las columnas del piso blando se ven sometidas a grandes deformaciones, lo cual generalmente no se prevé con anticipación, por lo que se producen daños irreparables tanto en los componentes estructurales como no estructurales del piso. La disipación de la energía sísmica se concentra en dicha planta.

La presencia del piso blando generalmente se produce debido a decisiones arquitectónicas que se toman, bien sea en el diseño original de la edificación o debido a modificaciones arquitectónicas o constructivas posteriores, sin consultar a un ingeniero estructural.

El piso blando o flexible en la planta baja se genera cuando se presentan las siguientes condiciones que lo diferencian significativamente de los pisos superiores:

1) La altura de los entrepisos se mantiene igual en toda la altura del edificio, pero la diferencia de rigidez de la planta baja con relación a las plantas superiores se debe a:

- Paredes rígidas no estructurales adosadas a los componentes estructurales flexibles en los pisos superiores y planta baja sin dichas paredes. Esta característica se ha identificado en el estudio como piso blando sin cerramientos (Figura 4.13a).
- Aberturas más numerosas y más grandes en las paredes exteriores de la planta baja en comparación con el resto de los pisos de la edificación. Esta característica se ha identificado en el estudio, como piso blando parcialmente cerrado (Figura 4.13b).
- Menos paredes interiores y más pequeñas que en los pisos superiores. Esta característica se ha identificado en el estudio, como distribución diferente al resto de las plantas (Figura 4.13c).

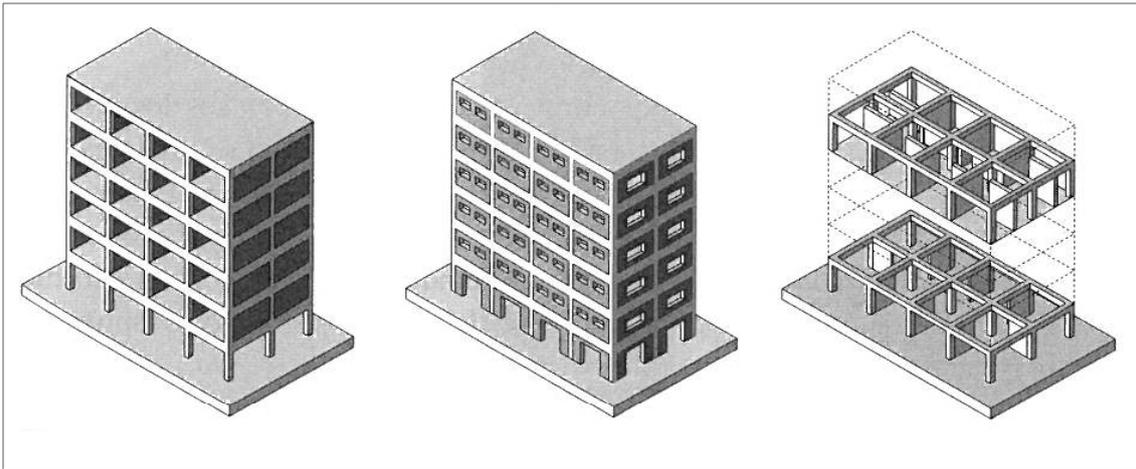


Figura 4.13 a) Planta baja sin paredes rígidas, b) planta baja con aberturas distintas a las otras plantas y c) planta baja con menos paredes y más pequeñas que las otras plantas (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

El ejemplo más frecuente de piso blando o flexible en planta baja se observa en las edificaciones multifamiliares, que sus plantas bajas son comerciales y, también se pueden encontrar en las edificaciones que tienen las plantas bajas libres.

La presencia en los pisos superiores de componentes rígidos no intencionalmente estructurales, como es el caso de las paredes de albañilería, adosados a los componentes estructurales flexibles y la ausencia de estas paredes en la planta baja, modifica el comportamiento de los componentes estructurales, generándose una mayor rigidez y mayor masa en los pisos superiores, por lo que prácticamente toda la deformación lateral se concentra en la planta baja. En la siguiente Figura 4.14 se ilustra la diferencia entre la deformación lateral de un edificio con una distribución homogénea de las paredes en altura (a) y uno con planta baja sin cerramientos o libre (b).

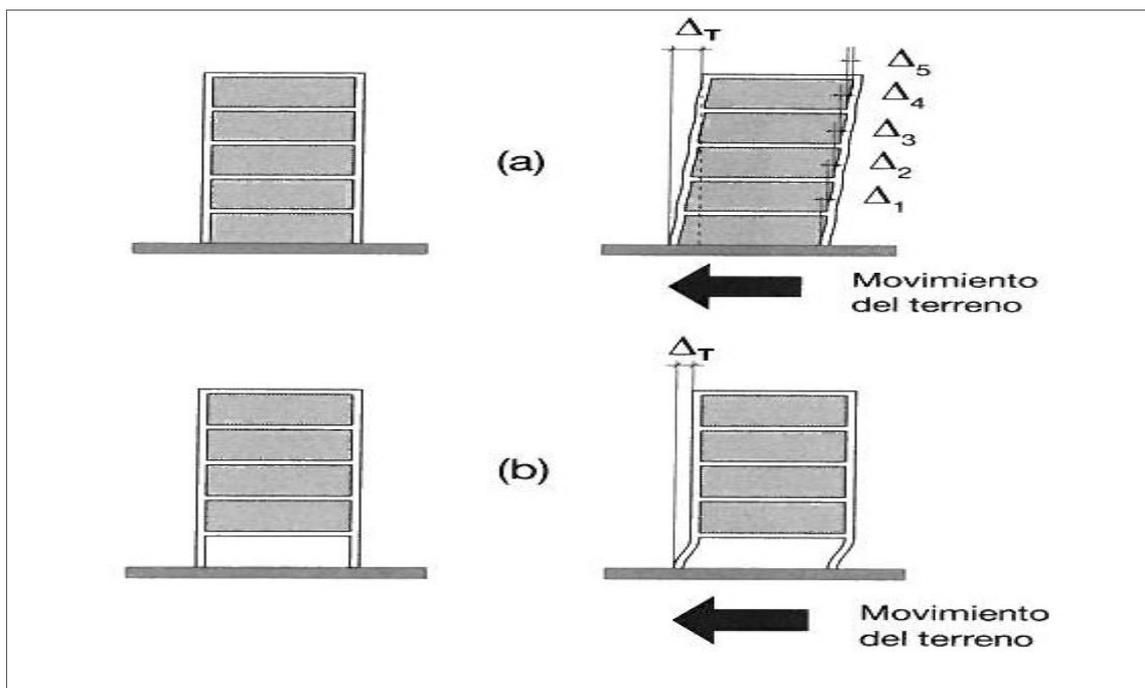


Figura 4.14 Deformación lateral de un edificio con una distribución homogénea de las paredes en altura y con planta baja sin cerramientos o libre (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

2) La flexibilidad de la planta baja débil también se puede deber a la altura significativamente mayor de las columnas de la planta baja con relación a las columnas de los pisos superiores. Esta característica también es frecuente localizarla en edificaciones multifamiliares con planta baja comercial.

b) Piso débil

El efecto de piso débil se refiere a la existencia de un nivel o entrepiso del edificio que presenta una menor resistencia lateral estructural que la del entrepiso inmediatamente superior o que el resto de los entrepisos de la edificación. La parte más débil de la edificación es la que sufrirá los mayores daños, dada su incapacidad para resistir los esfuerzos generados por el movimiento sísmico.

El piso débil se puede generar cuando en alguno de los pisos de la edificación se presenta alguna de las siguientes condiciones, que lo diferencia significativamente del resto de las plantas del edificio.

- La eliminación o debilitación de componentes de resistencia sísmica en la planta baja, como puede ser una planta baja diáfana y con altura diferente al resto de las plantas.
- Sistemas mixtos, pórticos y muros estructurales, con interrupción de los muros en la planta baja.

El piso débil suele utilizarse a menudo en las edificaciones hoteleras y hospitalarias, en las que no sólo se diseña la planta baja libre de muros, sino que generalmente este nivel, debido a su importancia, tiene mayor altura de entrepiso que la del resto de los niveles.

4.2.1.5 Efecto columna corta y cautiva

Este parámetro urbanístico, es probablemente la causa más determinante a la hora de generar daño al producirse un movimiento sísmico. Este efecto está relacionado con la variación en la configuración de las columnas de un edificio. El efecto de columna corta puede ser provocado por una columna cautiva o por una columna corta, a continuación se definirán cada uno de estos términos.

a) Columna cautiva

Las edificaciones que tienen columna cautiva o pilar secuestrado, el daño se genera en la columna, pero la causa habitual reside en la acción de otros componentes constructivos que alteran el patrón de respuesta de la columna ante las acciones sísmicas.

La columna cautiva se produce debido a una modificación accidental en la configuración estructural original de las columnas de un pórtico. La columna diseñada y analizada originalmente para moverse y deformarse, independientemente en toda su altura, queda inmovilizada tanto por componentes constructivos rígidos, tales como paredes interiores, paredes de fachada, muros de contención, descansos de escalera, rampas y otros.

El principal problema se presenta cuando la deformación de la columna queda parcialmente restringida en el plano, mientras que la sección que queda libre absorbe una gran parte de la deformación que correspondería a la columna en su altura total.

Cuando a una estructura porticada se le adosan en una dirección paredes no estructurales dejando un hueco libre para la ventilación, de columna a columna; se está modificando con estas paredes el comportamiento sismorresistente de las columnas, produciendo efectos no esperados como por ejemplo un fallo en la pequeña sección de la columna por fuerzas cortantes, como se muestra en la siguiente Figura 4.15.

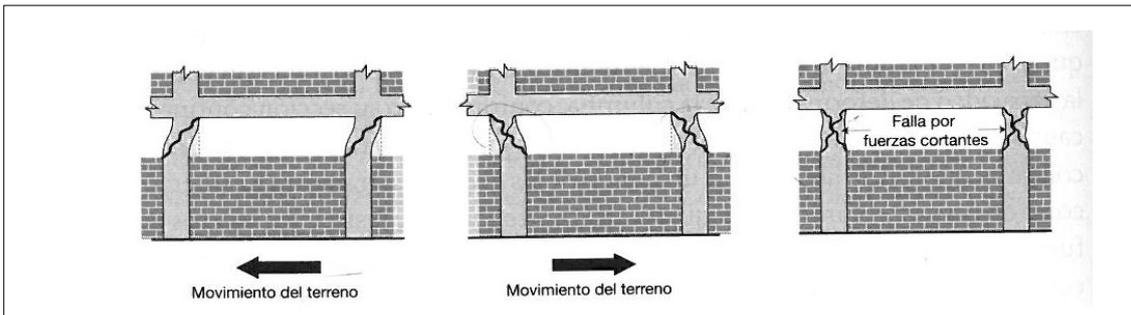


Figura 4.15 Daño en columnas cautivas en un sismo (*Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas*, Guevara Pérez, 2012)

En las edificaciones españolas, la columna cautiva es habitual encontrarla en aberturas para iluminación y ventilación de semisótanos. A continuación se ilustran dos imágenes (Figura 4.16) de un semisótano de Lorca que presenta columna cautiva. En la primera imagen se ve la columna secuestrada por un muro de contención visto desde el garaje del edificio. En la segunda imagen se aprecia en la esquina del edificio el hueco de ventilación donde se ubica la columna cautiva anteriormente mencionada.



Figura 4.16 Imágenes ilustrativas de un semisótano en Lorca que presenta columna cautiva. Interior y exterior.

b) Columna corta

La condición de columna corta se puede generar por diversas decisiones arquitectónicas, generalmente concebidas desde el diseño original de la edificación, o por adaptación al terreno o por motivos estéticos o funcionales. Se le asigna el apelativo de corta a aquellas columnas que tienen una altura significativamente menor que la mayoría de las columnas del mismo piso o de los

pisos subsiguientes, que si no han sido bien diseñadas, pueden generar un aumento de esfuerzos de corte en dichas columnas al producirse un movimiento sísmico.

La columna corta es frecuente localizarla en edificios con terrenos inclinados, edificios con desnivel y edificios con la altura de las columnas de un mismo piso más corta que las del resto de los pisos (pisos sanitarios) Figura 4.17.

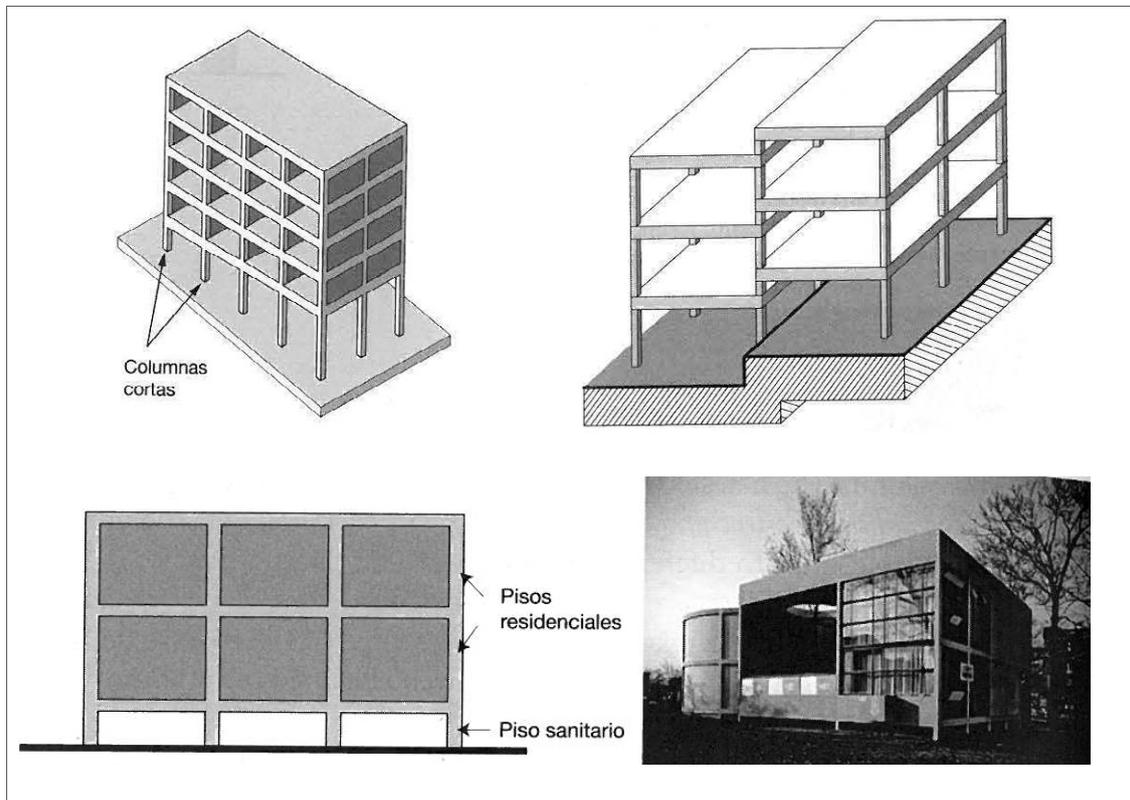


Figura 4.17 Localización de columnas corta en las edificaciones (Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas, Guevara Pérez, 2012)

Tanto la columna cautiva como la columna corta, suelen producir el mismo efecto, el efecto columna corta, que se traduce en que la columna sufre un fallo por fuerzas cortantes y es uno de los parámetros que produce daños más graves.

4.2.1.6 Tipología edificatoria

La tipología edificatoria de uso residencial es también un parámetro urbanístico que puede provocar un aumento de vulnerabilidad en la ciudad. La tipología edificatoria residencial configura y da forma a la ciudad. A continuación se describen las tipologías edificatorias que el Plan General de Lorca define.

Las tipologías edificatorias se han dividido en dos grupos fundamentalmente, residencia colectiva y residencia unifamiliar.

- **RESIDENCIA COLECTIVA.**

En este grupo diferenciamos entre edificios que están entre medianerías y bloques abiertos.

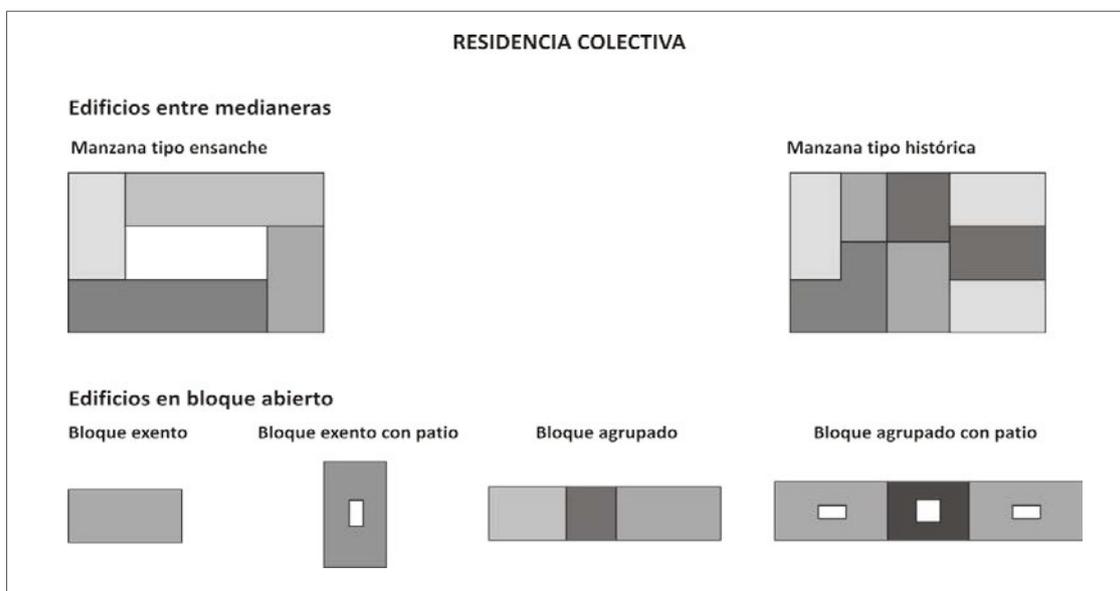
Edificios entre medianeras: Consideramos dentro de este grupo aquellos edificios que se agrupan en manzanas, y se clasifican en dos tipos:

- *Manzana cerrada con patio central (Tipo ensanche).*
- *Manzana cerrada densa tipo histórica.*

Bloque abierto: Consideramos dentro de este grupo aquellos edificios que se encuentran aislados o que se agrupan sin formar una manzana, y se clasifican en cuatro tipos:

- *Bloque exento.*
- *Bloque exento con patio.*
- *Bloque agrupado.*
- *Bloque agrupado con patio.*

A continuación se ilustra cada una de las tipologías de las edificaciones residenciales colectivas.

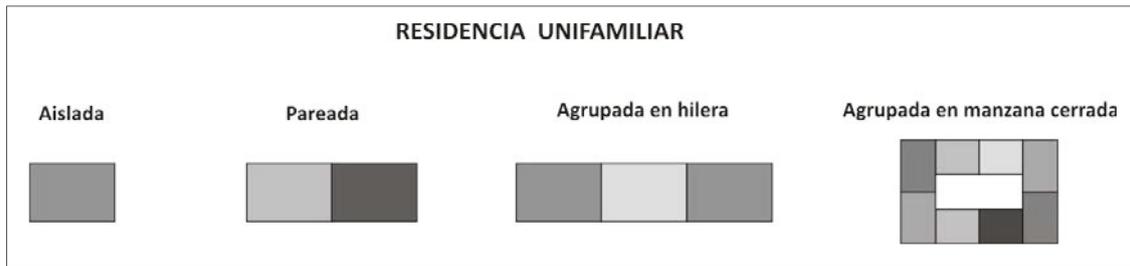


• **RESIDENCIA UNIFAMILIAR.**

En este grupo se han considerado las construcciones de residencia unifamiliar y se clasifican en cuatro tipos:

- *Aislada.*
- *Pareada.*
- *Agrupada en hilera.*
- *Agrupada en manzana cerrada.*

A continuación se ilustra cada una de las tipologías de las edificaciones residenciales unifamiliares.



4.3 OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS: SIG.

Se ha realizado una ficha (Figura 4.18) para facilitar la posterior salida de campo y poder obtener una base de datos sobre las características de la edificación. En esta ficha no sólo se recogen parámetros estructurales y urbanísticos, sino todos los parámetros que nos puedan ayudar a determinar el riesgo sísmico de una zona, como ocupación, tipo de suelo..... etc.

La ficha se ha dividido en las tres partes descritas a continuación:

- *Datos*

Información básica de la edificación; Id, Referencia catastral, Año de Construcción, Nº de viviendas, Nº de plantas, Uso Actual, Dirección postal, Estado de Conservación, y Tipo de suelo.

-*Características constructivas de la edificación*

Descripción de la estructura y la construcción de la edificación; Mampostería, Muro de carga, Hormigón Armado con y sin diseño sismorresistente, Cubierta, Tipología constructiva Risk-UE, Tipología constructiva EMS-98

-*Características urbanísticas de la edificación*

Parámetros sísmico urbanísticos que definen el edificio; Tipología edificatoria, Forma geométrica en planta, Forma geométrica en alzado, Efecto golpeteo, Posición del edificio en la manzana, Piso blando, Columna corta, Columna cautiva, Posición respecto a las alineaciones, Diferencia de altura con los colindantes y Pendiente

A partir de los datos que contiene la ficha se pueden obtener resultados interesantes como el Índice de vulnerabilidad de Risk-UE o la Clase de vulnerabilidad de la EMS-98. La ficha además puede tener documentación gráfica, fotos de alzado, detalle de la edificación y configuración urbana.

Se desarrolla además una codificación de los parámetros para realizar de una manera ágil el trabajo de campo e insertar los datos en un sistema de información geográfica. Esta codificación se ha realizado de la siguiente manera, el primer número identifica el parámetro urbanístico, el segundo número en la mayoría de los casos, es la regularidad o irregularidad del parámetro (1. Regular o 2. Irregular) y el tercer número suele referirse a la característica especial del nivel en el que se encuentra. Los ceros al final se ponen de comodines en el caso de que se puedan dar varios niveles a la vez. De cada uno de los parámetros urbanísticos establecemos una serie de niveles, con su

respectivo código. Con la codificación de parámetros y la ficha de vulnerabilidad se crea una base de datos que se puede aplicar en cualquier ciudad expuesta a riesgo sísmico.

BASE DE DATOS SOBRE CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN

DATOS

Id: 125 **Referencia Catastral:** XP22345970683034 **Año de Construcción:** 2002
Nº de Viviendas: 5 **Nº de plantas (incluida la planta baja):** B+IV+A (6) **Uso actual:** Residencial
Dirección postal: C/ Azucen anº 15, 28030 Lorca **Estado de conservación:** M. Medio (fisuras)
Índice de Vulnerabilidad: 0,78 **Clase Vulnerabilidad:** A **Tipo de suelo:** III



CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LA EDIFICACIÓN

MAMPOSTERÍA: ADOBE TAPIAL
MURO DE CARGA: CASCOTE Y PIEDRAS PIEDRA SIN TALLAR SILLAR FABRICA LADRILLO MIXTO
FORJADO: MADERA ARTESANO HORMIGÓN ARMADO OTRO
REFUERZO: CONTRAFUERTE TIRANTES OTRO
HORMIGÓN ARMADO (sin diseño sísmoresistente): FORJADO UNIDIRECCIONAL **FORJADO BIDIRECCIONAL**
HORMIGÓN ARMADO (con diseño sísmoresistente): FORJADO UNIDIRECCIONAL FORJADO BIDIRECCIONAL MUROS DE CORTE OTRO
CUBIERTA: PESADA LIGERA
TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA RISK-UE: RC1 **TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA EMS-98:** HORMIGÓN ARMADO sin diseño sísmoresistente

CARACTERÍSTICAS URBANÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN

TIPOLOGÍA EDIFICATORIA: RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR ENTRE MEDIANERAS
 1a **1b** 2 **MANZANA CERRADA CON PATIO DENTRAL EN MANZANA CERRADA DENSA**
 BLOQUE ABIERTO ABIERTA
 3a 3b 6
RESIDENCIAL UNIFAMILIAR: 1a 1b 4 5
 AISLADA ADOSADA O PAREADA ENTRE MEDIANERAS AGRUPADA
LONGITUD DE FACHADA: 15m
FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA: REGULAR **IRREGULAR**
FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO: **REGULAR** ESCALONAMIENTO BASE Y TORRE INVERTIDO VOLADIZOS OTROS (entrantes-salientes)
EFECTO GOLPETEO: GOLPETEO DERECHA **GOLPETEO IZQUIERDA**
POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA: ESQUINA **INTERMEDIO** TERMINAL
PISO BLANDO: **SIN NADA DE CERRAMIENTO** PARCIALMENTE CERRADO PLANTA Nº
USO DIFERENTE AL RESTO DEL EDIFICIO / DISTRIBUCIÓN DIFERENTE AL RESTO DEL EDIFICIO: **ALTURA DIFERENTE AL RESTO DEL EDIFICIO**
COLUMNA CORTA: TERRENOS INCLINADOS **EDIFICIOS DESNIVELES**
COLUMNA CAUTIVA: **EN TODA LA EDIFICACIÓN** PLANTA Nº
POSICIÓN RESPECTO A LAS ALINEACIONES: EN LÍNEA FUERA DE LÍNEA **RETRANQUEADA: 5m**
DIFERENCIA DE ALTURA CON LOS COLINDANTES: N° DE PLANTAS EDIFICIOS ADYACENTES: +2D/-3I
PENDIENTE: LLANA MEDIA (<6%) ABRUPTA (>6%)



Figura 4.18 Ficha sobre características de la edificación que afectan a la vulnerabilidad sísmica para crear base de datos en la edificación

4.3.1 Tratamiento de los datos

Para poder implementar los datos que se recojan en el trabajo de campo en un sistema de información geográfica y luego trabajar con ellos, previamente deben seguirse una serie de pasos que se describen a continuación y que nos sirven como cartografía base sobre la que poder trabajar.

4.3.1.1 Datos de catastro

La Dirección General del Catastro ofrece la posibilidad de descargar productos catastrales a través del portal de la Sede Electrónica de la Dirección General del Catastro (SEC), mediante certificado digital. Estos productos pueden descargarse en formato vectorial (shapefile) o en formato alfanumérico (CAT). Para este trabajo se han descargado los dos tipos de datos.

Cartografía vectorial

La cartografía catastral se descarga de la Sede Electrónica del Catastro y está constituida por un conjunto de capas y de tablas en formato shapefile. El sistema geodésico de referencia es el ETRS89 en Proyección UTM referida al huso correspondiente de la zona.

El formato shapefile es un formato vectorial para almacenamiento de datos espaciales, donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. El formato puede estar compuesto por un número variable de ficheros, pero como mínimo tiene que tener tres con extensiones *.shp*, *.shx* y *.dbf*. El que distribuye la Dirección General del Catastro está compuesto además de por los anteriores, por la extensión *.prj*. Los cuatro se describen a continuación:

- El fichero *.shp* almacena la información geométrica de los objetos. Puede contener puntos, líneas o polígonos y cada vértice lleva implícitas sus coordenadas en un sistema de referencia concreto, que se establece en el fichero *.prj*.
- El fichero *.shx* contiene los índices de los elementos geométricos del fichero.
- El fichero *.dbf* es una tabla de datos estructurados en formato de base de datos en la que se registran los atributos asociados a cada elemento geométrico del archivo *.shp*.
- El fichero *.prj* es un archivo de texto (ASCII, se puede consultar con un editor de texto) que almacena información sobre el sistema de referencia en que están las coordenadas del fichero *.shp*. Mediante este archivo se puede situar cada elemento en su posición sobre el terreno.

Cada fichero de cartografía contiene varias tablas con información geométrica y otras tablas auxiliares sin información geométrica. La propia Dirección General del Catastro nos ofrece un pequeño manual descriptivo de sus productos, disponible en la SEC, en el que explica el contenido de sus productos y los describe brevemente.

Información alfanumérica

El fichero .CAT del Catastro contiene información alfanumérica organizada en ocho tipos:

Tipo 01: Registro de cabecera. Existirá una para todo el fichero independientemente de que el fichero recoja la información correspondiente a un solo municipio o a varios.

Tipo 11: Registro de finca. Existirá uno por cada parcela catastral implicada.

Tipo 13: Registro de Unidad Constructiva. Existirá uno por cada unidad constructiva en cada parcela catastral.

Tipo 14: Registro de Construcción. Existirá uno por cada construcción de cada unidad constructiva en cada parcela catastral.

Tipo 15: Registro de Inmueble. Existirá uno por cada bien inmueble en cada parcela catastral.

Tipo 16: Registro de reparto de elementos comunes. Existirá al menos uno por cada elemento común que se reparte, siempre que sea necesario especificar repartos especiales.

Tipo 17: Registro de cultivos. Existirá uno por cada subparcela de cultivo existente dentro de la parcela catastral.

Tipo 90: Registro de cola. Existirá uno para todo el fichero.

Tratamiento de la información alfanumérica

Para poder trabajar en ArcGIS con los ficheros .CAT, es necesario importarlos a un fichero Excel. La SEC ofrece una serie de plantillas para poder importar los datos de forma correcta, consiguiendo así que cada dato se sitúe en su columna correspondiente. Se utilizó el Registro 13, de unidades constructivas donde se filtraron y trataron los datos (Figura 4.19).

Para facilitar el uso de los datos, se exportará de nuevo esta información a una base de datos Access, ya que este formato es menos pesado y se maneja mejor con el software ArcGIS. Este fichero contiene información complementaria a la aportada por el fichero vectorial. Esto permite abrir ambos ficheros en ArcGIS y unirlos para poder disponer de toda la información en un único entorno.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
2	Tipo	Blanco1	Del	Mun	Clase	Refcat	Codigo	Blanco2	Prv	NombrePrv	Codmun	Codine	Municipio	Entremun	Cod Via	TipoVia
2	13		30	24	UR	4690320XG1649B	AZ	1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		1453 PL
3	13		30	24	UR	4790714XG1649S	AZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		386 DP
4	13		30	24	UR	4790713XG1649S	AZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		386 DP
5	13		30	24	UR	6003105XG1760C	AZ	1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		1446 PL
6	13		30	24	UR	6110198XG1760N	AZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	TERCIA LA		387 DS
7	13		30	24	UR	6112674XG1761S	AZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		1444 PL
8	13		30	24	UR	4323902XG1742C		1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		1041 CM
9	13		30	24	UR	4520011XG1742B		1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		1041 CM
10	13		30	24	UR	3584203XG1638N		1		30 MURCIA	24	24	LORCA			1705 CL
11	13		30	24	UR	3584202XG1638N		1		30 MURCIA	24	24	LORCA			1705 CL
12	13		30	24	UR	3584201XG1638N		1		30 MURCIA	24	24	LORCA			1705 CL
13	13		30	24	UR	4703017XG1740D	G			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		159 CL
14	13		30	24	UR	4703017XG1740D	V1			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		159 CL
15	13		30	24	UR	4703017XG1740D	V2			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		159 CL
16	13		30	24	UR	5915915XG1751F		1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		218 CJ
17	13		30	24	UR	5915915XG1751F		2		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		218 CJ
18	13		30	24	UR	5214901XG1751C		1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		329 CL
19	13		30	24	UR	8218211XG1761E	AZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		923 CL
20	13		30	24	UR	8218211XG1761E	B			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		923 CL
21	13		30	24	UR	4915701XG1741F	AZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		110 CL
22	13		30	24	UR	4915701XG1741F	BZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		110 CL
23	13		30	24	UR	5311034XG1751A		1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		918 CL
24	13		30	24	UR	4704611XG1740D		1		30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		248 AV
25	13		30	24	UR	4704605XG1740D	AZ			30 MURCIA	24	24	LORCA	LORCA		5 CL

Figura 4.19 Aspecto del fichero .CAT exportado a Excel

Unión de la información

La unión del archivo shapefile y la información alfanumérica descargada de catastro se hace a través del campo de referencia que tienen en común "Refcat". Este campo pertenece a cada unidad constructiva.

De la unión de las dos tablas se obtiene otra tabla (Figura 4.20), cuyas columnas contienen todos los atributos de las dos tablas de inicio. Esta tabla tiene asociada una geometría, que representa las unidades constructivas y que será la cartografía base empleada para el proyecto.

MASA	PARCELA	HOJA	TIPO	CONSTRU	COORX	COORY	NUMSYMBOL	AREA	FECHAALTA	FECHABAJA	NINTERNO	REFCAT	Id*	Blancof	Del	Mun	Clase
47046	11	XG1740	U	III	614639.58	4170193.03	11	9,27	20111121	99999999	82038548	4704611XG1740D	23	<Null>	30	24	UR
47046	05	XG1740	U	I	614643.2	4170198.88	11	18,64	20111121	99999999	82039052	4704605XG1740D	24	<Null>	30	24	UR
47046	05	XG1740	U	II	614649.48	4170195.55	11	125,87	20111121	99999999	82039053	4704605XG1740D	24	<Null>	30	24	UR
47046	05	XG1740	U	I	614657.05	4170195.83	11	5,19	20111121	99999999	82039054	4704605XG1740D	24	<Null>	30	24	UR
49089	05	XG1740	U	I	614664.12	4170646.93	11	76,05	20031114	99999999	81682630	4908905XG1740H	19510	<Null>	30	24	UR
49126	02	XG1741	U	I	614826.11	4171022.96	11	8,02	20031114	99999999	81682631	4912602XG1741F	5694	<Null>	30	24	UR
49176	02	XG1741	U	I	614826.74	4171497.07	11	29,91	20031114	99999999	81682632	4917602XG1741F	3945	<Null>	30	24	UR
55189	24	XG1751	U	I	615444.38	4171398.32	11	8,93	20031114	99999999	81682633	5518924XG1751F	3675	<Null>	30	24	UR
48104	03	XG1741	U	II	614796.78	4170815.46	11	96,62	20031114	99999999	81682634	4810403XG1741B	19532	<Null>	30	24	UR
49178	09	XG1741	U	II	614797.26	4171546.62	11	40,29	20031114	99999999	81682635	4917809XG1741F	4456	<Null>	30	24	UR
49121	06	XG1741	U	II	614797.42	4171048.14	11	41,1	20031114	99999999	81682637	4912106XG1741B	5698	<Null>	30	24	UR
49178	03	XG1741	U	II	614797.44	4171570.29	11	95,57	20031114	99999999	81682638	4917803XG1741F	4462	<Null>	30	24	UR
48154	04	XG1741	U	II	614770.95	4171347.63	11	70,17	20031114	99999999	81682640	4815404XG1741F	3928	<Null>	30	24	UR
50070	11	XG1750	U	II	614856.26	4170548.23	11	211,58	20031114	99999999	81682641	5007011XG1750E	19272	<Null>	30	24	UR

Figura 4.20 Tabla resultante de unir el archivo .dbf y el .CAT

Ortofotos

Del portal del Instituto Geográfico Nacional (IGN) se pueden descargar ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) de la máxima resolución geométrica disponible, en formato ECW, sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en el huso 30 Norte.

4.4 ESTUDIO ESTADÍSTICO

El estudio estadístico de la tesis busca la relación que pueden tener los parámetros urbanísticos con los daños ocurridos en terremotos. Desde el urbanismo y de planeamiento, los Planes Generales que se redacten en zonas de peligrosidad sísmica podrán tener en cuenta estos parámetros dentro de sus Ordenanzas.

4.4.1 Selección de la muestra

Para seleccionar las zonas más representativas para el estudio estadístico, se debe tener en cuenta que el total de edificios ubicados en las zonas cumpla las siguientes características:

- Todo los parámetros urbanísticos objeto de esta tesis están representados en la muestra en una cantidad mínima necesaria para garantizar la validez del estudio estadístico.
- La muestra tiene edificios con la clasificación completa del daño.
- Las zonas seleccionadas abarcan distintos tipos de suelo según la distribución de valores Vs30.

4.4.2 Metodología del estudio estadístico

Inicialmente se hace un análisis descriptivo de las variables, se obtiene la frecuencia con la que los parámetros urbanísticos aparecen representados en las zonas de estudio seleccionadas. En este proceso, aquellos niveles que tengan una frecuencia inferior al 5% se deben unir, siempre que sea posible, con otros niveles o ser eliminados al tener un valor no significativo dentro de la muestra.

Tras realizar el análisis descriptivo de los parámetros urbanísticos se hace una tabla con la descripción de las variables y la categorización de los niveles finales. Con esta tabla podemos ver la operacionalización de las variables, dependientes e independientes, y el tipo de variable (Ordinal politémica – Nominal). En este estudio la variable dependiente es el daño y las variables independientes son los parámetros urbanísticos, la tipología estructural y el tipo de suelo.

4.4.2.1 Análisis Estadístico

El objetivo de este estudio es conocer si los parámetros urbanísticos están relacionados con el daño. Para encontrar esta relación, además de una análisis de correlación, que puede no resultar conclusivo, definimos un índice de discriminación. Este tipo de índice de discriminación se usa en el análisis de ítems de pruebas objetivas, e indica en qué medida un ítem discrimina, ordenando a los candidatos con relación a las puntuaciones obtenidas en la prueba que se analiza. En esta tesis doctoral, este índice de discriminación es un dato de cada nivel de cada parámetro urbanísticos e indica en que medida un nivel discrimina (diferencia a los niveles que pertenecen a edificios con daño estructural y sin daño o daño no estructural), ya que compara el porcentaje de edificios con daño estructural de un determinado nivel de un parámetro urbanístico con el porcentaje de edificios que no tienen daño estructural de ese mismo nivel del parámetro urbanístico seleccionado. Contribuye a situar a un nivel en el grupo de daño estructural o sin daño estructural. A mayor diferencia entre los niveles con o sin daño estructural, el valor es más discriminante, ayuda a situar a un nivel entre el daño estructural o no estructural. Los valores extremos que puede alcanzar este índice son 0 y ± 1 . El valor 0 del índice de discriminación se daría cuando el porcentaje de edificios con daño estructural o sin daño estructural sea igual. Los valores +1 y -1 son los valores máximos de este índice. En el mejor de los casos su valor será -1 cuando todos los edificios que no han tenido daño estructural correspondiesen al nivel del parámetro elegido. El mismo razonamiento se utiliza para indicar que si el índice de discriminación es +1, indicaría que todos los edificios que han tenido daño estructural corresponderían al parámetro urbanístico del nivel estudiado. Los niveles con discriminación negativa estarían relacionados con el sin daño y daño no estructural y valores positivos con el daño estructural. Los valores que discriminan mucho serían de -0.5 a -1, corresponderían a los niveles menos relacionados con el daño y de +0.5 a +1, niveles muy relacionados con el daño estructural.

A continuación se describe el análisis estadístico que se debe hacer para cada tipo de suelo sobre el que se encuentren las edificaciones.

1. Cálculo del índice de discriminación, definido de la siguiente forma:

$$i = \frac{\text{N}^\circ \text{ de edificios de un nivel de un parámetro urbanístico con daño estructural}}{\text{N}^\circ \text{ total de edificios con daño estructural}} - \frac{\text{N}^\circ \text{ de edificios de un nivel de un parámetro urbanístico no hay daño estructural}}{\text{N}^\circ \text{ total de edificios que no tienen daño estructural}}$$

2. Una vez calculado los índices de discriminación, se hace un cambio de escala para que todos los índices calculados estén entre el 0 y 1. Para ello, al valor -1 le damos el valor 0 y al valor +1 el valor 1. Con este cambio de escala se obtiene la probabilidad asociada a cada uno de los parámetros urbanísticos dicotómicos con el parámetro "Daño". El cambio de escala se consiguió con la ecuación:

$$x = (y + 1)/2, \text{ donde } y \text{ son los valores antiguos y } x \text{ los valores que se quieren calcular.}$$

3. Finalmente, para analizar la relación de dependencia o independencia entre dos variables cualitativas nominales u ordinales, se estudia su distribución conjunta o tabla de contingencia. A partir de la tabla de contingencia se puede analizar si existe relación de dependencia o independencia entre los niveles de las variables cualitativas objeto de estudio (parámetros urbanísticos y daño). El hecho de que dos variables sean independientes significa que los valores de una de ellas no están influidos por la modalidad o nivel que adopta la otra. Para estudiar si la asociación entre los parámetros urbanísticos dicotómicos con el factor daño es significativa y no se debe al azar, se utiliza el estadístico Chi-cuadrado de independencia, cuyo cálculo nos permite afirmar con un nivel de confianza del 95% si los niveles de una variable cualitativa influyen en los niveles de la otra variable nominal analizada. Las hipótesis de este contraste son las siguientes:

H₀: El nivel del parámetro urbanístico (a estudiar) **no se** relaciona con el daño estructural

H₁: El nivel del parámetro urbanístico (a estudiar) **sí se** relaciona con el daño estructural



H₀: Las dos variables son independientes

H₁: Las dos variables no son independientes

A continuación vamos a definir los conceptos fundamentales que justifican este estudio estadístico:

- **Un Contraste de hipótesis** permite aceptar o rechazar si determinadas afirmaciones son ciertas o falsas en función de los datos observados en una muestra.
- **Hipótesis estadísticas:** afirmaciones verdaderas o falsas, sobre el valor de un parámetro desconocido o característica de la población.
- **Hipótesis nula:** se simboliza por H₀, es la hipótesis que se acepta provisionalmente como verdadera que se mantendrá mientras no se demuestre lo contrario.
- **Hipótesis alternativa:** recoge el suceso complementario a H₀, es decir, la hipótesis frente a la cual contrastamos la hipótesis nula. Se representa por H₁.

- **Estadístico de prueba:** es una función de los datos muestrales que nos permitirá decidir si aceptamos o rechazamos H_0 . La distribución de probabilidad debe ser conocida bajo la hipótesis nula.
- **Región de aceptación:** conjunto de valores (intervalo) para el estadístico muestral que hacen que aceptemos H_0 , con probabilidad $1 - \alpha$, supuesta cierta la hipótesis nula.
- **Región de rechazo o crítica:** conjunto de valores (intervalo) complementario al anterior, con probabilidad α .
- **Nivel de confianza:** representa la probabilidad que deseamos tener de aceptar la H_0 cuando es cierta. Se representa por $1 - \alpha$. Nos da la probabilidad de la región de aceptación bajo la hipótesis nula.
- **Nivel de significación:** representa la probabilidad de rechazar H_0 cuando es cierta y es la complementaria del nivel de confianza, es decir, α . Nos da la probabilidad de la región crítica bajo la hipótesis nula.
- **Error tipo I:** error que se produce cuando rechazamos la hipótesis nula H_0 cuando es verdadera. La probabilidad la dicha decisión es igual al nivel de significación α , es decir, a la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera.
- **Error tipo II:** error que se produce cuando aceptamos la hipótesis nula H_0 siendo falsa, que sería lo mismo que rechazar H_1 siendo verdadera. La probabilidad de rechazar la hipótesis alternativa cuando es verdadera se representa por β .
- **Potencia de un contraste:** representa la probabilidad de rechazar H_1 cuando H_1 es verdadera.
- **Pasos a seguir en todo contraste de hipótesis:**

1. Formular una H_0 y una H_1
2. Definir una medida de la discrepancia entre H_0 y la evidencia que proporciona una muestra sobre esa hipótesis (estadístico de contraste). Esta medida es una variable aleatoria y tiene que tener una distribución en el muestreo conocida cuando se supone H_0 cierta.
3. Tomar una muestra y calcular el valor concreto de esa discrepancia (valor experimental). Si la discrepancia es muy grande se habrá obtenido evidencia en contra de la H_0 y se rechaza. En caso contrario se mantiene.
4. Para un nivel de significación dado, determinar región crítica y región de aceptación o calcular el p-valor como medida de discrepancia. P-valor pequeño indica que la discrepancia es grande, es poco probable obtener discrepancias mayores. Si el p-valor es menor que el nivel de significación se rechaza la H_0 a ese nivel de significación.

• **Contraste de dependencia o independencia de variables cualitativas**

Deseamos saber si dos caracteres X e Y de una población son dependientes o independientes.

Suponemos que las modalidades que presentan cada una de las variables X e Y son:

$$X: x_1, x_2, \dots, x_k$$

$$Y: y_1, y_2, \dots, y_m$$

y se ha tomado una muestra de tamaño n, midiéndose dichas características X e Y en cada uno de los elementos de la muestra.

Si denotamos por:

O_{ij} = nº de elementos que presentan la característica x_i e y_j .

e_{ij} = nº de elementos esperados que presenten los valores x_i e y_j si las variables son independientes.

Podríamos formar la siguiente tabla de contingencia en la que aparecen las frecuencias empíricas y las teóricas:

		Y					Frecuencias absolutas X
		y_1	...	y_j	...	y_m	
X	x_1	O_{11} e_{11}	...	O_{1j} e_{1j}	...	O_{1m} e_{1m}	O_{x1}

	x_i	O_{i1} e_{i1}	...	O_{ij} e_{ij}	...	O_{im} e_{im}	O_{xi}

	x_k	O_{k1} e_{k1}	...	O_{kj} e_{kj}	...	O_{km} e_{km}	O_{xk}
	Frecuencias absolutas Y	O_{y1}	...	O_{yj}	...	O_{ym}	n

Para el cálculo de las frecuencias teóricas podemos utilizar la siguiente fórmula si las dos variables son independientes:

$$e_{ij} = p_{ij} \cdot n = \frac{O_{xi}}{n} \cdot \frac{O_{yj}}{n} \cdot n = \frac{(total\ de\ la\ fila\ i) \cdot (total\ de\ la\ columna\ j)}{n}$$

$i = 1, 2, \dots, k \quad j = 1, 2, \dots, m$

Consideramos como hipótesis nula e hipótesis alternativa a:

$$H_0 = X \text{ e } Y \text{ son independientes.}$$

$$H_1 = X \text{ e } Y \text{ no son independientes.}$$

Si aceptamos la hipótesis nula, podemos considerar que no tenemos evidencias que nos hagan suponer una dependencia entre las dos variables a un nivel de confianza de $1 - \alpha$.

Consideramos como estadístico de contraste:

$$T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \frac{(O_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \frac{O_{ij}^2}{e_{ij}} - n$$

La distribución de dicho estadístico es una χ^2 con $(k-1)(m-1)$ grado de libertad en caso de que las variables sean independientes a un nivel de confianza $1 - \alpha$.

Se acepta H_0 si $T < \chi_{\alpha}^2(k-1) \cdot (m-1)$ REGIÓN DE ACEPTACIÓN

Se rechaza H_0 si $T \geq \chi_{\alpha}^2(k-1) \cdot (m-1)$ REGIÓN CRÍTICA

- **Condiciones de aplicación del contraste de dependencia o independencia de variables cualitativas**

1. Se aplica cuando se trata de dos variables de naturaleza cualitativa (nominal u ordinal)
2. El único requisito que se debe cumplir es que ninguno de los valores esperados sea menor de 5, en las tablas 2x2. Se tolera un máximo del 20% de frecuencias inferiores a 5.

En caso de que no se cumplan las condiciones de aplicación puede utilizarse la corrección de continuidad de Yates.

Definición del estadístico Chi cuadrado de independencia:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O-e)^2}{e} \approx \chi_{(k-1)*(m-1)}^2$$

O= frecuencia empírica/observada.
 e = frecuencia teórica/esperada, si H_0 cierta
 $(k-1).(m-1)$ = grados de libertad

Definición de la Corrección de continuidad de Yates de independencia:

$$\chi^2 = \sum \frac{((O-e)-0,5)^2}{e} \approx \chi_{(k-1)*(m-1)}^2$$

O = frecuencia observada
 e = frecuencia teórica/esperada, si H_0 cierta
 $(k-1).(m-1)$ = grados de libertad

Una vez conocido el estadístico χ^2 , se acepta la H_1 (el parámetro urbanístico (a estudiar) sí se relaciona con el daño estructural con un nivel de confianza del 95% si p-valor < 0,05, en caso contrario no hay evidencias para rechazar H_0 .

4.5 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Con este tipo de estudios podemos identificar que parámetros urbanísticos han tenido mayor relación con el daño y simular posibles escenarios de daño, en el caso de que ocurriera un próximo terremoto con las mismas características. Los resultados se pueden representar de la siguiente manera de cara a su posible aplicación en distintos organismos públicos o privados.

- Tablas y gráficos.

En estas representaciones se pueden calibrar los parámetros urbanísticos y ver cuales han tenido una mayor o menor relación con el daño. Este tipo de representación puede ser muy útil para ayuntamientos y comunidades autónomas, para que los tengan en cuenta en sus

normas urbanísticas y puedan caracterizarlos con mayor precisión. Además, para la comunidad científica también puede ser de gran valor en la calibración o caracterización del parámetro, o incluso introducirlo como nuevo modificador por comportamiento en las metodologías de vulnerabilidad sísmica conocidas actualmente.

○ Cartografía.

Al haber realizado un SIG con los distintos parámetros urbanísticos y su tipología estructural, se pueden identificar fácilmente cuales serían los edificios que podrían quedar inhabitadas tras un nuevo terremoto en las ciudades que se aplique tras realizar el estudio. Además de la base de datos tan fiable que se crea sobre una ciudad. Estos resultados pueden ser muy interesantes para Protección Civil y los estudios de Riesgo Municipal que se hagan.

○ Tipología de edificios.

La unión de los parámetros urbanísticos que han tenido mayor o menor relación con el daño nos puede dar un tipo característico de edificio de la zona con una probabilidad determinada de sufrir daño. Este tipo de edificios es una referencia para que los técnicos responsables de construir los edificios lo hagan con técnicas más precisas en zonas de riesgo sísmico. También, puede servir en la Ingeniería Sísmica, para hacer nuevas curvas de capacidad de los edificios según estas tipologías.

PARTE II

APLICACIÓN

CAPÍTULO 5

ÁMBITO DE ACTUACIÓN. LA CIUDAD DE LORCA

5.1 INTRODUCCIÓN

En la tarde del día 11 de mayo de 2011 se produjeron dos terremotos en las inmediaciones del núcleo urbano de Lorca. El primero de ellos, a las 17:05 horas (hora local), alcanzó una magnitud de 4,5 grados y se sintió en toda la región de Murcia y en algunas localidades de las provincias aledañas. En el casco urbano se registró la caída de algunos elementos no estructurales.

El segundo terremoto se sintió a las 18:47 horas. Alcanzó una magnitud de 5,1 grados y se pudo apreciar en localidades tan alejadas como Madrid. Este terremoto produjo 9 víctimas mortales y más de 300 heridos, además de provocar la evacuación de más de 10.000 personas (4.000 en un campamento habilitado por la administración), el traslado de enfermos desde el Hospital, etc.

El sismo provocó gran cantidad de daños en fachadas y petos de cubierta (que, en su caída, produjeron los mayores daños personales). Tan sólo un edificio de viviendas colapsó pero se

produjeron desprendimientos parciales en edificios de mampostería y en algunos edificios históricos.

Los dos sismos tuvieron su epicentro en puntos muy próximos, situados a escasos kilómetros de la ciudad de Lorca, y a una profundidad semejante en torno a 2 kilómetros.

El segundo terremoto, a pesar de su magnitud moderada, ha generado las mayores aceleraciones registradas en nuestro país 0,38g.

5.2 SISMICIDAD EN LA ZONA

La península Ibérica (o subplaca Ibérica) se encuentra en una zona de convergencia entre las placas de África y Euroasia (Figura 5.1a) Esta convergencia, con tasas de movimiento entre 2 y 5 mm/año y con direcciones NO – SE a ONO – ESE, condiciona la sismotectónica general de la zona. El desplazamiento tectónico entre ambos continentes es responsable de la actividad sísmica de los países mediterráneos y por tanto de los grandes terremotos que ocurren en zonas como Argelia, Grecia o Turquía. La parte más occidental de la conjunción entre dichas placas es la fractura denominada de Azores-Gibraltar-Túnez, que es la que afecta a España (IGN).

El catálogo sísmico del IGN contiene del orden de 63.000 terremotos, desde el año 880 a.c. (primera referencia) hasta junio de 2011 (incluido), ocurridos entre los paralelos 26° N y 45° N y los meridianos 20° O y 6° E (Figura 5.1b).

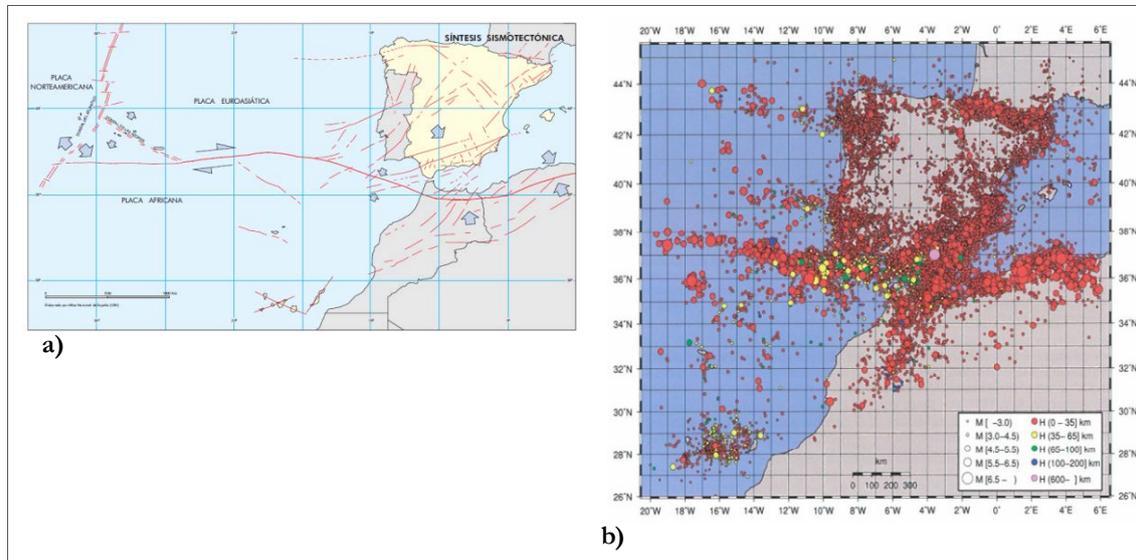


Figura 5.1. a) Ubicación de España con respecto a las placas Euroasiática y Africana. **b)** representación de todos los epicentros contenidos en el catálogo sísmico del IGN hasta junio de 2011.

Desde el punto de vista sismotectónico, la Región de Murcia presenta un gran interés en lo que se refiere a la obtención de datos útiles para el cálculo de la peligrosidad sísmica. La Cordillera Bética constituye el sector sísmicamente más activo de la Península Ibérica, al menos en cuanto a tasa de actividad. La parte Sureste de la cordillera ha sufrido importantes terremotos en los últimos 500 años, algunos de ellos con intensidades elevadas.

Entre todos destaca el terremoto de Torre Vieja de 1829 de intensidad X, los terremotos de Jacarilla de 1919, los de intensidad VIII ocurridos a lo largo de la falla de Alhama de Murcia y a lo largo del valle del Segura (destacando los terremotos de Lorquí y Cotillas de 1911) y el terremoto de Cehegín de 1948. La mayoría de estos terremotos ocasionaron numerosas pérdidas de vidas humanas y la destrucción parcial de algunas poblaciones. También son de gran valor los últimos cuatro sismos ocurridos en la provincia de Murcia con importantes efectos en Mula (1999), Bullas (2002), La Paca (2005) y Lorca (2011). En un plazo de 12 años han tenido lugar cuatro eventos que, conjuntamente, han causado los mayores daños reportados por terremotos en España en las últimas décadas.

Lorca se sitúa prácticamente sobre la traza de una de las ramas centrales de la falla de Alhama de Murcia, falla que se localiza en el límite noroeste de la cuenca del Guadalentín y supera los 80 km de longitud, atravesando prácticamente la provincia.

Se trata de una zona amplia en la que son relativamente frecuentes los terremotos de magnitud media, semejantes al de mayo de 2011. Los de Mula (1999), Bullas (2002) y La Paca (2005) alcanzaron magnitudes entre 4,8 y 5,0 no muy inferiores a la de Lorca. Es tan sólo la proximidad lo que distingue este último terremoto de los precedentes y lo que ha causado tan graves daños.

Mapas de peligrosidad sísmica

Es indudable la importancia de los mapas de peligrosidad sísmica en los países situados en áreas activas sísmicamente. Estos mapas de peligrosidad sísmica determinan la capacidad de ocurrencia de movimientos sísmicos con capacidad de generar daños personales y materiales. Permiten diseñar estructuras capaces de resistir la acción sísmica y son de gran utilidad para la planificación urbanística de las ciudades. Actualmente los estudios de peligrosidad sísmica están enfocados a las normativas antisísmicas, donde aparece su correspondiente mapa sísmico, en España a partir de la primera normativa sísmica de 1962.

En el año 2013, el Ministerio de Fomento del Gobierno de España, ha publicado el libro “Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012”. La coordinación y ejecución del trabajo fue realizado por el Instituto Geográfico Nacional y la Universidad Politécnica de Madrid, a través del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. Esta publicación es de gran importancia para el ámbito de la Ingeniería sísmica en España, ya que se actualiza el mapa de peligrosidad sísmica de España adoptado en la norma sismorresistente vigente NCSE-02 (RD 997/2002, de 27 de septiembre). En los resultados obtenidos y análisis relacionados con la norma sismorresistente NCSE-02, los autores indican que el nuevo mapa no es directamente comparable con el adoptado en la norma. En el mapa de la norma se define la peligrosidad del territorio, para un periodo de retorno de 500 años, a partir del valor de aceleración sísmica a_b , y el coeficiente de contribución K. El nuevo mapa de peligrosidad de España que se ha obtenido es una colección de mapas para

distintos parámetros de aceleración pico y aceleraciones espectrales – PGA y SAT (T_i) – calculados para varias probabilidades de excedencia o periodos de retorno. El mapa de peligrosidad obtenido en este estudio para PGA ($T_R = 475$) corresponde a la aceleración máxima horizontal de un suelo rígido o roca (Figura 5.2). Este parámetro podría ser utilizado como aceleración de referencia, en el tipo de terreno (tipo I), respecto al que definir la acción sísmica de los otros tipos de suelos. En ese caso, siguiendo la NCSE-02, además de sustituir la aceleración básica por esta nueva aceleración de referencia, sería necesario reformular los coeficientes S de amplificación del terreno. Será la Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes quien determine en la próxima actualización de la normativa la utilización definitiva de los parámetros obtenidos en el estudio de peligrosidad.

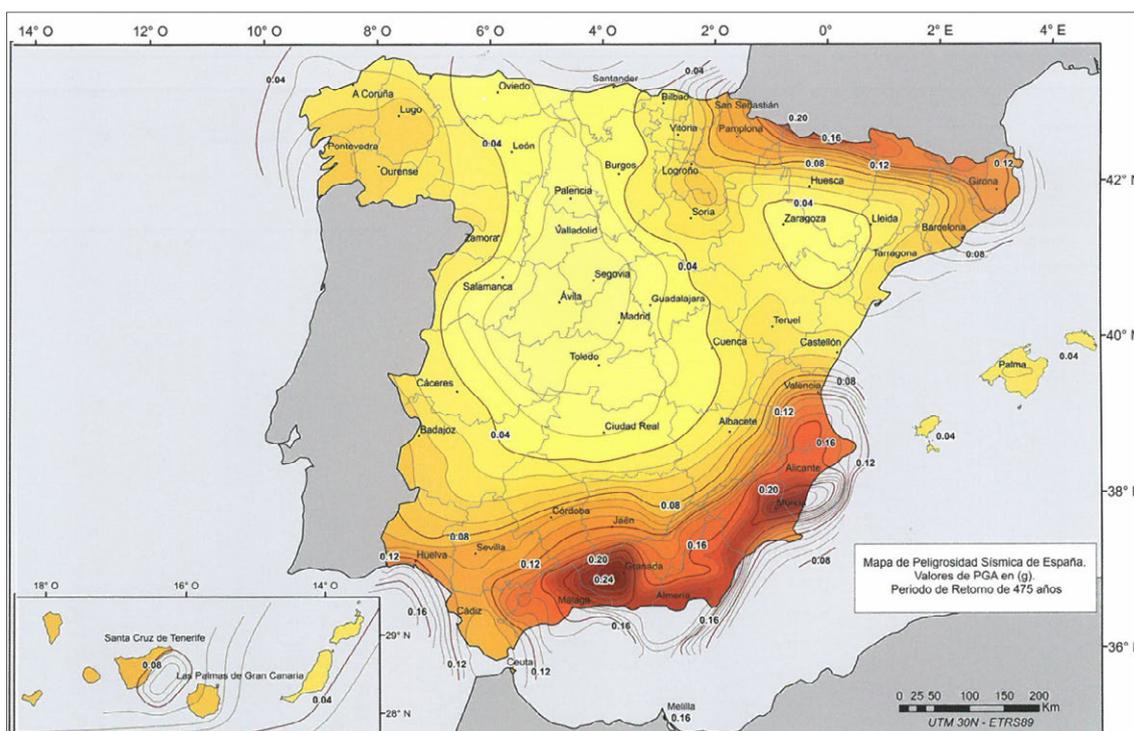


Figura 5.2 Mapa de Peligrosidad Sísmica de España. Valores de PGA en (g). Periodo de retorno 475 años. (IGN)

5.3 TIPOS DE SUELO

En la Tabla 3.2. Clasificación del terreno propuesto por el EC8 del apartado 3.2.2.2 Clasificación del terreno según el EC-8, se clasifican según el Eurocódigo 8 los cinco tipos de terrenos, que pueden ser empleados para tener en cuenta la influencia de las condiciones locales del terreno, en caso de una acción sísmica.

Esta clasificación del suelo, según el Eurocódigo 8 se ha realizado en Lorca (Navarro et al., 2012). Se ha determinado una cartografía geológica del área urbana de Lorca a escala 1:10.000 a partir de datos geológicos, geotécnicos y geofísicos. Se ha determinado la estructura Vs30 del terreno en 11 lugares de la ciudad mediante inversión de las curvas de dispersión de ondas Rayleigh obtenidas a partir de registros de ruido ambiental. La distribución espacial de los valores Vs30 indica que los suelos más extendidos en la ciudad de Lorca corresponden al tipo B según la norma EC8, ver el

mapa de clasificación de suelos de la ciudad de Lorca basado en la distribución de los valores Vs30 (Figura 5.3).

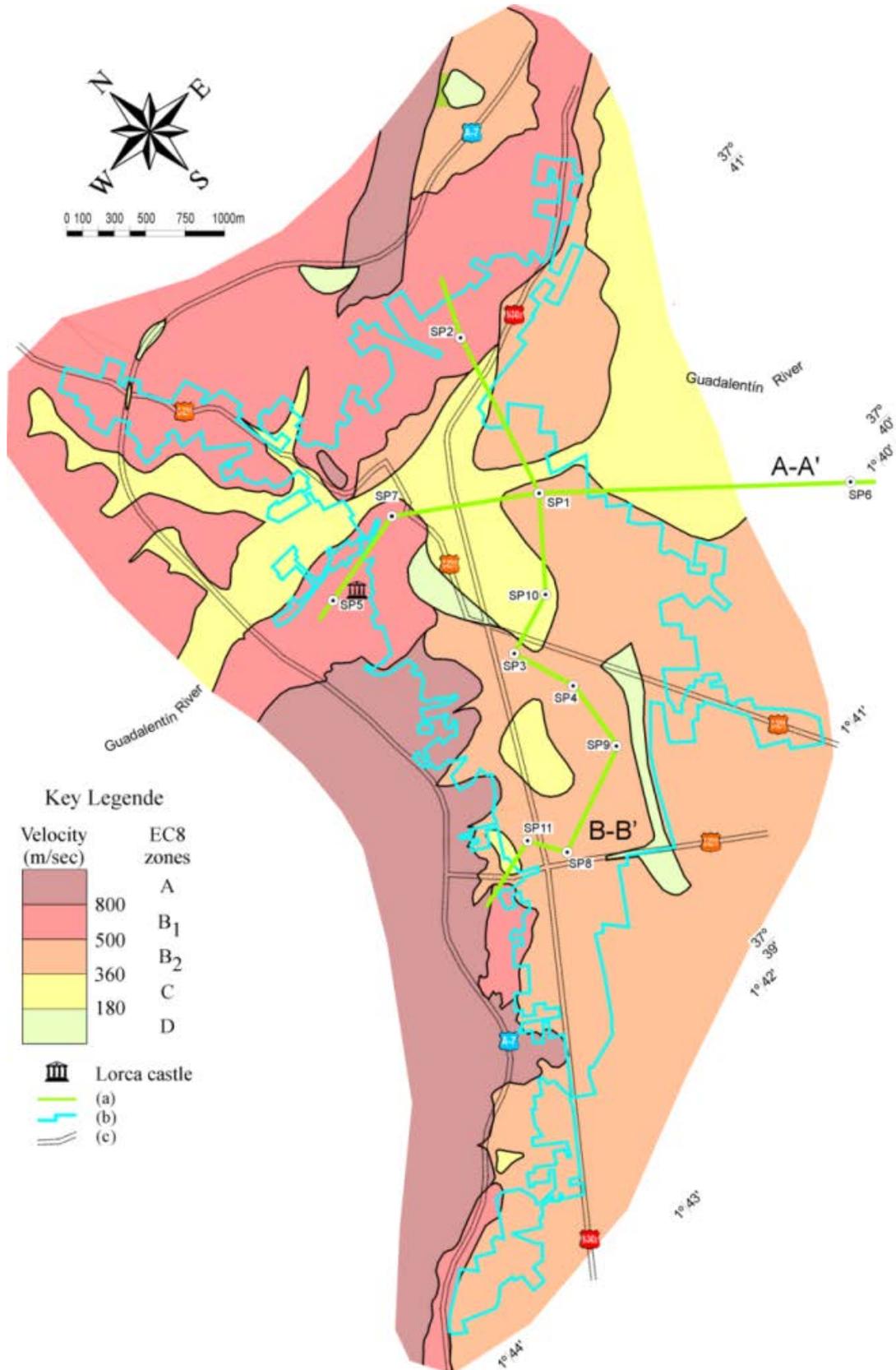


Figura 5.3 Clasificación del suelo de la ciudad de Lorca según la distribución de valores Vs30 que propone el Enrocódigo EC8 (Navarro et al., 2012).

5.4 DESARROLLO URBANÍSTICO DE LORCA

La evolución urbana de Lorca es similar a la evolución de muchas ciudades Españolas. Se basó fundamentalmente en las condiciones naturales y en las condiciones socio-económicas que a lo largo de la historia han moldeado el paisaje urbano.

5.4.1 El Territorio

El término municipal de Lorca de 1.600 Km², se caracteriza por su variedad y diversidad. Comprende un importante número de áreas homogéneas de gran valor ambiental en función de sus cualidades naturales, ecológicas, paisajísticas y sus potencialidades agrícolas o productivas, muchas de ellas sin regulación específica, con la consiguiente amenaza para la pervivencia de los valores detectados (Figura 5.4).

Destaca dentro del territorio la parte que se adentra en la Costa, de gran valor ecológico y paisajístico, donde se centran grandes expectativas de construcción. Está ocupada en parte por el Parque Regional de Calnegre y Lomo de Bas, aunque las expectativas privadas se extienden dentro de sus límites.

Otro de los elementos caracterizadores del territorio lorquino lo constituye la zona de la Huerta, de alto valor productivo, donde se desarrolla la agricultura de regadío que constituye uno de los sectores principales de actividad del municipio. Dentro de la Huerta existen presiones para la formación de nuevos núcleos que sean capaces de absorber la demanda de suelo residencial para fijar la población residente y descendencia, con un fuerte grado de vinculación al sector primario.



Figura 5.4 Ubicación del Municipio de Lorca en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia

5.4.2 La ciudad de Lorca

La ciudad de Lorca ha ido creciendo básicamente a lo largo de la carretera CN-340, que une Almería con Murcia, y discurre por el borde de las montañas que delimitan el valle del río Guadalentín, por su lado Oeste. La línea del ferrocarril tiene un trazado sensiblemente paralelo respecto a esta carretera, a una distancia que oscila entre 100 y 300 metros. De este modo, la topografía del terreno impidió un crecimiento urbano transversal hacia el Oeste, mientras que la línea del ferrocarril contuvo la expansión de la ciudad hacia el Este, separando la zona urbana de la Huerta que ocupa todo el fondo del amplio valle. En la Figura 5.5 se puede ver la evolución urbanística de la ciudad con tres fotos aéreas de los años 1946, 1981 y 2012.



Figura 5.5 Evolución urbana de Lorca. Fotos aéreas de la ciudad de Lorca, 1946, 1981 y 2012.

Otro condicionante físico de importancia lo constituye el río Guadalentín que con sólo dos puentes sobre el cauce vacío deja a los barrios del Norte prácticamente aislados.

La Diputación de Río y los barrios de San Cristóbal, Apolonia y Los Ángeles, están totalmente aislados en sus estructuras urbanas, conectándose exclusivamente a través de la C/ Mayor y Avenida de las Fuerzas Armadas. Estos barrios están escasamente provistos de equipamientos y zonas verdes.

Existen además dos carreteras transversales de importancia, que van modificando el crecimiento puramente lineal de la estructura urbana: la CN-3211, que cruza la Huerta en dirección a la costa en el municipio de Águilas, y otra más secundaria, en dirección Norte, hacia Caravaca. Cada uno de estos viales ha inducido su propio crecimiento lineal de menor intensidad, aunque en mayor grado el de la carretera de Caravaca, por discurrir por una zona de menor valor agrario.

El fuerte crecimiento urbano obligó a introducir un nuevo eje longitudinal (Avenida de Europa, Avenida de Juan Carlos I, y C/ Jerónimo Santa Fe), de mayor capacidad y a escasa distancia del eje histórico (C/ Santo Domingo, C/ Corredera, C/ Nogalte, C/ Bartolomé Pérez Casas), para acoger a los crecientes flujos de tráfico a lo largo de la aglomeración lineal (Figura 5.6).

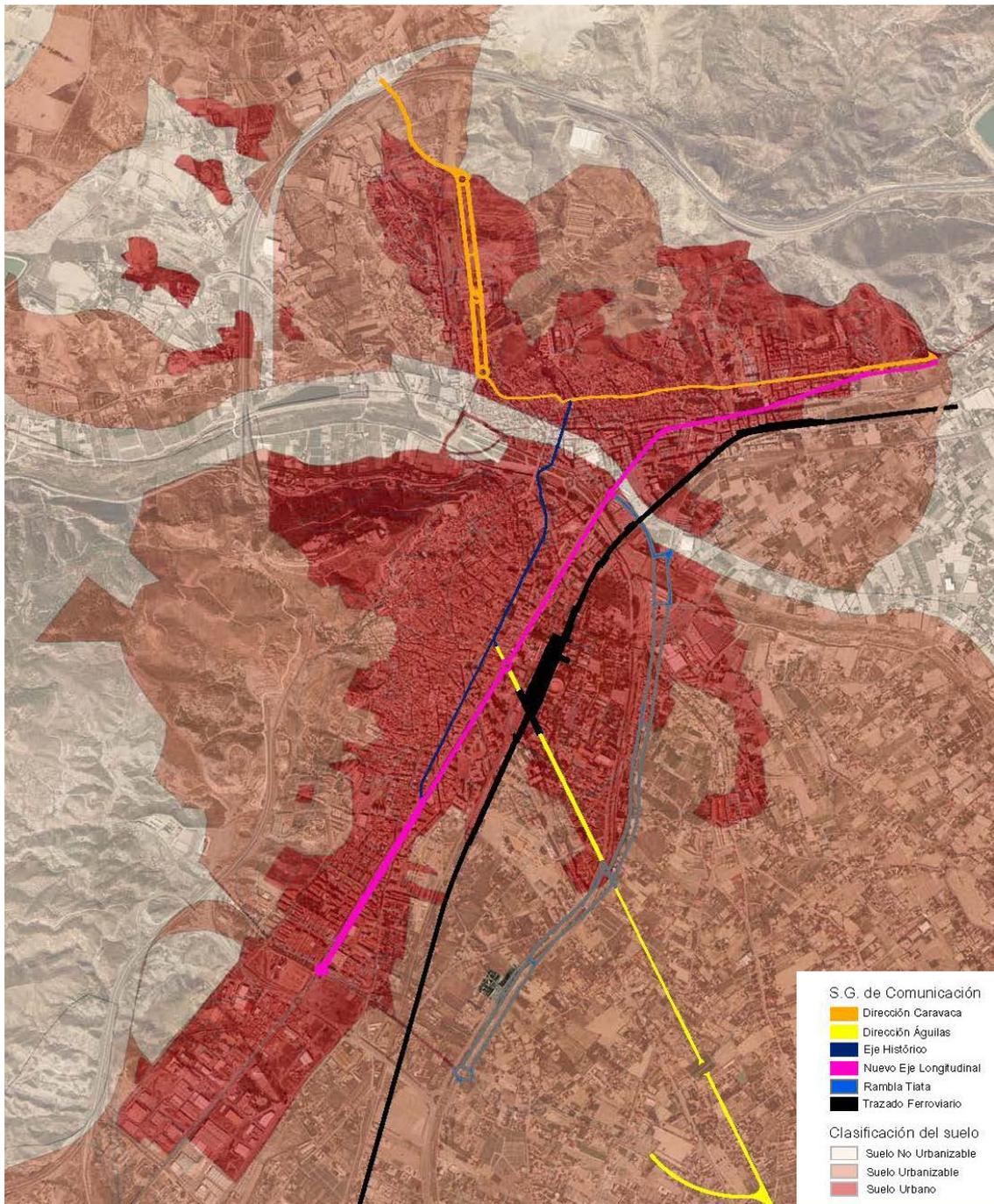


Figura 5.6 Clases de suelo de Lorca y ejes que configuran el trazado urbano de la ciudad

Existe una gran variedad de tipologías edificatorias en la ciudad residencial completamente mezcladas entre sí, produciéndose saltos bruscos de unas a otras, conformando un paisaje urbano inquietante.

Las entradas a la ciudad ofrecen una percepción de la misma pobre y desordenada, sin un control efectivo de los accesos y a través de tejidos urbanos discordantes.

En la Figura 5.7 se puede observar una vista del sector central y occidental del núcleo urbano. La fotografía está tomada desde el Castillo, situado en las estribaciones de la sierra, y muestra las

primeras laderas de ésta, la vega del Guadalentín y, en último plano, las sierras litorales. En el centro de la imagen se sitúa el barrio de La Viña, uno de los más afectados.



Figura 5.7 Vista del entorno de Lorca tomada desde el Castillo

A consecuencia de su situación en ladera, la ciudad se desarrolla en una pendiente continua, aunque muy irregular, lo que ha condicionado la configuración estructural de muchos de sus edificios. La misma situación en ladera justifica una estructura geotécnica compleja. Mientras que los barrios altos, a los pies del Castillo, se asientan en general sobre roca o terreno duro, los barrios más recientes ocupan ya suelos sedimentarios formados por transporte de materiales de erosión. Adicionalmente, el propio desarrollo de la ciudad ha suavizado el perfil original, rellenando ramblas y rebajando los perfiles más abruptos.

5.4.3 Plan General de Ordenación Urbana de Lorca

El Plan General Municipal de Ordenación de Lorca resulta aprobado definitivamente por Orden resolutoria del Excmo. Sr. Consejero de Obras Publicas de la Región de Murcia, en fecha 18 de abril de 2003 y publicado en el B.O.R.M en fecha 19 de junio de 2003. El texto refundido de la Normativa Urbanística resulto aprobado por Orden resolutoria del Excmo. Sr. Consejero de Obras Publicas en fecha 28 de mayo de 2008 y publicado en el B.O.R.M en fecha 08 de julio de 2008.

El Plan General de Ordenación Urbana de Lorca está compuesto por 15 Tomos, del Tomo I al Tomo V contiene la Memoria de Ordenación, Memoria Urbanística, Memoria Urbanística-Fichas, Memoria de Gestión, Programa de Actuación y Estudio Financiero, del Tomo VI al Tomo XI los Planos de Zonificación y Planos de Gestión y del Tomo del XII al XV el Catálogo de bienes protegidos, Catalogo de árboles monumentales, Impacto Ambiental y Estudio de Tráfico. En nuestra línea de investigación vamos a estudiar las Normas Urbanísticas que desarrolla el Plan General.

La finalidad del Plan General es la ordenación urbanística del territorio del Municipio, estableciendo los regímenes jurídicos correspondientes a cada clase y categoría del suelo, delimitando las facultades urbanísticas propias del derecho de propiedad del suelo y especificando los deberes que condicionan la efectividad y ejercicio de dichas facultades.

El Plan General se redacta con el contenido y alcance previstos en los artículos 96 y siguientes de la Ley 1/2001 del Suelo de la Región de Murcia y arts. 14 al 42 del Reglamento de Planeamiento Urbanístico.

El Plan General Municipal de Ordenación Urbana (PGMOU), como integrador de todas las políticas con incidencia en la ciudad, profundiza en el conocimiento de los problemas existentes que configuran la ciudad actual, el sistema de asentamientos rurales que se desarrollan en su término municipal, y las tensiones que se producen en su vasto territorio. El PGMOU propone un modelo territorial y urbano equilibrado, con actuaciones diseñadas a largo y corto plazo, con el objeto de solucionar los problemas fundamentales de funcionamiento que presentan la ciudad y los núcleos rurales, así como las interacciones medioambientales no deseadas que se producen en el territorio. En el Capítulo 7, del Tomo I: Memoria de Ordenación del PGOU de Lorca, se definen los criterios y objetivos del modelo territorial y urbano adoptado.

Como se ha comentado en el capítulo anterior “Contenido documental del Plan General”, la memoria de ordenación “*debe establecer las conclusiones de la información de las que se deduzca condicionantes para la ordenación del territorio.....*”. En la propuesta de ordenación del PGOU de Lorca (capítulo 8) no se hace referencia al riesgo sísmico, ni se condiciona la ordenación territorial y planificación urbanística de la ciudad a la existencia de una falla que atraviesa la ciudad. Una de las cosas que nos ha enseñado el terremoto de Lorca de mayo de 2011 es que no se requieren magnitudes grandes en esta zona para que se generen efectos catastróficos si la falla responsable está lo suficientemente cerca de las poblaciones afectadas (Martínez-Díaz, J.J. et al., 2012), por esto se considera que los PGOU en zonas de riesgo sísmico deben tener en cuenta estas consideraciones tanto en la ordenación territorial como en el planeamiento urbanístico. En la Figura 5.8 se muestran los epicentros de las réplicas (puntos naranjas y amarillo) y la situación de la ciudad de Lorca respecto a las fallas.

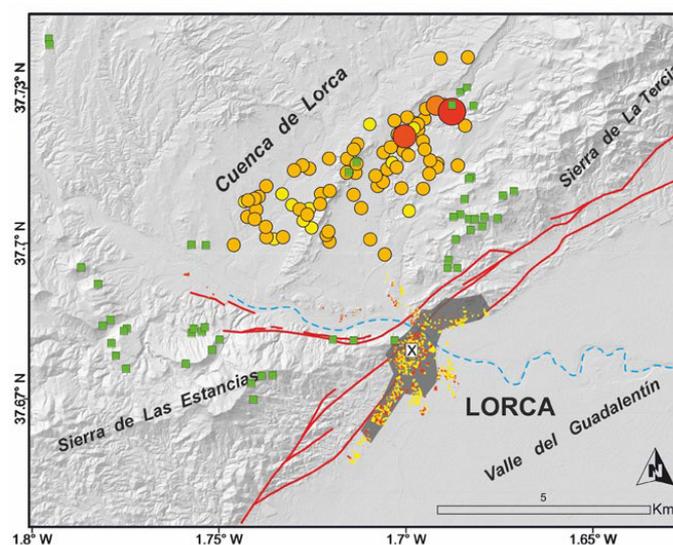


Figura 5.8 Mapa que muestra la distribución de los efectos del terremoto de Lorca. La línea roja es la traza de la Falla de Albama de Murcia. Los puntos amarillos y naranjas son las réplicas producidas por el terremoto principal que se marca con el punto rojo de mayor tamaño, según datos del Instituto Andaluz de Geofísica. Los pequeños polígonos de colores rojos y amarillos representan los edificios que sufrieron daños estructurales (según datos de la Comunidad Autónoma de Murcia) (José J. Martínez Díaz, 2012)

5.4.4 Normativa Urbanística

El Tomo II del Plan General contiene las Norma Urbanísticas del Municipio de Lorca. La ordenación del Plan General contiene propuestas concretas para el territorio, las pedanías y núcleos rurales, y la ciudad de Lorca. El modelo de ciudad que propone el Plan General trata de garantizar la consecución a largo plazo de una ciudad estructurada frente a la disgregación de barrios que hoy la componen.

En la Normativa Urbanística del Plan General se establece una ordenación pormenorizada para toda la ciudad, especificando manzana a manzana la calificación y tipología de cada una de ellas, fijando los equipamientos en las distintas zonas de la ciudad con el fin de garantizar una ciudad equilibrada.

Respecto a la calificación, los usos se clasifican en los siguientes grupos: a) Residencial: Vivienda, Residencia Comunitaria; b) Garaje-aparcamiento; c) Servicios terciarios: Comercial, Oficinas, Hotelero, Hostelero, Servicios Recreativos, Estaciones de suministro de combustibles, Otros servicios terciarios; d) Industrial: Industria en general, Almacenaje; e) Agropecuario; f) Dotacional: Deportivo, Equipamientos, Servicios de la Administración Pública, Servicios urbanos, Servicios infraestructurales básicos y g) Espacios libres y zonas verdes.

Las Normas Urbanísticas determinan las condiciones particulares de cada uso y para el residencial definen los siguientes tipos básicos de edificación:

a) Residencial multifamiliar en manzana cerrada con patio central: Es aquella en la que por la limitación de fondos máximos de edificación resulta un espacio interior no edificable.

b) Residencial multifamiliar en manzana cerrada densa: Es aquella en la que se ocupa toda la parcela, pudiendo disponer de patios interiores que deberán cumplir lo establecido en el art. 88.3.

c) Residencial multifamiliar abierta: Es aquella que está constituida por cuerpos de edificación, alineados o no con las vías públicas, teniendo todo su frente la consideración de fachada; las condiciones de edificación serán las establecidas en la ficha de ordenanza de edificación abierta, teniendo en cuenta que H se refiere a la altura definida en el art. 68 del bloque más alto.

a) Residencial unifamiliar:

- Aislada: Es aquella que tiene todas sus fachadas exentas y retranqueadas de los linderos de la parcela.
- Adosada o Pareada: Es aquella que tiene un testero unido a otra vivienda unifamiliar contigua.
- Agrupada: Es aquella que tiene dos o tres testeros unidos a viviendas unifamiliares contiguas, teniendo siempre una fachada retranqueada respecto a los límites de la parcela.

- Entre medianeras: Es aquella que tiene dos o tres testeros unidos a viviendas unifamiliares, quedando la fachada situada en la alineación oficial.

a) Normas de edificación y Ordenanzas

Las Normas de edificación tienen por objeto definir las condiciones que deben regular la edificación con independencia de la clase de suelo en la que se asiente.

Son aplicables a las obras de nueva edificación y a las obras en los edificios que supongan una alteración de las propias condiciones reguladas, exigiéndose en este último supuesto únicamente el cumplimiento de la condición afectada por la alteración. Se concretan en la normativa propia del uso a que se destine, en la ordenanza particular de aplicación o en la ordenanza particular de los planeamientos de desarrollo correspondiente. El PGOU de Lorca del artículo 63 al artículo 101 de las Normas Urbanísticas define los siguientes parámetros de edificación para todas las clases de suelo: parcela, alineaciones, retranqueos, rasante oficial, altura de patios, altura de la edificación, medición de la altura de edificaciones, altura libre mínima de planta, construcciones permitidas por encima de la altura máxima, planta semisótano, planta sótano, condiciones para los sótanos y semisótanos, planta baja, entreplanta, planta piso, ático, aprovechamiento bajo cubierta, cubiertas, edificabilidad, superficie útil y construida, superficie máxima edificable, superficie máxima ocupable de parcela, fondo edificado o edificable

La definición de estos parámetros no puede ser una operación independiente y posterior a la configuración planimétrica del Plan, a la definición de sus trazados y calificación pormenorizada; las definiciones tipológicas deben estar íntimamente relacionadas con la adscripción de usos y la configuración de las formas y dimensiones de las manzanas edificables y, por tanto, con la lógica de trazado (alineaciones) del conjunto del ámbito (y, por supuesto, con las determinaciones topográficas y de todo orden que sobre el inciden). De ahí la importancia de la fase de diseño del esquema básico de ordenación espacial, etapa donde se deben conjugar las distintas alternativas que se abren en cada campo (tipos edificatorios, geometría del tejido o trama urbana, distribución de usos, etc.) para obtener una o varias propuestas en las que quede asegurada su coherencia interna.

Generalmente, las condiciones o reglas que deben cumplir la edificación y los usos en cada zona se expresan en las Ordenanzas. El Tomo III del PGOU de Lorca incluye las ordenanzas en cada clase de suelo: urbano, urbanizable y no urbanizable.

Las Ordenanzas indican cuales son los parámetros urbanísticos, que han sido definidos con anterioridad en las Normas de edificación, que deben aplicarse en cada clase de suelo. El esquema en cada clase de suelo en las Ordenanzas de Lorca es el que se muestra a continuación:

- ZONA DE ORDENANZA
- TIPOLOGÍA USOS

- Característicos
- Complementarios
- Compatibles
- Prohibidos
- PARCELACIÓN
 - Parcela mínima
 - Frente mínimo
 - Retranqueos mínimos
 - Fachada
 - Lindero
- VOLUMEN
 - Fondo máximo
 - Altura máxima
 - Sótano
 - Bajo cubierta/Ático
- CONDICIONES DE PARCELACIÓN
- CONDICIONES DE VOLUMEN
- CONDICIONES ESTÉTICAS

La unión de todos estos parámetros definirá la configuración urbanística de cada zona de la ciudad, por ello su vital importancia a la hora de planear una ciudad en zona de riesgo sísmico. Los componentes de la ciudad no son vulnerables por sí mismos, sino que tienen que estar expuestos a una amenaza sísmica determinada y tienen que tener características propias de diseño y construcción que son las que los hace vulnerables. Hay que tomar en cuenta al edificio como componente de la ciudad, el edificio y su relación con la infraestructura urbana y los edificios adyacentes y el edificio en sí mismo; es decir, el edificio en los tres niveles de intervención urbana: planificación urbana, diseño urbano y arquitectura.

b) Normas complementarias para facilitar el realojo, la reconstrucción y reparación de inmuebles afectados, por acciones sísmicas y catastróficas

Después del terremoto del 11 de mayo de 2011, con fecha 28 de Noviembre de 2011 se aprueban definitivamente las Normas complementarias para facilitar el realojo, la reconstrucción y reparación de inmuebles afectados, por acciones sísmicas y catastróficas. Las Normas son promovidas por el Excelentísimo Ayuntamiento de Lorca, y son redactadas por la Arquitecta Municipal Doña María García Martínez como Jefa de Servicio de Planeamiento y Gestión del Área de Urbanismo de Lorca.

“El objeto de las Normas Urbanísticas Complementarias es establecer las condiciones que deben cumplir todas y cada una de las actuaciones urbanísticas a realizar para permitir y facilitar la reconstrucción y reparación de los inmuebles demolidos y dañados accidentalmente así como facilitar el realojo de los afectados como consecuencia de acciones sísmicas y catastróficas, tales como los terremotos acaecidos el pasado 11 de Mayo de 2011 en la ciudad de Lorca.

La finalidad de las Normas Urbanísticas Complementarias es regular aspectos no previstos por el Plan General o insuficientemente desarrollados por éste o su modificación no sustancial para permitir y facilitar la reconstrucción y

reparación de los inmuebles demolidos o dañados accidentalmente como consecuencia de acciones sísmicas y catastróficas, en desarrollo y complemento de la Normativa vigente del Plan General Municipal de Ordenación de Lorca.

La redacción de las normas se produce para solucionar los problemas existentes entre la vigente normativa del Plan y la necesidad sobrevenida de reconstruir las edificaciones dañadas y demolidas como consecuencia de los movimientos sísmicos producidos en Lorca el pasado 11 de Mayo de 2011.”

Su contenido y determinaciones serán los señalados en el artículo 104 del Texto Refundido de la Ley del Suelo de la Región de Murcia. Las Normas complementarias son un documento adjunto al Tomo II "Normativa" del Plan General y el rango jerárquico de las Normas Complementarias será el mismo que el del Plan General.

Los Capítulos 2 y 3 desarrollan las Normas excepcionales para la reconstrucción y rehabilitación de inmuebles aplicables a cada una de las clases de suelo establecidas por el Plan y el Capítulo 4 recomendaciones constructivas para la reconstrucción y rehabilitación de los inmuebles afectados en el terremoto.

Como indica la Norma, estas recomendaciones constructivas a tener en cuenta para las obras de rehabilitación y de nueva construcción son debidas a los daños más comunes causados en los edificios como consecuencia de las acciones sísmicas acaecidas el 11 de mayo de 2.011, pilares cortos, planta baja diáfana, antepechos, voladizos

Cómo se ha comentado anteriormente un caso típico de cambio de rigidez son las plantas bajas diáfanas en edificios de plantas superiores muy compartimentadas, aspecto que es preferible evitar pero que, en caso de existir, implica una diferencia de rigideces entre plantas que deberá tenerse en cuenta en el proyecto.

Evitar esta circunstancia no siempre es fácil. El Plan General Municipal de Ordenación Urbana (PGMO) de Lorca establece como alturas mínimas:

- 3,00 m en locales comerciales,
- 3,20 m en locales de hostelería y
- 2,50 m en viviendas.

Esta es la razón por la cual la aprobación inicial de las normas complementarias del PGMO de Lorca ha establecido que en locales diáfanos *“se debería utilizar fábrica armada o similar con un sistema de cerramiento ligero con perfilera metálica y placa de yeso, hasta una altura equivalente a la de la planta baja del edificio del que forma parte, hasta tanto no se obtenga la necesaria licencia de apertura o actividad”*.

Estas recomendaciones y precauciones no se refieren únicamente al hecho de que la planta inferior sea más flexible, como ocurre en las plantas diáfanas. En otros casos, puede darse la situación contraria con elementos de gran rigidez. Este es el caso de edificios con presencia de soportes cortos, muy rígidos, sobre los muros de sótano.

El mismo efecto puede darse en los casos de pilares de dimensiones convencionales coaccionados por cerramientos que no alcanzan toda la altura de los pilares, convirtiendo a éstos en pilares cortos no proyectados con esa geometría.

De nuevo la aprobación inicial de las normas complementarias del PGMO de Lorca ha establecido que *“se deberían evitar los pilares cortos (enanos) en planta baja- semisótano”* recomendando *“prolongar los muros de sótano hasta su unión con el forjado suelo de planta baja, y en caso de la necesidad de abrir huecos en los alzados del muro para ventilación, hacerlo con un máximo de 1/3 de su longitud”*.

5.5 TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE LORCA

En este apartado se hace una primera descripción general de las tramas urbanas y las distintas tipologías constructivas de Lorca transcribiendo la documentación del actual libro “El terremoto de Lorca. Efectos en los edificios” de Septiembre de 2013 redactado por Ramón Álvarez Cabal, Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma y Raúl Rodríguez en su Capítulo 1, Descripción general del entorno.

La ciudad se desarrolla desde los pies del Castillo hacia la Vega en distintas fases, lo que explica las diferentes tramas urbanas y tipologías edificatorias de la ciudad.

El trazado urbano de los barrios más antiguos, que se sitúan en un primer plano en la Figura 5.7, resulta claramente irregular. Los edificios son de menor altura y, en general, también de menor volumen. En un segundo plano se aprecia una construcción más moderna, que sigue trazados más regulares y edificios de mayor volumen. Tras ellos se distinguen ya varias torres exentas de cierta altura (más de 10 plantas). La Vega está ocupada por viviendas unifamiliares aisladas.

La parte más antigua del casco urbano está ocupada por construcciones murarias de no más de dos o tres alturas y otras tantas crujiás Figura 5.9.



Figura 5.9 Vista de la edificación en el casco antiguo de Lorca

La parte más extensa de la ciudad corresponde a las épocas de más rápido desarrollo económico, que en este caso probablemente se sitúa en los años 70 del pasado siglo, lo que actualmente constituye la Avenida Juan Carlos I y Avenida de Europa. Esta parte de la ciudad responde a una configuración reconocible y asimilable a la de muchas otras ciudades españolas. Las calles, de mayores dimensiones y trazado relativamente regular, forman manzanas en las que se construyen edificios de cierta altura (entre 6 y 9 plantas) al lado de otros más bajos y sin separación real entre ellos (Figura 5.10) En muchos casos no existe ninguna continuidad en los niveles de las plantas, de tal forma que los forjados de los edificios aledaños se sitúan a distinta altura. Esta configuración urbana se sigue empleando en muchas promociones recientes, si bien en estos casos se sitúan en zonas periféricas de nuevo trazado en las que el volumen de la edificación es muy superior.



Figura 5.10 Convivencia entre tipología edificatoria tradicional y tipología edificatoria actual

Con independencia del esquema general descrito, la ciudad cuenta con algunos desarrollos puntuales de carácter específico. Es el caso de barrios como el de Alfonso X o como el de San Fernando, erigido para alojar a los afectados por las riadas de 1973. Las edificaciones de estos barrios responden a combinaciones de un modelo único.

De acuerdo al informe emitido por el IGN, 2011 sobre el terremoto de Lorca, el arquitecto Patrick Murphy hace la siguiente diferenciación en las tipologías constructivas de Lorca. Indica que al tratarse de una ciudad histórica, Lorca posee un parque inmobiliario variado donde conviven tipologías constructivas de edad y naturaleza variada. A la hora de analizar los distintos tipos de edificios, conviene diferenciar entre tipologías tradicionales de construcción, basadas en la principios empíricos de buena práctica constructiva heredada a través de la tradición, y la edificación tecnológica, que empieza a generalizarse en nuestro país a mediados del siglo XX.

Edificación tradicional

El casco histórico de Lorca está compuesto principalmente por estructuras murarias de mampostería de piedra. Los forjados son de madera, sin que se pueda considerar un efecto diafragma rigidizante. Estas tipologías son consideradas de alta vulnerabilidad debido a la gran masa que poseen y el escaso empotramiento entre los planos murarios.

Los edificios singulares como los eclesiásticos y parte de la expansión del siglo XIX poseen fábrica de ladrillo que mejoran el empotramiento entre planos murarios y reducen la masa de la edificación, considerándose por ello menos vulnerables que la edificación de mampostería.

Dependiendo de la masa de la edificación y el grado de empotramiento entre distintos elementos de acuerdo a buenas prácticas constructivas, en términos de vulnerabilidad podemos clasificar la edificación tradicional en tres tipologías básicas (Rodríguez, 2011):

- Estructura muraria de mampostería ordinaria más forjados madera sin efecto diafragma.
- Estructura muraria de fábrica de ladrillo más forjados de madera sin efecto diafragma.
- Estructura muraria de fábrica de ladrillo más forjados de hormigón armado con efecto diafragma.

Edificación tecnológica

A mediados del siglo XX aparecen las normas técnicas de obligado cumplimiento. Es una fecha conveniente para diferenciar la edificación tradicional, basada en buenas prácticas constructivas, de la edificación tecnológica donde se definen y calculan las sollicitaciones sobre las estructuras. Asimismo, la aparición de este tipo de estructuras supone un cambio conceptual importante donde el cerramiento del edificio pasa a considerarse no estructural. Dado que el parque inmobiliario de Lorca posee edificios de todas las edades, el análisis de este tipo de estructuras obliga a considerar todas las normas sismorresistentes publicadas hasta la fecha.

5.5.1 Matriz de tipologías constructivas

Se ha realizado una clasificación de las tipologías constructivas que podemos encontrar en la ciudad de Lorca de acuerdo a las clases que establece el proyecto Risk-UE y a los años de entrada en vigencia de las distintas normativas sismorresistentes en España (ver Tabla 5.1).

Una vez identificadas las tipologías constructivas que hay en Lorca y previo al trabajo de campo, igual que se hizo en los parámetros urbanísticos, se han codificado las tipologías constructivas (Figura 5.11) según el tipo de estructura que tienen. Esta codificación nos será muy útil para realizar de una manera ágil el trabajo de campo y para insertar los datos en un sistema de información geográfica y la posterior realización del análisis de vulnerabilidad.

Tabla 5.1. Tipologías constructivas existentes en Lorca y relación con el proyecto Risk-UE

CLASIFICACIÓN DE LAS EDIFICACIONES DE USO RESIDENCIAL DE LORCA		
ÉPOCA	TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA	RISK-UE
≤ 1920	Estructura muraria de mampostería ordinaria + forjado de madera. Pueden llevar sillería en planta baja.	M1.1, M1.2 y M1.3
1921-1940	Estructura muraria de fábrica de ladrillo y forjado de madera. Estructura muraria de mampostería ordinaria + forjado de madera	M3.1 M1.1, M1.2 y M1.3
1941-1963	Estructura muraria de fábrica de ladrillo y forjado de hormigón armado.	M3.4
1964-1996 Código bajo	Estructura muraria de fábrica de ladrillo y forjado de hormigón armado. Estructura de pórticos de hormigón armado.	M3.4 RC1
1997-2004 Código medio	Estructura de pórticos de hormigón armado. Estructura metálica.	RC1 S1
>2004 Código medio	Estructura de pórticos de hormigón armado. Estructura metálica.	RC1 S1

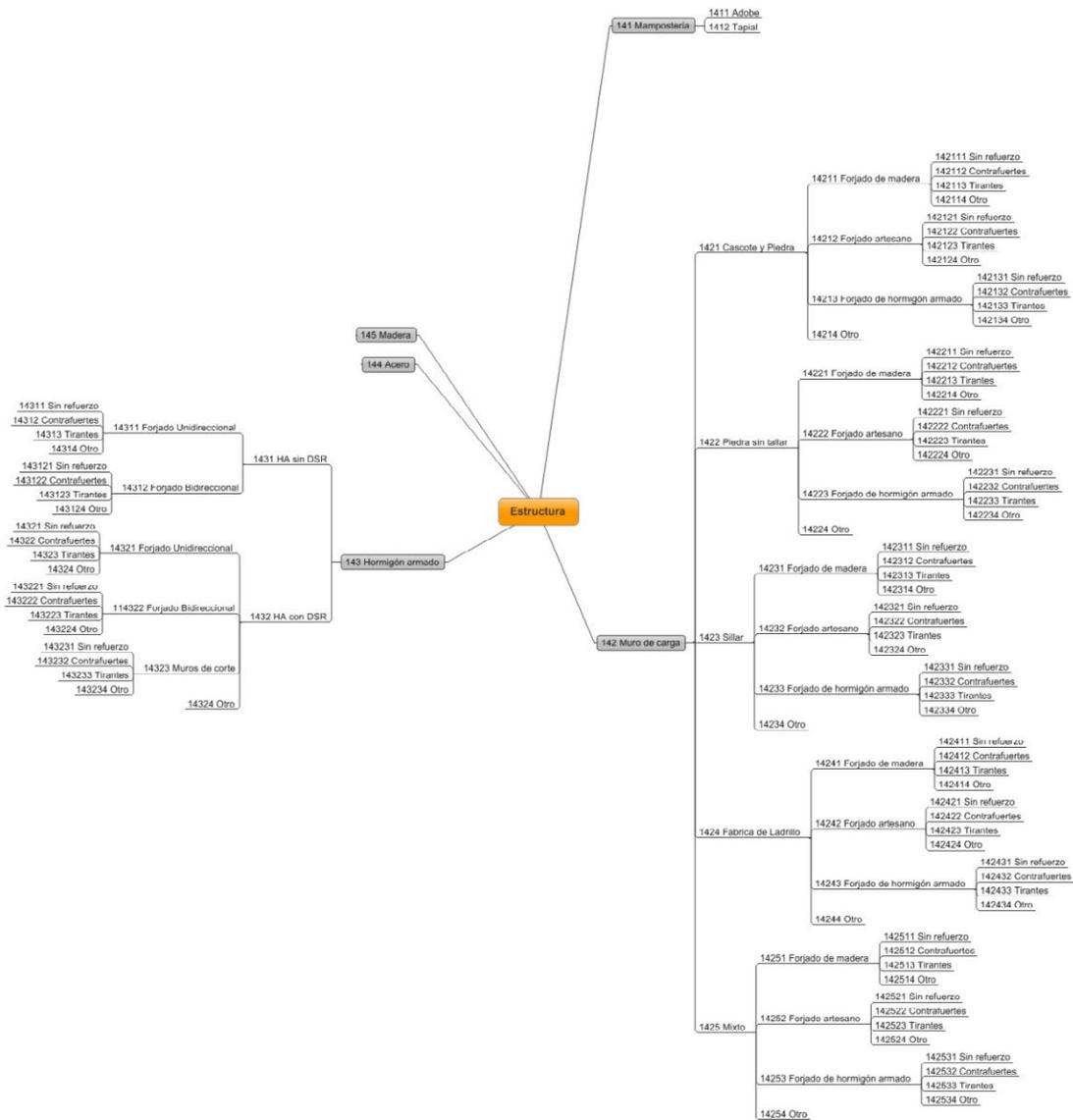


Figura 5.11 Esquema codificado de las Tipologías Constructivas y sus respectivos niveles

5.6 DESCRIPCIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS DEL TERREMOTO DEL 11 DE MAYO DE 2011 EN LORCA

En Septiembre de 2013 el grupo Intemac y el Consorcio de Compensación de Seguros del Ministerio de Economía y Competitividad han publicado el libro “El terremoto de Lorca. Efectos en los edificios”. El Capítulo 2 explica los daños observados en elementos arquitectónicos y no arquitectónicos. Describe de la siguiente manera la primera impresión de la ciudad nada más producirse el terremoto:

“Muchas de las calles de Lorca presentaban el aspecto que refleja la Figura 5.12. En las aceras, sobre los automóviles y dispersos en la calzada aparecían restos de albañilería, en ocasiones paños enteros de fachadas, parapetos y todo tipo de cascotes. Aunque la imagen se repetía en todos los barrios de la ciudad independientemente de su situación resultaba especialmente clara en los formados por edificios modernos, entendiéndose por tales los dotados de estructura diferenciada del cerramiento, frente a los más antiguos, en los que predominaban los edificios con muros.”

Los daños estructurales, en cambio, no eran tan evidentes en esta primera impresión. Dejando de lado las construcciones históricas, tan sólo un edificio colapsó de forma completa, aunque fueron varios los colapsos parciales.”



Figura 5.12 Escombros sobre las aceras tras el terremoto de Lorca de 2011

5.6.1 Daño en elementos no estructurales

Generalmente, los daños no estructurales se deben a la unión inadecuada entre los tabiques, las instalaciones y la estructura, o a la falta de rigidez de la misma, lo que se traduce en excesivas deformaciones que no pueden ser absorbidas por este tipo de componentes.

Los daños no estructurales más comunes son el agrietamiento de tabique de mampostería, el aplastamiento de las uniones entre estructuras y los elementos no estructurales, el desprendimiento de acabados y la rotura de vidrios y de instalaciones de diferente tipo.

El fallo o desprendimiento de elementos no estructurales puede representar un riesgo para la vida de las personas, pero no genera normalmente el colapso de los edificios, salvo cuando los tabiques contribuyen, sin estar proyectados para este fin, a absorber las sollicitaciones que la estructura no haya sido capaz de soportar.

En el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011, la caída de elementos no estructurales, ocurría en los petos de cubierta así como, en menor medida, algunos paños de cerramiento situados preferentemente en las plantas altas, parecían haber colapsado ante las sollicitaciones normales a su plano, fuerzas de inercia causantes de los esfuerzos de flexión que el apoyo en los forjados (único mecanismo resistente en el caso de los petos) no fue capaz de resistir.

El fallo de los cerramientos de las plantas bajas Figura 5.13 seguía un patrón distinto, coherente con los esquemas de colapso ante acciones en su plano ejercidas desde el contorno. Estas acciones producen en los paños ciegos de fábrica el característico esquema de rotura en aspa que se observaba con frecuencia en los edificios de la ciudad (Ramón Álvarez Cabal et al., 2013)



Figura 5.13 Daño en los edificios en planta baja tras el terremoto de Lorca de 2011

5.6.2 Daño en elementos estructurales

Los elementos estructurales que se evalúan dependen del sistema estructural con que cuenta la edificación.

Entre los edificios con estructura de muros, y dejando al margen las construcciones históricas, los daños más evidentes consistían en la separación de los muros en sus encuentros, desencadenada sin duda por el terremoto pero cuyo origen radica en la falta de conexión eficaz entre los propios muros.

En algunos casos esta separación había llegado a producir la caída de alguno de los paños o de los forjados que entregaban en ellos (normalmente forjados de cubierta, formados por rollizos de madera y entrevigado de cañizo).

También se podían observar numerosos paños agrietados. Las fisuras, de trazado inclinado y de abertura muy variable, se tendían en muchos casos entre los huecos del paño.

En algunos solados se abrían juntas marcando la separación entre los elementos del forjado, formado normalmente por viguetas prefabricadas de hormigón armado o pretensado y un entrevigado de características muy dispares. No existía ninguna capa de compresión.

En el caso de los edificios con estructura de pórticos de hormigón armado, los daños más evidentes en una primera inspección eran los asociados a los pilares cortos. En varios edificios de la ciudad se había producido el colapso de toda la alineación de pilares de fachada, todos ellos cortos. También era fácil observar la existencia de daños graves, siempre en pilares y generalmente en las plantas bajas, debidos a la interacción entre la estructura y los rellenos de fábrica. En otros casos era el golpeteo entre edificios aledaños el que producía los daños, especialmente en aquellos casos en los que los forjados de ambos edificios no coincidían en cota.

5.6.3 Evaluación del Daño

El objetivo más importante de la evaluación de seguridad inmediata es clasificar cada edificio de acuerdo a su posibilidad de uso en función de un nivel de seguridad estimado.

La clasificación de los edificios que se empleó tras el sismo de Lorca, criterio que por otro lado está recogido en diversas recomendaciones internacionales de este tipo, la mayoría de las cuales se basan en la documentación generada por el ATC - Applied Technology Council, se basó en los siguientes niveles de seguridad:

- Verde (HABITABLE)
- Amarillo (USO RESTRINGIDO)
- Rojo (NO HABITABLE)
- Negro (RIESGO DE COLAPSO).

Gracias a los datos facilitados por el Excelentísimo Ayuntamiento de Lorca, en el Anexo I, se adjuntan las tres fichas que fueron usadas en el terremoto de Lorca, siendo la tercera la que se utilizó en las más de 6.500 evaluaciones llevadas a cabo en Lorca en los primeros días.

El Excelentísimo Ayuntamiento de Lorca nos facilitó además una serie de mapas de daños en formato .dwg (Autocad) fruto de esta evaluación desde el 11 mayo hasta el 15 de junio, casi un mes después de que ocurriera el terremoto. Tras analizarlos y eliminar los elementos especulativos, se ha realizado una cartografía en un GIS con los daños del terremoto (Figura 5.14).

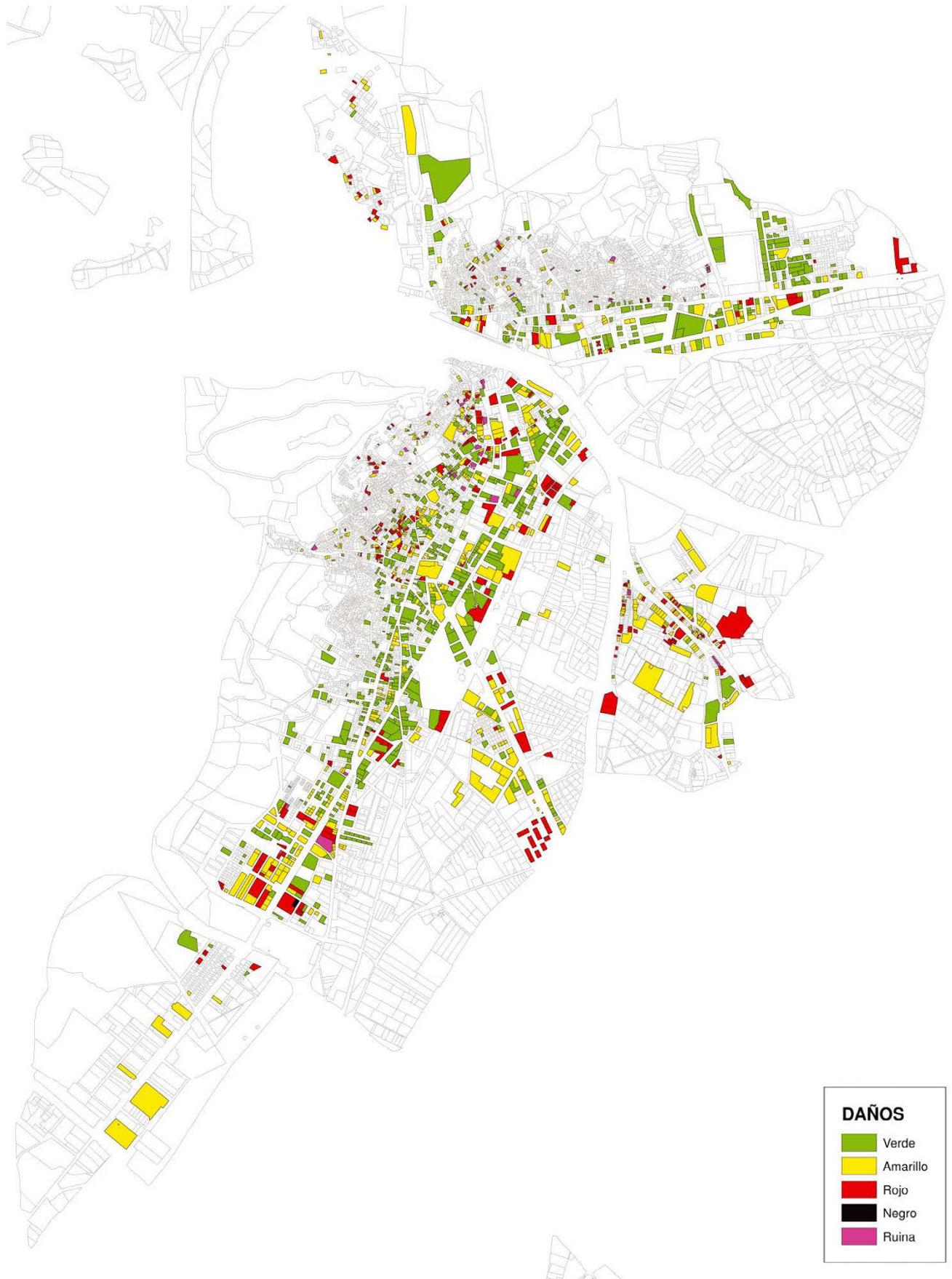


Figura 5.14 Daño en los edificios en el terremoto de Lorca

Los archivos cedidos por el Ayuntamiento de Lorca representan las edificaciones que han tenido daños con diversos colores en función de la ficha de evaluación rápida.

- **Edificios sin trama de color:** representan los edificios que no han tenido daño.
- **Edificios de color verde:** representan a los edificios sin daño estructural o que han tenido daños estructurales nulos o irrelevantes, es decir, cuando no se den daños estructurales del tipo (grietas, fracturas o pandeo de los pilares estructurales de la edificación), ni daños en albañilería gruesa (accesos y cajas de escalera accesible, fachadas sin peligro inminente de derrumbe, etc.)
- **Edificios de color amarillo:** representan a los edificios que han tenido daños estructurales moderados, es decir, cuando se den daños estructurales del tipo (grietas, fracturas y pandeo) en elementos parciales y/o superficies delimitables.
- **Edificios de color rojo:** representan a los edificios que han tenido daños estructurales graves, es decir, cuando se den daños estructurales del tipo (grietas, fractura y pandeo) de forma generalizada o en zonas parciales con riesgo de colapso inminente.
- **Edificios de color negro:** son los edificios que colapsaron en el momento del sismo. En Lorca solo se da el caso de un edificio en la zona de la Viña (no está dentro de las zonas estudiadas).
- **Edificios de color morado:** son los edificios que estaban declarados en ruina antes del evento sísmico.

• **Clasificación de la Habitabilidad**

El objetivo último del reconocimiento de emergencia es poder decidir qué edificaciones se pueden calificar como colapsadas u obviamente inseguras, y qué edificaciones pueden considerarse en condiciones aceptables de ser habitadas. Para ello se evalúa dentro del edificio su estado general, la existencia de daños en su estructura, y la existencia de daños en elementos no resistentes que pueden afectar a la habitabilidad del edificio o a la seguridad en sus inmediaciones.

A continuación se describe la clasificación de habitabilidad de edificios por niveles de seguridad realizados en el terremoto de Lorca (Tabla 5.2). En la Figura 5.15 se cartografía la habitabilidad de Lorca después del terremoto, donde se aprecia que en el Barrio de la Viña una gran cantidad de edificios de nueva construcción, con tipologías edificatorias de manzana cerrada con patio central se quedaron inhabitables y posteriormente fueron derruidos.

Para Protección Civil, esta información es muy valiosa ya que puede estimar planes de riesgo con la cuantificación de las personas que habitan en los edificios y su posterior realojo. También para las Administraciones (Ayuntamiento y Comunidad Autónoma) es muy útil este tipo de cartografías y clasificación, prever zonas públicas en los Planes Generales de Ordenación Urbana con tamaño suficiente para albergar a todas las personas que se quedarían sin vivienda.

Tabla 5.2 Clasificación de edificios por niveles de seguridad tras la evaluación del daño. Clasificación de Habitabilidad.

CLASIFICACIÓN DE HABITABILIDAD	DESCRIPCION
VERDE HABITABLE	No se encuentra en peligro aparente. La capacidad original para resistir cargas no presenta disminución significativa. No presenta evidencia de daños, salvo daños leves y muy puntuales en elementos arquitectónicos que puedan ser fácilmente reparados y que no ofrezcan peligro para la integridad de las personas. Uso del edificio permitido.
AMARILLO USO RESTRINGIDO	Presenta disminución significativa en su capacidad para resistir cargas, o bien sufrió daños importantes en elementos arquitectónicos. Ocupación condicionada a la retirada o reparación de elementos que ofrezcan peligro de caerse y a la reparación de daños estructurales. La entrada de propietarios se permite sólo con fines de emergencia, y únicamente bajo su propio riesgo. No se permite uso continuo, ni entrada al público.
ROJO NO HABITABLE	Alto riesgo, el inmueble sufrió daños estructurales y presenta disminución en su capacidad portante. Se debe evaluar la necesidad de apuntalar la edificación. Posibilidad de colapso por réplicas del sismo. Entrada al edificio prohibida.
NEGRO PELIGRO DE COLAPSO	Inmuebles que sufrieron daños generalizados en su estructura y presentan peligro de colapso o derrumbe inminente. Es necesario evacuarlos totalmente, proteger calles y edificaciones vecinas, y planificar su demolición.



Figura 5.15 Habitabilidad de los edificios tras el terremoto de Lorca

CAPÍTULO 6

CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS

Una vez identificados en la primera parte los parámetros urbanísticos que hemos descrito como irregulares en zonas sísmicas y que se pueden incluir en las Ordenanzas Municipales, se pretenden aplicar estos conocimientos a la ciudad de Lorca para poder calibrar y determinar cuáles son los parámetros urbanísticos que están asociados al daño de las edificaciones tras el terremoto del 11 de mayo de 2011.

Primero se desarrollará una metodología para la numeración y codificación de los parámetros sísmicos urbanísticos a tener en cuenta en la vulnerabilidad sísmica de las ciudades para poder posteriormente realizar el trabajo de campo de una forma más agil e implementarlos en un Sistema de Información Geográfica.

Además, con las ficha de vulnerabilidad (Figura 4.18, página 95) podemos no sólo recoger parámetros estructurales y urbanísticos, sino todos los parámetros que nos puedan ayudar a determinar el riesgo sísmico de una zona. Con esta codificación de los parámetros, ficha de vulnerabilidad y posterior trabajo de campo crearemos una base de datos de la ciudad de Lorca.

6.1 CODIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS

Los parámetros urbanísticos que se deben tener en cuenta para clasificar la vulnerabilidad urbana y que se han descrito con anterioridad en el Capítulo 4, apartado 4.2.1, Parámetros urbanísticos irregulares desde una perspectiva antisísmica se han agrupado y numerado de la siguiente manera:

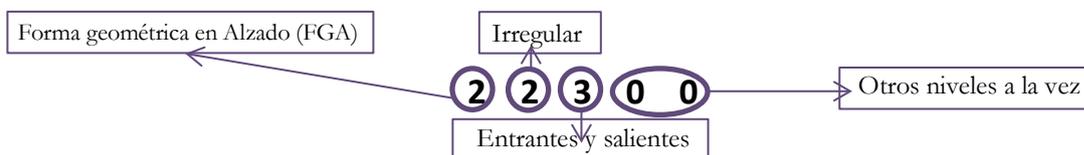
1. Forma geométrica en planta (FGP)
2. Forma geométrica en Alzado (FGA)
3. Efecto golpeteo (EFG)
4. Diferencia de altura derecha (DAD)
5. Diferencia de altura izquierda (DAI)
6. Piso blando /flexible (PBF)
7. Efecto Columna Corta (ECC)
8. Tipología Edificatoria (TED)
9. Posición del edificio en la manzana (PEM)
10. Alineaciones (ALI)
11. Posición en elevación (PEL)
12. Morfología del terreno / Pendiente (PTE)
13. Altura (ALT)

Estos parámetros se han dividido en niveles. En los distintos niveles se han incluido características urbanas específicas del lugar donde se aplica. Por ejemplo, en el parámetro urbanístico 2. Forma geométrica en Alzado (FGA), se han puesto los niveles voladizo cerrado, voladizo abierto y entrantes y salientes debido a las tipologías constructivas de Lorca. Si esta metodología se aplicará en otros lugares se podrían añadir otros niveles predominantes.

Codificación de los parámetros

Una vez numerados los parámetros se ha desarrollado la codificación de los diferentes niveles, descrita en el Capítulo 4, apartado 4.3 Obtención y tratamiento de datos: SIG.

Como ejemplo podemos ver la siguiente codificación:



22300 Sería un edificio que su forma geométrica en alzado es irregular con entrantes y salientes

22350 Sería un edificio que su forma geométrica en alzado es irregular con entrantes y salientes y además tendría escalonamiento de su fachada

En la Figura 6.1 se representa un esquema codificado de los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente y sus respectivos niveles

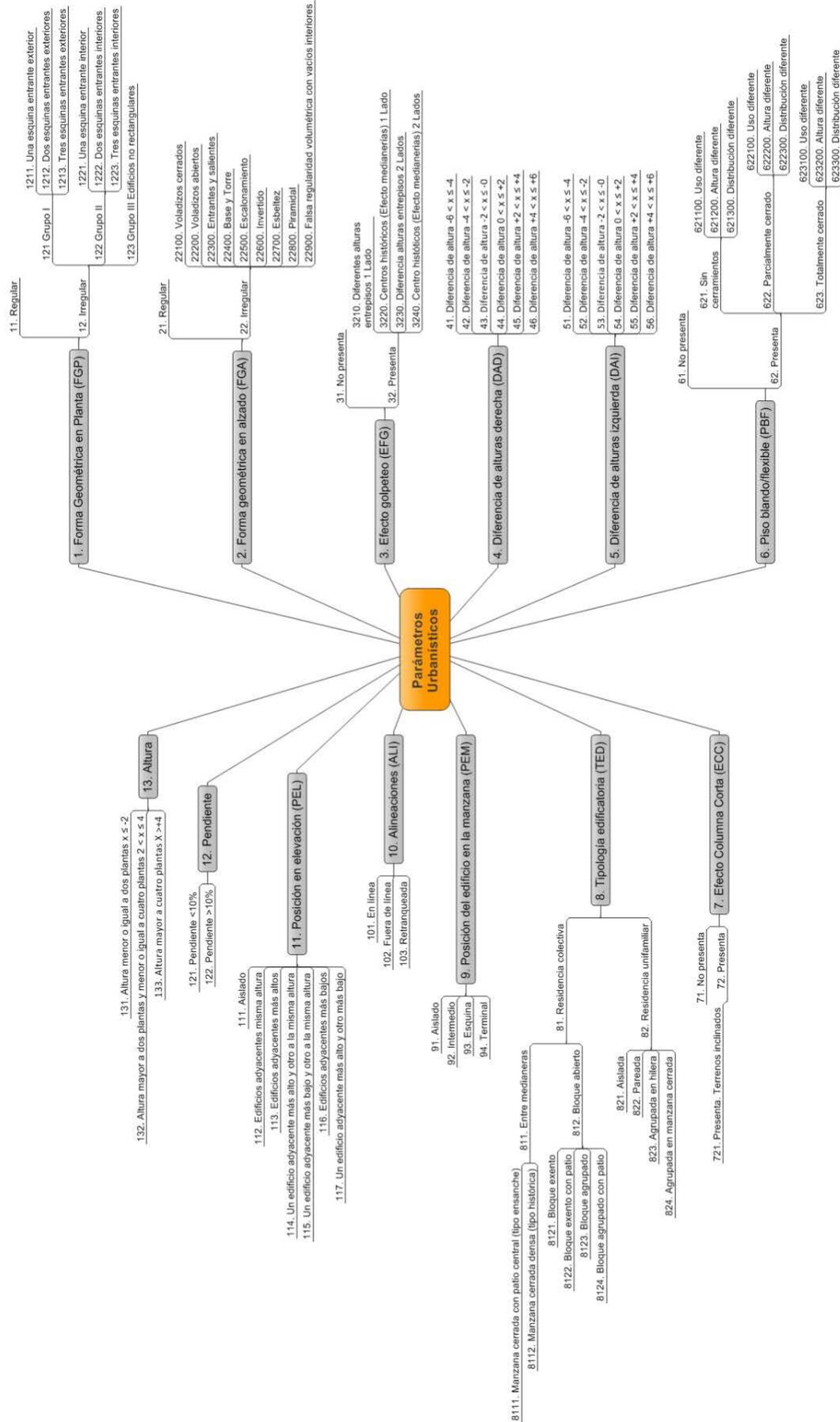


Figura 6.1 Esquema codificado de los Parámetros Urbanísticos irregulares sísmicamente y sus respectivos niveles

6.1.1 Relación entre la Norma de edificación y Ordenanzas de Lorca y los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente

Una vez analizado el Plan General de Ordenación Urbana de Lorca, su Normativa Urbanística y descritos los parámetros irregulares en zonas sísmicas y que podrían ser regulados urbanísticamente, vamos a hacer una primera aproximación para ver en qué apartados de las Normas Urbanísticas de Lorca podríamos incidir.

La Tabla 6.1A y la Tabla 6.1B muestra la relación entre los parámetros urbanísticos irregulares en zonas sísmicas y las disposiciones de las Normas Urbanísticas. Como puede apreciarse el parámetro piso blando/débil se puede regular a través de tres aspectos normativos, uso, condiciones de volumen y condiciones estéticas, mientras que el parámetro pendiente no se tiene en cuenta en las ordenanzas, y como se sabe tras varios estudios de los daños que se producen en los terremotos, las zonas con pendientes pronunciadas pueden dar lugar a un tipo de construcción con pilares cortos que produce mucho daño en las edificaciones.

Esta primera aproximación entre ingeniería sísmica y planeamiento urbanístico nos va a permitir empezar a estudiar con más detenimiento cada uno de los parámetros urbanístico-sísmico que podremos definir y cuantificar en función de su relación con el daño en las edificaciones tras un terremoto. Esto nos ayudará a reducir la vulnerabilidad de las ciudades. En esta tesis doctoral vamos a investigar estos parámetros en la ciudad de Lorca analizando los daños del terremoto del 11 de mayo de 2011.

Tabla 6.1A Relación entre los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente y objeto de estudio y las Ordenanzas Municipales del PGOU de Lorca (Tipología, Uso y Parcelación)

PARÁMETROS URBANÍSTICO	ORDENANZAS PGOU DE LORCA						
	TIPOLOGÍA	USOS			PARCELACIÓN		
		Característicos	Complementarios	Compatibles	Parcela mínima	Frente mínimo	Retranqueos mínimos
FGP							
FGA							
EFG							
DA							
PBF							
ECC							
TED							
PEM							
ALI							
PEL							
PTE							
ALT							

Tabla 6.1B Relación entre los parámetros urbanísticos irregulares sísmicamente y objeto de estudio y las Ordenanzas Municipales del PGOU de Lorca (Volumen, Condiciones de Volumen y Condiciones Estéticas)

PARÁMETROS URBANÍSTICO	ORDENANZAS PGOU DE LORCA						
	VOLUMEN				CONDICIONES DE VOLUMEN	CONDICIONES ESTÉTICAS	
	Fondo máximo	Altura máxima	Semisótano/Sótano	Bajo cubierta/Ático	Uso en planta baja	Cuerpo entrante/saliente	Cerramiento planta baja
FGP							
FGA							
EFG							
DA							
PBF							
ECC							
TED							
PEM							
ALI							
PEL							
PTE							
ALT							

donde:

FGP: Forma geométrica en planta; FGA: Forma geométrica en alzado; EFG: Efecto golpeteo; DA: Diferencia de altura; PBF: Piso blando / flexible; ECC: Efecto columna corta; TED: Tipología edificatoria; PEM: Posición del edificio en la manzana; ALI: Alineaciones; PEL: Posición en elevación; PTE: Pendiente y ALT: Altura

6.2 CAMPAÑAS DE CAMPO TRAS EL SISMO DE LORCA DE 2011

En este apartado se hará una descripción de todo el procedimiento seguido desde la obtención de los primeros datos hasta la creación de una base de datos de las unidades constructivas de la ciudad de Lorca. Se abarcarán los siguientes puntos:

- La obtención de los datos de partida, que son los datos en los que se apoya este estudio.
- La toma de datos en campo, parte muy importante en este proyecto y que lo diferencia del resto de trabajos existentes sobre la materia.
- El tratamiento de los datos, es la etapa que requirió más tiempo y trabajo y que dio como resultado la obtención de una extensa y completa base de datos con información sobre las construcciones de Lorca, que finalmente se implementó en un Sistema de Información Geográfica.

TRABAJO DE CAMPO

Tras haber seleccionado y codificado los parámetros urbanísticos a estudiar junto con las tipologías constructivas, se está en disposición de realizar el trabajo de campo. Se ha desarrollado un exhaustivo trabajo de campo para poder evaluar la vulnerabilidad sísmica de los edificios. Dada la

gran cantidad de edificios existentes de Lorca que hacen inviable el estudio de la ciudad completa edificio a edificio, se ha optado por dar más importancia a la calidad de los datos frente a la cantidad, es decir, se ha seleccionado una muestra aleatoria y representativa de los parámetros urbanísticos con 816 edificios. Se ha analizado edificio por edificio, observando las características de cada unidad constructiva de forma directa. Muchos estudios consultados abarcan por lo general zonas mucho mayores, pero se basan en datos estadísticos para hacer sus análisis. En esta investigación, basada en una metodología empírica de investigación, debido a la novedad de los parámetros estudiados, y ser el primer estudio que se realiza de este tipo, se ha considerado que para poder calibrar la muestra, es imprescindible tener una buena base de datos con la que trabajar.

Trabajo de gabinete previo. Delimitación de las zonas de estudio.

Previamente a las salidas de campo, se analizan los datos existentes y se tratan para facilitar la toma de datos. Los datos existentes usados son los de catastro, que los hemos descargado como hemos descrito en el capítulo de la línea metodológica, datos catastro.

Se seleccionaron las zonas de estudio de la ciudad de Lorca representativa de los parámetros que queríamos analizar y de los daños que se produjeron en el terremoto a través de las ortofotos, del shapefile y de Google Earth. Se optó por tres zonas (Figura 6.2) que se consideró que reunían todas las tipologías edificatorias existentes en Lorca y que entre las tres formaban un tamaño de muestra lo suficientemente grande como para poder obtener unas conclusiones fiables. Dos zonas se encuentran en la parte norte de la localidad de Lorca, separadas por el río Guadalentín y la otra zona pertenece al Barrio de la Viña.

La zona 1, que forma parte del Barrio de San Diego, está compuesta por un total de 91 edificaciones, contiene en su mayoría edificios multifamiliares de varias alturas, con años de construcción que van desde 1890 a 2011, con formas en planta variadas y presenta prácticamente todas las posiciones posibles dentro de la manzana. La tipología edificatoria predominante es de bloque colectivo en manzana cerrada tipo histórico y la tipología estructural de pórtico de hormigón armado.

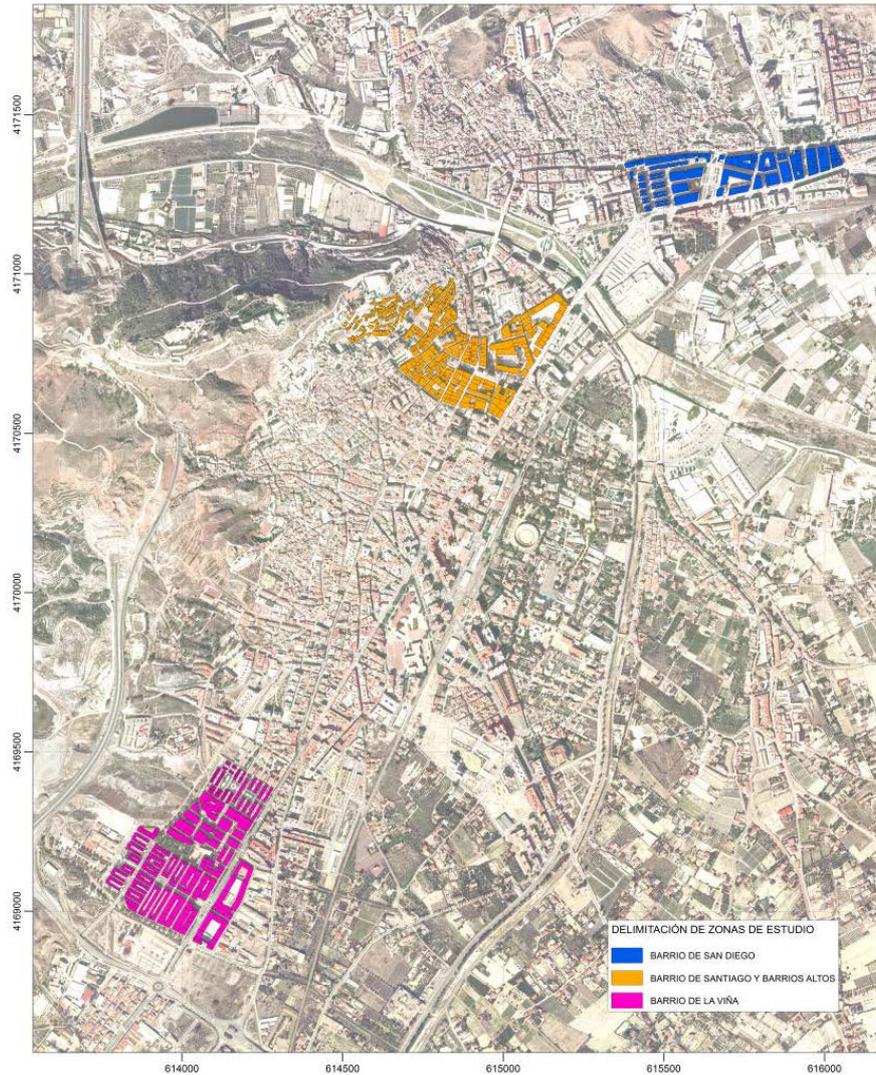


Figura 6.2 Situación de las edificaciones de las tres zonas seleccionadas en Lorca (Barrio de San Diego, Barrio de Santiago y barrios Altos y Barrio de la Viña)

La zona 2, más extensa, abarca parte de los Barrios Altos (mitad noroeste) y el Barrio de Santiago (mitad noreste), y está compuesta por un total de 375 edificaciones. Los Barrios Altos se caracterizan por tener construcciones unifamiliares bajas y antiguas (algunos con más de 100 años de antigüedad, el más antiguo de 1700), generalmente de mampostería. En el Barrio de Santiago nos encontramos mayoritariamente con viviendas en bloque, tanto de hormigón como de mampostería, de más altura (tienen una media de 4 alturas) y se caracteriza por disponer de viviendas muy juntas, con calles estrechas.

La zona 3, con 350 edificaciones pertenece al Barrio de La Viña, que fué uno de los más castigados en el terremoto. En el Barrio de la Viña existe edificación desde 1970 hasta la actualidad. La tipología edificatoria predominante es de manzana cerrada con patio central, tipo ensanche y de estructura de hormigón armado. Al oeste del Barrio de la Viña, hay viviendas unifamiliares, de 2 alturas, adosadas o en hilera, también con estructura de hormigón armado.

Una vez elegidas las zonas, se creó en el SIG un nuevo campo de tipo numérico denominado IDLorca, para identificar los edificios y facilitar la toma de datos en campo.

Salidas de campo

En total se llevaron a cabo dos salidas de campo, de tres días de duración cada una. La primera salida tuvo lugar los días 10, 11 y 12 de mayo de 2013 y se tomaron datos de la zona 1 (Barrio de San Diego) y zona 2 (Barrios Altos). En la segunda salida, que tuvo lugar los días 4, 5 y 6 de junio, se tomaron datos de la zona 2 (Barrio de Santiago) y zona 3 (Barrio de la Viña).

El trabajo llevado a cabo para cada una de las zonas de estudio fue el siguiente:

- Inspección visual previa de toda la zona de estudio.
- Cumplimentación de las fichas con los parámetros de cada edificio. Se usaron unos planos sobre los que se enumeraron las edificaciones para posteriormente hacer la toma de datos (Figura 6.3). En la primera visita los datos se tomaron en formato papel (Figura 6.2a) y en la segunda en formato digital (Figura 6.2b) En ambos casos se iban poniendo las codificaciones de los parámetros.
- Toma de fotografías de cada uno de los edificios, con el fin de solventar posibles dudas que pudieran surgir en gabinete y para poder completar las fichas finales de cada uno de los edificios en las que se incluiría, además de la fotografía, toda la información recopilada.
- Anotación de los posibles errores encontrados en la cartografía descargada de la web de la Dirección General del Catastro, para su posterior modificación (edificios que el Catastro tiene registrados como una unidad, pero que en realidad son dos unidades constructivas diferentes; edificaciones con uso distinto del residencial; diferencia de altura con el Catastro; etc.).

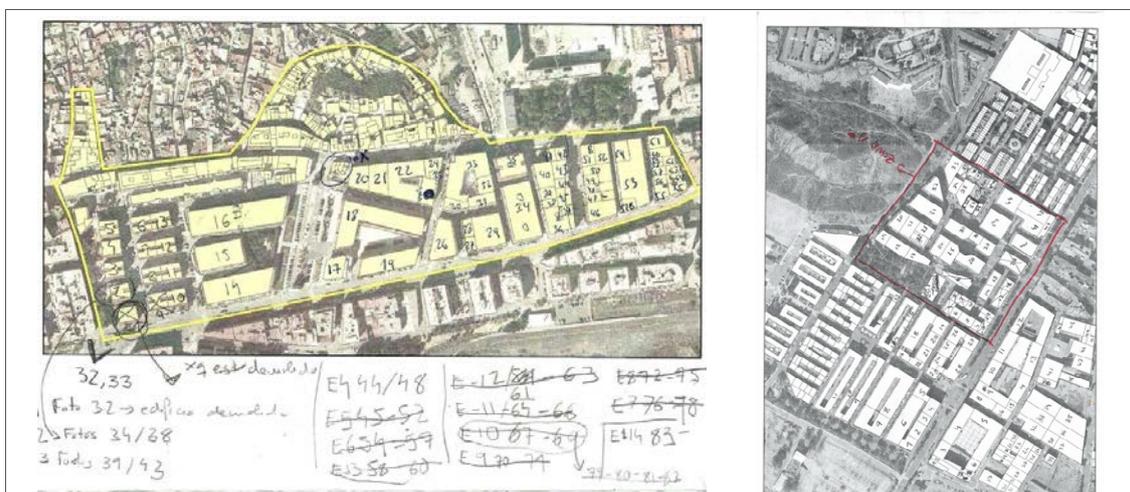


Figura 6.3 Cartografías usadas para la toma de datos en el trabajo de campo de la Zona (Barrio de San Diego) y la Zona 3 (Barrio de la Viña)

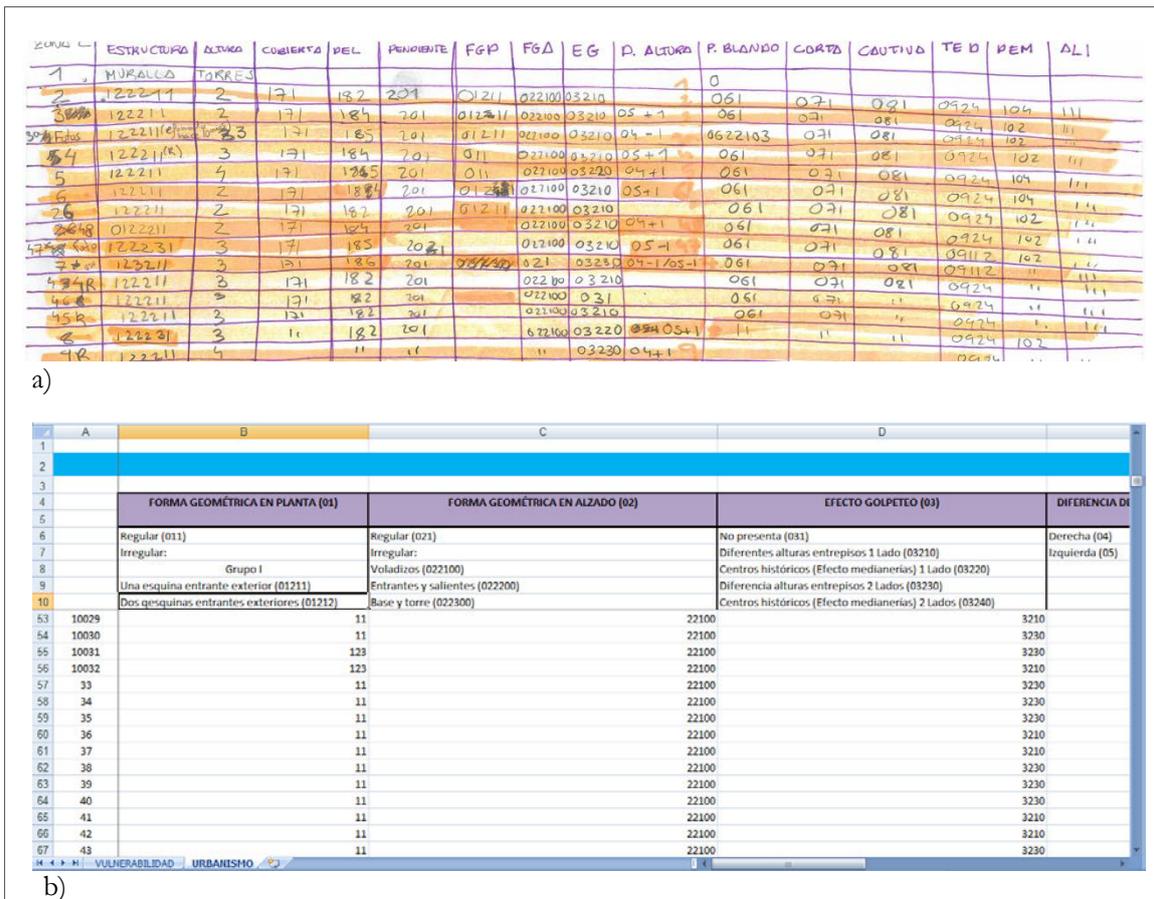


Figura 6.4 a) Aspecto de la ficha en formato papel y b) de la tabla diseñada en Excel para la toma de datos en las salidas de campo

6.3 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El proceso de tratamiento de la información jugó un papel muy importante en este proyecto. Se trata posiblemente de la parte más laboriosa, ya que de la calidad de los datos depende la calidad del resultado final, por lo que era imprescindible conseguir una base de datos lo más completa y fiable posible.

DEPURACIÓN DE LAS UNIDADES CONSTRUCTIVAS

a) Tratamiento de los polígonos

En los ficheros shapefile del Catastro una unidad constructiva está compuesta por varios polígonos, que representan las diferentes plantas del edificio, los patios de luces, las terrazas, los áticos, etc. Sin embargo, en este estudio nos interesaba tener un único polígono por unidad constructiva con la forma en planta del edificio; de esta forma, cada elemento de la tabla representa una unidad constructiva con la misma referencia catastral y todos los parámetros de un mismo edificio se agrupan en una única fila de la tabla.

Por tanto, en esta parte del proyecto se hizo un gran trabajo de tratamiento de datos, depurando todas las unidades constructivas. En algunos casos bastó con borrar algunos de los polígonos, pero

en la mayoría fue necesario editar y/o crear polígonos nuevos con la forma en planta que les correspondía. También se eliminaron algunas unidades constructivas por razones diversas, como por ejemplo tener un uso diferente al residencial, ya que para el desarrollo del proyecto sólo se analizan unidades constructivas de uso residencial.

Como resultado se consiguió una reducción notable en el número de datos de cada una de las tablas de las dos zonas de estudio, pasando la zona 1 de tener 375 polígonos a 91, en la zona 2 de un total de 1605 polígonos a 375 y en la zonas 3 de 1443 polígonos a 350.

En la siguiente Figura 6.5 se muestra un ejemplo de una manzana de edificios de la zona 1 antes y después de ser tratada.



Figura 6.5 Manzanera de un edificio de la Zona 1 (Barrio de San Diego) antes y después del tratamiento de depuración de las Unidades Constructivas

b) Tratamiento de los atributos

Como se detalla en los primeros apartados de este capítulo, los datos de catastro contienen una gran cantidad de columnas con atributos, y la capa resultante de la unión del shapefile y el archivo .CAT tendrá la suma de las columnas de ambas capas.

Tras analizar uno a uno todos los atributos de la tabla, finalmente se descartaron todos menos siete: el campo "*shape*", que contiene la información sobre la geometría de cada elemento; la referencia catastral, "*refcat*", única para cada unidad constructiva; los campos "*TipoVia*", "*NomVia*" y "*Policia*", que indican el tipo y nombre de calle y número del edificio respectivamente; el campo "*constru*", que aporta el número de plantas de cada unidad constructiva; y, por último, el campo "*AñoCons*", que representa el año de construcción de cada edificación.

Puesto que el campo "*constru*", que contiene el número de plantas de los edificios, es de tipo texto, se creó un nuevo campo "*Altura*", de tipo numérico, resultado de comparar (y modificar, en caso necesario) el campo "*constru*" y los datos de alturas de edificios anotados en campo. Al ser el campo de tipo numérico, facilita el manejo de herramientas de cálculo con ArGIS.

INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS

Para incluir los datos obtenidos en campo en la base de datos, se crearon catorce nuevas columnas, una por cada parámetro. Se trata de columnas de tipo numérico, en las que se insertaron los datos con sus códigos correspondientes.

Dentro de cada parámetro urbanístico encontramos una serie de niveles, con sus respectivos códigos de acuerdo al esquema codificado de los Parámetros Urbanísticos (Figura 6.1) y tipologías constructivas (Figura 5.11).

a) Comprobación de fiabilidad de los datos

Una vez se completó la base de datos, se pasaron una serie de filtros haciendo selecciones en ArcGIS para detectar posibles errores groseros en los datos.

Estos filtros están referidos a algunos de los parámetros y se basan en observaciones y normas que deben cumplir.

- *Posición en elevación con diferencia de altura ± 2*

Los edificios que tengan diferencia de altura con los colindantes, tanto por la derecha como por la izquierda, de ± 2 , tendrán en el campo "11PEL" un código entre el 113 y el 117; los que no tengan esa diferencia, tendrán el código 112; y los edificios aislados, el 111.

Para hacer esta comprobación se utilizaron dos columnas denominadas "04DAD" y "05DAI", que representan la diferencia de alturas por la derecha y por la izquierda, respectivamente, y que fueron rellenadas con datos tomados en campo. A su vez, estas columnas se comprobaron con el campo "ALTURA" creado anteriormente a partir del campo "CONSTRU" y de los datos observados en campo.

- *Efecto columna corta*

Para comprobar la existencia o no de columna corta, que en este estudio se considera únicamente en los edificios de hormigón armado, se hicieron dos filtros:

- o Comprobación de que, efectivamente, los edificios de mampostería no presentaban columna corta.
- o El campo "CONSTRU" del shapefile del Catastro, señala los edificios que disponen de semisótano con el código "SS". Con este código se ha comprobado que las edificaciones con columna corta tienen semisótano.

- *Efecto golpeteo*

Todos los edificios terminales (94) sólo pueden tener efecto golpeteo por un lado (3210) o no tener golpeteo (31)

- *Catastro*

- Reformas: se ha modificado el año de construcción de las viviendas que han sido reformadas integralmente de acuerdo a la base de catastro.
- Usos: todos los bloques de viviendas que tienen uso comercial en planta baja deben coincidir con el modificador Piso blando en su categoría uso de la planta baja diferente al principal.

- *Bloque abierto*

El bloque abierto apareció en el año 1950. Filtrar que ninguna tipología de bloque abierto sea inferior al año de construcción 1950

- *Tipología edificatoria*

- Se han filtrado todas las manzanas de acuerdo a las Ordenanzas del Plan General de Lorca.
- Se han filtrado las viviendas con 1-2 plantas para comprobar si corresponden o no a la tipología edificatoria de vivienda unifamiliar.

6.3.1 Análisis e interpretación de los datos: parámetros urbanísticos y tipologías constructivas

Para realizar un primer análisis e interpretación de los datos obtenidos en las campañas de campo se ha hecho un estudio exploratorio de los parámetros urbanísticos y de las tipologías constructivas en las zonas de estudio con el fin de familiarizarnos con los datos y que sirva como base para la posterior investigación descriptiva. Con este análisis crearemos un marco teórico y epistemológico lo suficientemente fuerte como para determinar qué factores (parámetros urbanísticos) son relevantes y deben ser investigados.

ESTUDIO EXPLORATORIO DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS

Para realizar el estudio exploratorio se utilizó el Software de IBM SPSS Statistics 19 para obtener la frecuencia con la que los parámetros urbanísticos aparecen representados en las zonas de estudio (ver Anexo II). Además se han realizado unas cartografías de cada uno de los parámetros en un Sistema de Información geográfica (ver Anexo III) para poder así identificar espacialmente las características urbanísticas predominantes en las zonas de estudio.

- **Forma Geométrica en Planta (FGP)**

(Anexo II.1 – Anexo III.Figura1)

Se aprecia que en el parque inmobiliario de Lorca predominan las edificaciones que no presentan irregularidad geométrica en planta con un 75,5%, código 11. La mayoría de estas edificaciones se distribuyen por los distintos barrios en las zonas de nueva construcción, la mayor cantidad se da en el Barrio de la Viña, que es el Barrio más moderno de los tres.

Dentro de las irregularidades geométricas, las que más predominan es dentro del grupo I, aquellos edificios con esquinas entrantes exteriores, la que tiene una esquina entrante exterior, código 1211, con un 13,1%. Suelen ser las edificaciones más antiguas con estructura de mampostería las que

presentan esta irregularidad. Esta irregularidad predomina en los Barrios Altos y la parte más antigua del Barrio de Santiago.

Del grupo II de irregularidades la más frecuente es la que tiene una esquina entrante interior con un 5,9%.

Las irregularidades menos representativas se dan en los edificios con tres esquinas entrantes, tanto para el grupo I como para el grupo II.

- **Forma Geométrica en Alzado (FGA)**

(Anexo II.2 – Anexo III.Figura2)

Con respecto a la irregularidad en alzado, los edificios que predominan en las zonas estudiadas son aquellos que son regulares con un 35.3% de la muestra analizada, código 21. Las construcciones de estructura de mampostería (construcciones antiguas), suelen presentar regularidad en alzado, son edificaciones unifamiliares que se localizan en los Barrios Altos de Lorca. Conexo a este último barrio se encuentra el Barrio de Santiago, históricamente es la continuación del desarrollo urbano de Lorca y predominan los voladizos abiertos, código 22200, que es la irregularidad más predominante en la zona de estudio con un 32,4%.

En las zonas más modernas (Barrio de San Diego y Barrio de La Viña) predomina la forma geométrica en alzado con entrantes y salientes, código 22300, un 20% de la muestra. Esto ocurre en los nuevos desarrollos urbanísticos de Lorca donde las ordenanzas municipales del Plan General de Ordenación Urbana permiten el voladizo de 1 metro y las terrazas cerradas por dos lados computan a la mitad.

- **Efecto golpeteo (EFG)**

(Anexo II.3. – Anexo III.Figura3)

Un 35,7% de la muestra no presenta efecto golpeteo, código 31, y espacialmente se distribuyen más por el barrio de San Diego, esto se debe a que son edificios tipo bloque exento, o que construcciones que se han construido en el mismo periodo y mantienen una misma tipología, por lo que los forjados están al mismo nivel.

La diferencia de altura de los edificios colindantes suele predominar en la zona dos del Barrio de Santiago y Barrios Altos, esto puede ser motivado por la fragmentación del muro urbano. Colindan edificios antiguos con nuevas construcciones y diferente tipología edificatoria, por lo que los forjados se ubican a distinto nivel con respecto al edificio adyacente. En el Barrio de la Viña, también presentan efecto golpeteo varias edificaciones, pero el motivo en este caso es principalmente por la pendiente sobre la que se asientan las edificaciones, que hace que la altura de los forjados no coincida y además en la mayoría de los casos la junta de separación es inferior a la fijada en normativa o ni existe

- **Diferencia de altura por la derecha (DAD)**

(Anexo II.4. – AnexoIII.Figura4)

Las mayores diferencias de altura por la derecha entre las edificaciones colindantes suelen ser edificios con uno o dos pisos menos, código 4.3, con un 81% de la muestra en este nivel o edificios con una o dos alturas más, código 4.4 con un 12%.

Estos códigos, como puede verse en el Anexo III. Figura 4 se representa mayoritariamente en las tres zonas de estudio, siendo las otras diferencias de alturas casi anecdóticas.

- **Diferencia de altura por la izquierda (DAI)**

(Anexo II.5. – AnexoIII.Figura5)

Ocurre lo mismo que en la diferencia de altura por la derecha, las mayores diferencias de altura entre las edificaciones colindantes suelen ser edificios con uno o dos pisos menos, código 5.3, con un 83% de la muestra en este nivel o edificios con una o dos alturas más, código 5.4 con un 10%. También las otras diferencias de alturas son casi anecdóticas.

- **Piso Blando-Flexible (PBF)**

(Anexo II.6 – Anexo III. Figura6)

Se observa que en la zona de los Barrios Altos y los edificios del casco antiguo del Barrio de Santiago no se presenta piso blando. Este parámetro es habitual encontrarlo en zonas de uso mixto, en la que las edificaciones comparten zonas de uso residencial con zonas de uso comercial en planta baja. Aproximadamente el 40 % de la muestra tiene presente este tipo de irregularidad.

- **Efecto Columna Corta (ECC)**

(Anexo II.7 – Anexo III. Figura7)

En la muestra estudiada el 97% de los edificios están contruidos sin efecto de columna corta, código 71. El efecto columna corta se presenta sólo en edificios con estructura de hormigón armado. De los 816 edificios estudiados, sólo 21 tienen efecto columna corta y se distribuyen por las tres zonas estudiadas.

- **Tipología Edificatoria (TED)**

(Anexo II.8 – Anexo III. Figura8)

De las edificaciones residenciales colectivas, la tipología más frecuente es la manzana tipo histórica, 22,8%, código 8112. Esta tipología predomina en la zona 2, en el Barrio de Santiago. En el Barrio de San Diego esta tipología se ubica en el extremo este de la zona. Ambas zonas se desarrollaron aproximadamente a la vez. Aproximadamente el 40% de las edificaciones de las zonas son de tipología residencial tipo manzana cerrada. La manzana tipo ensanche se desarrolló más en los barrios más antiguos como el Barrio de La Viña, un 12% aproximadamente. Por otro lado en el Barrio de San Diego encontramos bloques exentos. En los años 70 cuando urbanizó el lado más oriental del Barrio de San Diego predominó la edificación con bloques abiertos en todas las ciudades españolas debido a las nuevas Normas Higiénico-Sanitarias.

Las edificaciones de tipología unifamiliar, predominan en los Barrios Altos y en el Barrio de la Viña. En el primero predominan más las edificaciones unifamiliares agrupadas en hilera y en el Barrio de la Viña se encuentran localizadas las tipologías unifamiliares agrupadas en manzana cerrada.

- **Posición del Edificio en la Manzana (PEM)**

(Anexo II.9 – Anexo III Figura9)

Es normal que predominen los edificios intermedios, código 102, con un 55,5%, ya que muchos de los edificios se agrupan en manzana o en hilera. La posición del edificio en terminal, código 94, se da en los edificios agrupados en hilera común en el Barrio de La Viña. En este mismo Barrio también encontramos numerosos edificios en esquina, ya que predominan las edificaciones en manzana. Los edificios aislados son de menor porcentaje que los anteriores, la mayor parte de ellos se localizan en el Barrio de San Diego.

- **Alineaciones (ALI)**

(Anexo II.10 - Anexo III Figura10)

El 96,4% de los edificios de las zonas analizadas se encuentran alineados debido a las exigencias de las Ordenanzas del Plan General, muy pocos edificios se encuentran no alineados y estos suelen ser edificaciones antiguas remitidas a planeamientos anteriores al Plan General.

- **Posición en Elevación (PEL)**

(Anexo II.11 - Anexo III Figura11)

En las zonas analizadas predomina con un 85,7% los edificios adyacentes con misma altura, código 112. Los edificios adyacentes con colindantes más bajos, que según los estudios son más vulnerables, son los menos frecuentes. Esto se debe a que el Plan General de Lorca regula las alturas de las edificaciones y dentro de una misma manzana los edificios tienen que tener la misma altura.

ESTUDIO EXPLORATORIO DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS

Entre las tres zonas de estudio hay un total de 254 edificios de estructura de mampostería y 562 edificios de estructura de hormigón armado. Como puede verse en la Figura 6.6 casi todos los edificios de mampostería, excepto casos contados se encuentran en los Barrios Altos, cerca del Castillo de Lorca, la zona más antigua de la ciudad.



Figura 6.6 Ubicación de los edificios de mampostería y de hormigón armado en las zonas de estudio (Barrio de San Diego, Barrio de Santiago y Barrios altos y Barrio de la Viña)

CAPÍTULO 7

IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS URBANÍSTICOS CORRELACIONADOS CON EL DAÑO: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

7.1 INTRODUCCIÓN

El estudio estadístico busca la relación que tienen los diferentes niveles de los parámetros urbanísticos, obtenidos en el trabajo de campo en la ciudad de Lorca, con los daños ocurridos en el terremoto del 11 de Mayo de 2011. Como resultado se obtiene una ponderación que puede ayudar a construir ciudades sismorresistentes.

7.2 MUESTRA SELECCIONADA

Se han tomado 816 edificios ubicados en tres zonas diferentes de la ciudad de Lorca (ver Figura 6.2, página 137). La elección de las zonas de estudio se ha hecho de una forma aleatoria, teniendo en cuenta que el total de edificios ubicados en las tres zonas cumpla las siguientes características descritas en la línea metodológica, selección de la muestra.

- o Todo los parámetros urbanísticos objeto de esta tesis están representados en la muestra en una cantidad mínima necesaria para garantizar la validez del estudio estadístico.

- o La muestra tiene edificios con la clasificación completa del daño realizada en Lorca tras el terremoto en la evaluación rápida de daños (blanco, verde, amarillo, rojo y negro).
- o Las zonas seleccionadas abarcan distintos tipos de suelo según la clasificación del suelo de la ciudad de Lorca (M. Navarro et al. 2012) según la distribución de valores Vs30 que propone el Eurocódigo EC8 (1998).

Como se ha comentado en el Capítulo 7 dos zonas se encuentran al Norte de la ciudad de Lorca. La zona 1, al Norte del río Guadalentín, que abarca el barrio de San Diego y consta de 91 edificaciones y la zona 2, al Sur del río Guadalentín, que abarca parte del barrio de Santiago (mitad noreste) y parte de los barrios Altos (mitad noroeste), y está compuesta por un total de 375 edificaciones. La zona 3, situada en el sur de la ciudad de Lorca, abarca el barrio de La Viña y el barrio de Alfonso X, y consta de un total de 350 edificios.

7.3 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS PARÁMETROS URBANÍSTICOS

Para realizar el análisis descriptivo de los parámetros urbanísticos de los 816 edificios de la muestra objeto del estudio estadístico, se utilizó el Software de IBM SPSS Statistics 20. Se ha obtenido la frecuencia con la que los parámetros urbanísticos aparecen representados en las zonas de estudio. En este proceso, aquellos niveles que tengan una frecuencia inferior al 5% se unen, siempre que sea posible, con otros niveles o son eliminados al tener un valor no significativo dentro de la muestra. A continuación se describen los parámetros urbanísticos y las agrupaciones realizadas.

7.3.1 Forma geométrica en planta

En el análisis descriptivo de las frecuencias de los niveles del parámetro urbanístico forma geométrica en planta (AnexoII.1), nos encontramos los siguientes resultados:

- o Los niveles 123, 1212, 1213, 1222,1223 tienen un porcentaje inferior al 5% del total.
- o Los niveles que mayor porcentaje tienen son el 11, 1211 y el 1221 que representan a los grupos de regularidad en planta, irregularidad con una esquina entrante exterior e irregularidad con una esquina entrante interior.

Evaluando los resultados obtenidos en el parámetro forma geométrica en planta, se unen los niveles con porcentaje inferior al 5%. Este parámetro quedaría con los siguientes niveles:

- o 11 Regular
- o 121 Irregular entrantes exteriores
- o 122 Irregular entrantes interiores

Respecto al nivel 123, edificios no rectangulares, de los 9 edificios, 3 se han podido introducir dentro de los tres niveles definitivos. El parámetro forma geométrica en planta quedaría definido con los siguientes niveles, frecuencias y porcentajes.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
11. REGULAR	618	75,7
121. IRREGULAR. Entrantes exteriores.	128	15,7
122. IRREGULAR. Entrantes interiores.	64	7,8
TOTAL	810	99,3

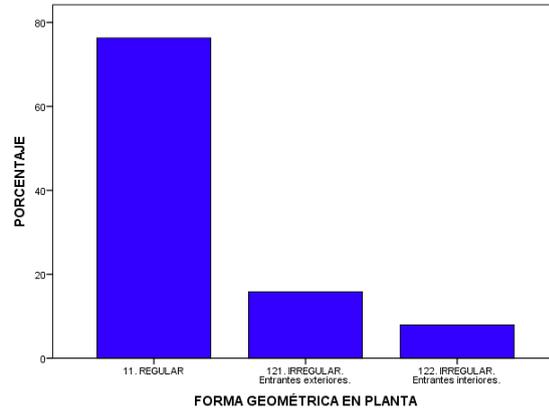


Tabla 7.1 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma geométrica en planta

Figura 7.1 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma geométrica en planta

7.3.2 Forma geométrica en alzado

En el análisis descriptivo de los niveles del parámetro urbanístico forma geométrica en alzado (Anexo II.2) nos encontramos los siguientes resultados:

- Los niveles 22120, 22230, 22240, 22340, 22400, 22500, 22600 tienen un porcentaje inferior al 5% del total.
- Los niveles que mayor porcentaje tienen son el 21, 22100, 22200 y 22300 que representa a los grupos de regularidad en alzado, irregularidad voladizos cerrados, irregularidad con voladizos abiertos e irregularidad con entrantes y salientes.

Evaluando los resultados obtenidos se pueden unir algunos niveles con porcentaje inferior al 5% dentro de las cuatro categorías con mayor frecuencia. Esta unión se hace individualmente para cada edificio, por ejemplo, los edificios que tienen tanto voladizo cerrado como voladizo abierto dentro del edificio se estudia el porcentaje que tiene de cada uno de ellos y se une al nivel de mayor porcentaje. De esta manera el parámetro de forma geométrica en planta quedaría con cuatro niveles, 21 Regular, 22100 irregularidad voladizos cerrados, 22200 irregularidad con voladizos abiertos y 22300 irregularidad con entrantes y salientes.

Los niveles 22400 base y torre, 22500 escalonamiento y 22600 invertido no se usan para el análisis estadístico al no ser representativos en la muestra. El parámetro forma geométrica en alzado quedaría definido con los siguientes niveles:

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
21. REGULAR.	288	35,3
221. IRREGULAR. Voladizos cerrados.	86	10,5
222. IRREGULAR. Voladizos abiertos.	265	32,5
223. IRREGULAR. Entrantes y salientes	166	20,3
TOTAL	805	98,7

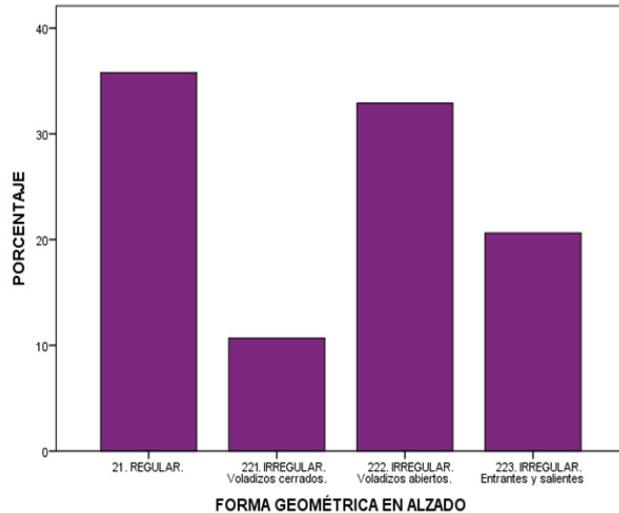


Tabla 7.2 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma geométrica en alzado

Figura 7.2 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico forma geométrica en alzado

7.3.3 Efecto Golpeteo

Como se puede apreciar en la tabla de frecuencias (ver Anexo II.3), un 35,7% de la muestra no presenta efecto golpeteo, un 30,3% presenta golpeteo por un lado y un 33% presenta golpeteo por dos lados. Los niveles de efecto golpeteo en centros históricos, debido a nuevas construcciones junto a edificaciones antiguas tienen un valor insignificativo dentro de la muestra al tener un porcentaje inferior al 5%. Los edificios con nivel 3220. Presenta. Centros históricos golpeteo por un lado se unen al nivel 3210. Presenta. Diferencia altura entrepisos un lado y los edificios con nivel 3240. Presenta. Centros históricos golpeteo por dos lados se unen al nivel 3230. Presenta. Diferencia altura entrepisos dos lados. El parámetro efecto golpeteo quedaría definido con los siguientes niveles:

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
31. NO PRESENTA	291	35,7
321. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos un lado	255	31,3
322. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos dos lados	270	33,1
TOTAL	816	100,0

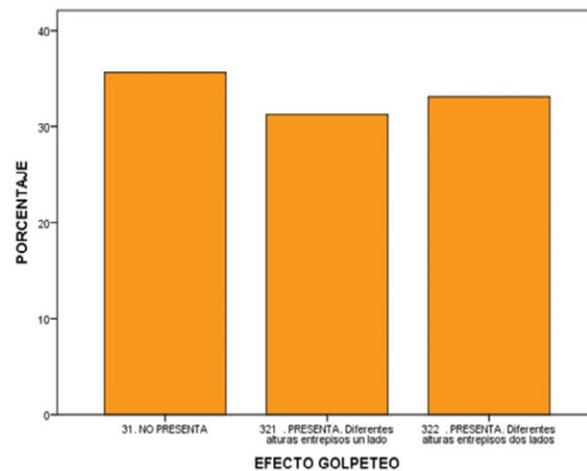


Tabla 7.3 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto golpeteo

Figura 7.3 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto golpeteo

7.3.4 Diferencia de altura por la derecha

Al estudiar los datos del análisis descriptivo del parámetro diferencia en altura por la derecha podemos observar que la mayoría de los edificios de la muestra seleccionada tienen una diferencia de altura igual a cero, en el nivel 4.3 diferencia de altura $-2 < x \leq -0$ se encuentran la mayor cantidad de edificios 666, con un porcentaje de 81,6% del total (Anexo II.4). Existen cuatro niveles, 4.1, 4.2, 4.5 y 4.6 con un porcentaje inferior al 5% y que corresponden a diferencias de alturas superiores o inferiores a dos.

Este parámetro se vuelve a codificar agrupando los niveles en diferencias de alturas iguales a 0 y superiores o inferiores a una altura, pues tras los datos del análisis anterior podemos ver que es donde mayor cantidad de edificios o porcentaje podemos encontrar dentro de la muestra.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
41. Diferencia de altura $x \leq -1$	89	10,9
42. Misma altura por la derecha	615	75,4
43. Diferencia de altura $X \geq +1$	112	13,7
TOTAL	816	100,0

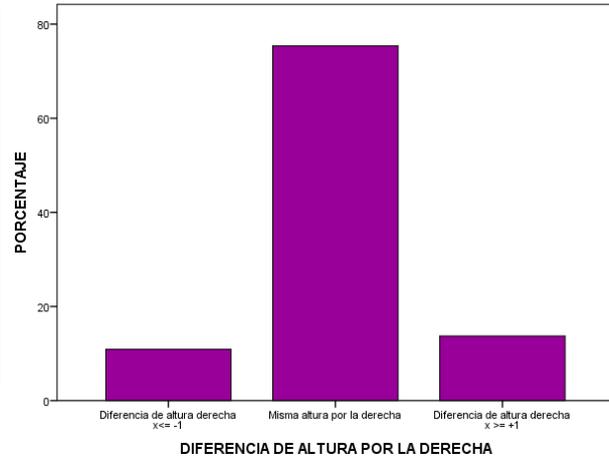


Tabla 7.4 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la derecha

Figura 7.4 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la derecha

7.3.5 Diferencia de altura por la izquierda

Al analizar este parámetro se encuentran los mismos resultados que en el parámetro de diferencia de altura por la derecha, se agrupan los niveles de la misma forma, en diferencias de alturas iguales a 0 y superiores o inferiores a una altura como se muestra en la Tabla 7.5 y la Figura 7.5

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
51. Diferencia de altura $x \leq -1$	91	11,2
52. Misma altura por la izquierda	621	76,1
53. Diferencia de altura $X \geq +1$	104	12,7
TOTAL	816	100,0

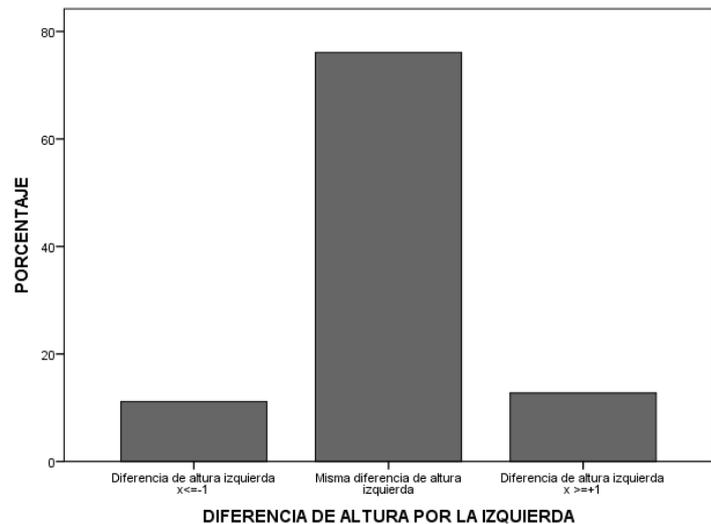


Tabla 7.5 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la izquierda

Figura 7.5 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico diferencia de altura por la izquierda

7.3.6 Piso blando/flexible

Realizando un análisis descriptivo de frecuencias de los datos (AnexoII.6) .nos encontramos que la división en niveles que hicimos en el piso blando de las edificaciones teniendo en cuenta sus características (uso diferente, altura diferente y distribución diferentes) no es representativa en la muestra. La mayoría de las edificaciones presentan las tres características a la vez o ninguna, y la que más predomina es la de uso diferente al resto de pisos. Siguiendo estos datos, se ha realizado la agrupación de estas características en los niveles 61. No presenta piso blando, 621. Presenta sin cerramientos y 622. Presenta parcialmente cerrado. A continuación se muestra la Tabla 7.6 y la Figura 7.6 con sus porcentajes y frecuencias.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
61. NO PRESENTA	555	68,0
621. PRESENTA. Sin cerramientos	45	5,5
622. PRESENTA. Parcialmente cerrado	216	26,5
Total	816	100,0

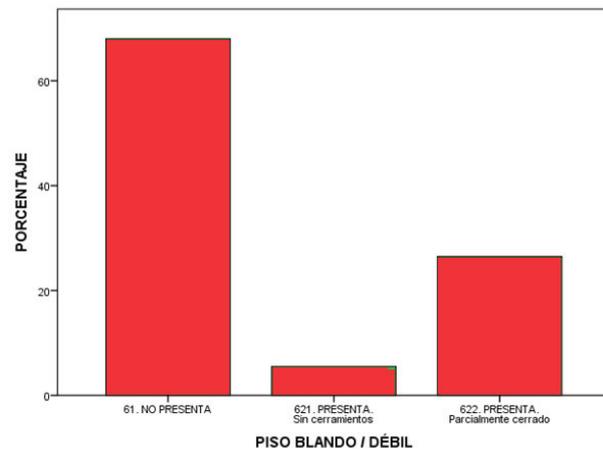


Tabla 7.6 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico piso blando / flexible.

Figura 7.6 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico piso blando / flexible.

7.3.7 Efecto columna corta

El porcentaje de edificios con efecto de columna corta es inferior al 5% mínimo que estamos considerando en el resto de parámetros, incluso uniendo los niveles 72 y 721. Este parámetro se ha tenido en cuenta, porque entre los edificios más dañados del terremoto de Lorca, se pueden observar numerosos casos del efecto del pilar corto (Carreño Tibaduiza et al. Física de la tierra Vol.24 (2012) 285-314). El único edificio que colapsó durante el terremoto, el cual correspondía a una estructura reciente de hormigón armado, localizado en el barrio de La Viña, apoyaba en uno de sus lados sobre pilares cortos. Análisis preliminares (Murphy, 2011) indican que este edificio colapsó debido al fallo de los pilares cortos.

A continuación se muestra la Tabla 7.7 y la Figura 7.7 con sus porcentajes y frecuencias después de la agrupación en los niveles 71 No presenta efecto de columna corta y 72 Presenta efecto de columna corta.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
71. NO PRESENTA	795	97,4
72. PRESENTA	21	2,6
TOTAL	816	100,0

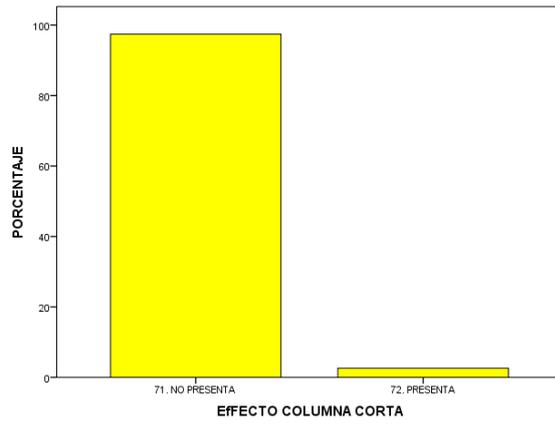


Tabla 7.7 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto columna corta.

Figura 7.7 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico efecto columna corta.

7.3.8 Tipología edificatoria

Como se puede observar en el AnexoII.8 los niveles 9121 residencial colectiva bloque exento, 9122 residencial colectiva bloque exento con patio, 9123 residencial colectiva bloque agrupado, 9124 residencial colectiva bloque agrupado con patio y 922 residencial unifamiliar pareada no llegan al porcentaje del 5%. La agrupación de estos niveles se ha hecho siguiendo la tipología edificatoria a la que pertenecen.

El bloque abierto exento tiene un porcentaje inferior al 5%, 3,2%, con 26 edificios. No se ha podido agrupar al bloque abierto agrupado al considerarse que existen otros parámetros que pueden producir daño en las edificaciones agrupadas frente a las edificaciones exentas. A continuación se muestra la Tabla 7.8 y la Figura 7.8 con sus porcentajes y frecuencias.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
8111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central	97	11,9
8112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	186	22,8
8121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto exento	26	3,2
8122. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto agrupado	63	7,7
821. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hilera	257	31,5
822. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	186	22,8
TOTAL	815	99,9

Tabla 7.8 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico tipología edificatoria

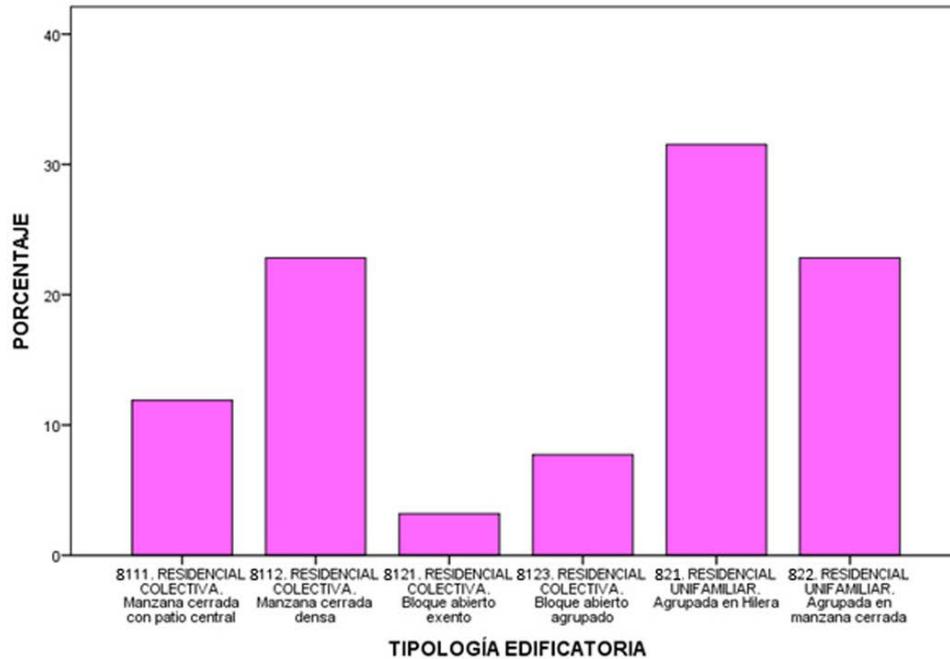


Figura 7.8 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico tipología edificatoria

7.3.9 Posición del edificio en la manzana

En la Figura 7.9 y Tabla 7.9 están la frecuencia y el porcentaje de los niveles del parámetro de posición del edificio en la manzana. Este parámetro no ha necesitado agruparse debido a tener una muestra significativa de cada nivel.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
91. AISLADO	33	4,0
92. INTERMEDIO	453	55,5
93. ESQUINA	162	19,9
94. TERMINAL	166	20,3
TOTAL	814	99,8

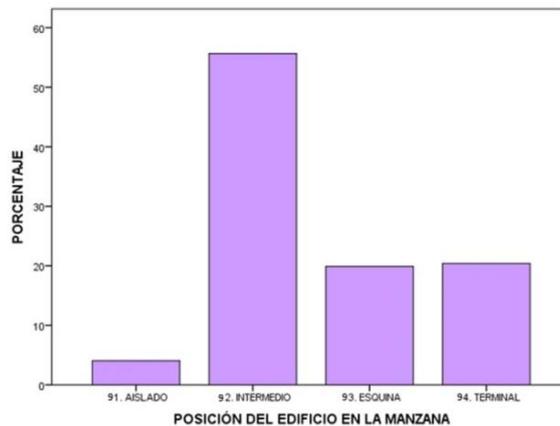


Tabla 7.9 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición del edificio en la manzana.

Figura 7.9 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición del edificio en la manzana

7.3.10 Alineación

En el parámetro alineación se distinguen los niveles fuera de línea y retranqueada. Como se puede ver en el Anexo II.10, al sólo existir 2 edificios retranqueados respecto de la alineación oficial, los niveles 11.2 y 11.3 se han unido en un único nivel donde se encuentran todos los edificios no alineados a la alineación oficial. Esta agrupación se puede ver en las tablas y figuras siguientes:

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
101. ALINEADA	787	96,4
102. NO ALINEADA	29	3,6
Total	816	100,0

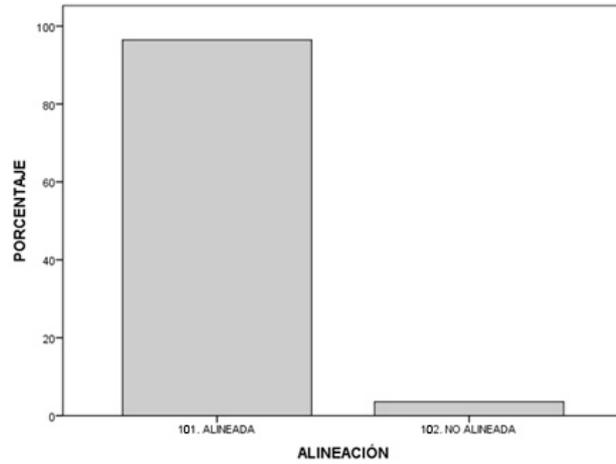


Tabla 7.10 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico alineación

Figura 7.10 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico alineación

7.3.11 Posición en elevación.

Este parámetro urbanístico tiene cinco niveles según la posición del edificio con sus edificios adyacentes. Como se puede ver en el Anexo II.11, analizando las frecuencias de los datos los niveles 183 edificios adyacente más altos y el nivel 186 edificios adyacentes más bajos no tienen un porcentaje adecuado para introducirlos en el estudio. Estos niveles se han agrupado a los niveles 184 y 185, de tal manera que en el parámetro posición en elevación quedaría un nivel con los edificios adyacentes a la misma altura, otro en el que uno de los edificios adyacentes sería más bajo, pudiendo también ser los dos y otro en el que uno de los edificios adyacentes es más alto, pudiendo ser también los dos edificios más altos (ver Tabla 7.11 y Figura 7.11).

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
111. Edificios adyacentes misma altura	699	85,7
112. Algún edificio adyacente más alto	55	6,7
113. Algún edificio adyacente más bajo	62	7,6
TOTAL	816	100,0

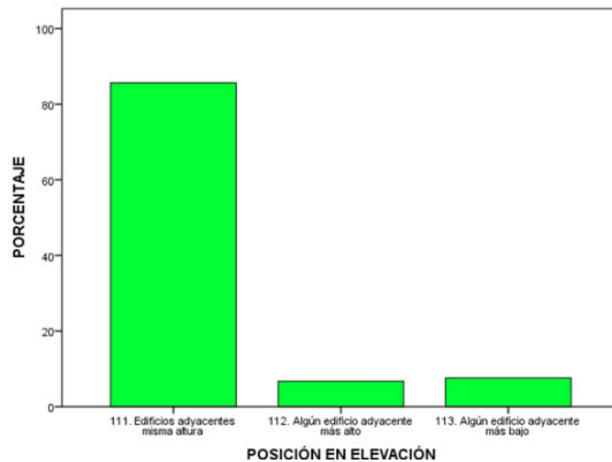


Tabla 7.11 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición en elevación

Figura 7.11 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico posición en elevación

7.3.12 Morfología del Terreno

Respecto a la morfología del terreno, la frecuencia de edificios sobre pendientes menores del 10% y sobre pendientes mayores es casi la misma, 431 frente a 385 respectivamente. La Tabla 7.12 y Figura 7.12 muestran la frecuencia y porcentaje de cada uno de los niveles.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
121. PENDIENTE <10%	431	52,8
122. PENDIENTE >10%	385	47,2
TOTAL	816	100,0

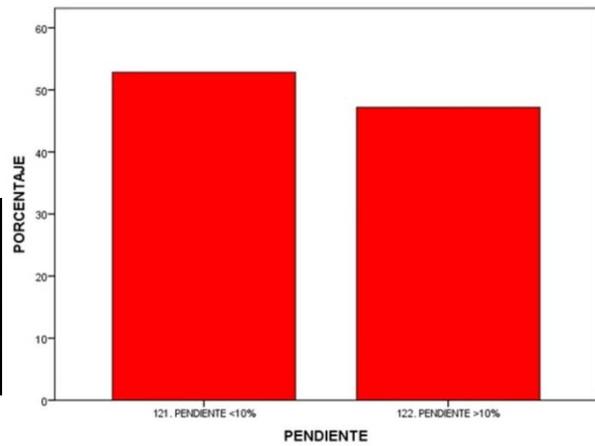


Tabla 7.12 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico morfología del terreno

Figura 7.12 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico morfología del terreno

7.3.13 Altura de los edificios

Respecto a la altura de los edificios, en este parámetro urbanístico, todos los niveles tienen un porcentaje superior al 5% por lo que no ha sido necesario realizar ninguna agrupación. La Tabla 7.13 y Figura 7.13 muestran la frecuencia y porcentaje de cada uno de los niveles.

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
131. Altura menor o igual a dos plantas $x \leq -2$	414	50,7
132. Altura mayor a dos plantas y menor o igual a cuatro plantas $2 < x \leq 4$	254	31,1
133. Altura mayor a cuatro plantas $X > +4$	148	18,1
Total	816	100,0

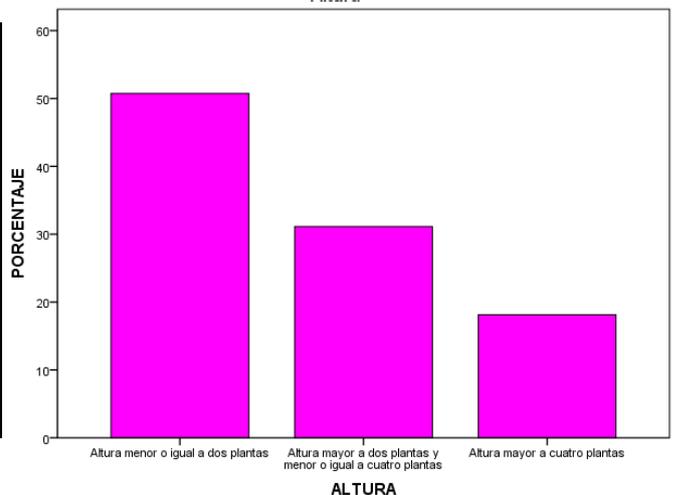


Tabla 7.13 Frecuencias y porcentajes de los niveles agrupados del parámetro urbanístico altura de los edificios

Figura 7.13 Diagrama de barras de los niveles agrupados del parámetro urbanístico altura de los edificios

En el Anexo IV pueden verse las nuevas cartografías de las zonas de estudio con los niveles de los parámetros urbanísticos de los que se va a realizar posteriormente el estudio estadístico.

7.4 DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.

Tras realizar el análisis descriptivo de los parámetros urbanísticos se hizo una tabla con la descripción de las variables y la categorización de los niveles finales. Con esta tabla podemos ver la operacionalización de las variables, dependientes e independientes, y el tipo de variable (Ordinal politémica – Nominal). La variable dependiente es el daño y las variables independientes son los

parámetros urbanísticos, la tipología estructural y el tipo de suelo. A continuación se muestra la Tabla 7.14 con estos datos.

Tabla 7.14 Definición y operacionalidad de variables dependientes e independientes

DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES			
VARIABLE DEPENDIENTE	DESCRIPCIÓN	CATEGORÍAS	TIPO DE VARIABLE
Daño	Caracterización del daño producido en las edificación después un sismo.	1. Blanco: Sin daño 2. Verde: No hay daños estructural o daños estructurales nulos o irrelevantes 3. Amarillo: Daños estructurales moderados 4. Rojo: Daños estructurales graves 5. Negro: Colapso	Ordinal Politómica
VARIABLES INDEPENDIENTE PARÁMETROS URBANÍSTICOS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA	DESCRIPCIÓN	CATEGORÍAS	TIPO DE VARIABLE
Forma geométrica en planta	Dimensiones y proporciones irregulares en planta de las edificaciones que afectan a la vulnerabilidad sísmica	1. -11. REGULAR. 2. -121. IRREGULAR entrantes exteriores. 3. 122. IRREGULAR entrantes interiores.	Nominal
Forma geométrica en alzado	Retranqueos en las fachadas de los edificios que afectan a la vulnerabilidad sísmica	1.-21. REGULAR 2. -221. IRREGULAR voladizos cerrados 3.-222. IRREGULAR voladizos abiertos 4. 223. IRREGULAR entrantes y salientes	Nominal
Efecto golpeteo	Efecto de golpeteo que se produce entre los entresijos de las edificaciones colindantes	1.-31.NO PRESENTA 2. -321. PRESENTA diferentes alturas entresijos un lado 3. -322 PRESENTA diferentes alturas entresijos dos lados	Nominal
Diferencia de altura por la derecha	Diferencia de pisos por la derecha	1. -41. Diferencia de altura $x \leq -1$ 2. -42. Misma altura por la derecha 3. -43. Diferencia de altura $x \geq +1$	Nominal
Diferencia de altura por la izquierda	Diferencia de pisos por la izquierda	1. -51 Diferencia de altura $x \leq -1$ 2. -52 Misma altura por la izquierda 5. -53 Diferencia de altura $x \geq +1$	Nominal
Piso Blando	Existencia de un nivel o piso de edificio que presenta una rigidez significativa menor que el resto de los pisos de la edificación. Normalmente esto se produce por un uso diferente de la planta, una altura diferente o una distribución diferente.	1. -61. NO PRESENTA 2. -621. PRESENTA sin cerramientos 3. -622. PRESENTA parcialmente cerrado	Nominal
Efecto columna corta	El efecto de columna corta se produce debido a una modificación accidental en la configuración estructural original de las columnas de un pórtico. Las columnas cortas propiamente dichas tienen una altura significativamente menor que la mayoría de las columnas del mismo piso de los pisos siguientes.	1. -71. NO PRESENTA 2. -72. PRESENTA	Nominal

Tipología Edificatoria	Tipología urbana edificatoria de los edificios residenciales multifamiliares y unifamiliares	1. -811. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central 2. -812 RESIDENCIAL COLECTIVA Manzana cerrada densa 3. -8121 RESIDENCIAL COLECTIVA Bloque abierto exento 4. -8122. RESIDENCIAL COLECTIVA .Bloque abierto agrupado 5. -821. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR agrupada en hilera 6. -822. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR agrupada en manzana cerrada	Nominal
Posición del edificio en la manzana	Posición del edificio dentro de la manzana urbana	1. -91. Aislado 2. -92. Intermedio 3. -93. Esquina 4. -94. Terminal	Nominal
Alineaciones	Situación del edificio respecto a su alineación oficial	1. -101. Alineado 2. -102. No Alineada	Nominal
Posición en elevación	Altura del edificio respecto a sus edificios colindantes	1. -111. Edificios adyacentes misma altura 2. -112. Algún edificio adyacente más alto 3. -113. Algún edificio adyacente más bajo	Nominal
Morfología del terreno	Pendiente del terreno sobre el que se única el edificio	1. -121. Pendiente (<10%) 2. -122. Pendiente (>10%)	Ordinal
Altura	Número de pisos que tienen los edificios	1. -131. Altura ≤ 2 pisos 2. -132. Altura > 2 pisos y ≤ 4 pisos 3. -133. Altura >4 pisos	Nominal
VARIABLES INDEPENDIENTES TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL	DESCRIPCIÓN	NIVELES O CATEGORÍAS	TIPO DE VARIABLE
Tipo de estructura	Tipología estructural de la edificación	01. Hormigón armado 02. Mampostería	Nominal
VARIABLES INDEPENDIENTES TIPO DE SUELO	DESCRIPCIÓN	NIVELES O CATEGORÍAS	TIPO DE VARIABLE
Tipo de suelo	Estructura geológica superficial del terreno para evaluar las características de respuesta sísmica para cada tipo de suelo y su capacidad de amplificación. Tipos según el EC8.	1. Tipo B: Roca muy fracturada 2. Tipo C: Suelo granular de compacidad media 3. Tipo D: Suelo granular suelto o suelto cohesivo blando	Nominal

La variable dependiente es el daño que caracteriza a las edificaciones después del terremoto. En la Tabla 7.15 se puede ver cómo un 64% de los edificios no tuvieron ningún tipo de daño, frente al 46% que si lo tuvieron. Además, un 7,6% tuvieron daño estructural severo.

Tabla 7.15 Frecuencias y porcentajes del grado de daño de los edificios tras el terremoto del 11 de mayo de 2011 en Lorca

	Frecuencia	Porcentaje
1. Blanco: Sin daño	526	64,5
2. Verde: Sin daño estructural o daños estructurales nulos o irrelevantes	106	13,0
3. Amarillo: daños estructurales moderados	121	14,8
4. Rojo: daños estructurales graves	62	7,6
5. Colapso	1	,1
Total	816	100,0

La variable independiente distinta a los parámetros urbanísticos y que también se tiene en cuenta en el estudio estadístico es el tipo de suelo sobre el que se encuentran los edificios. Hay tres tipos de clase de suelo según EC8 (M. Navarro et al. 2012) en la zona de estudio: tipo B: Roca muy fracturada, tipo C: Suelo granular de compacidad media y Tipo D: Suelo granular suelto o suelto cohesivo blando suelos tipo B, tipo C y tipo D. (ver Tabla 7.16)

Tabla 7.16 Frecuencias y porcentajes del tipo de suelo según el Eurocódigo8 sobre el que se asientan la muestra de edificios objeto de estudio en Lorca

	Frecuencia	Porcentaje
1. Tipo B: Roca muy fracturada	541	66,3
2. Tipo C: Suelo granular de compacidad media	239	29,3
3. Tipo D: Suelo granular suelto o suelto cohesivo blando	36	4,4
Total	816	100,0

Para poder comparar los daños es condición necesaria que se encuentre en la misma clase de suelo ya que según sea la clase de suelo la intensidad del terremoto puede verse disminuido o aumentado.

En la clase de suelo B, hay en total 541 edificios, 420 están clasificados en “sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)” y 121 edificios en el resto de niveles.

En la clase de suelo C, hay en total 240 edificios. En la categoría “sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)” hay 185 edificios y en la categoría amarillo, rojo y negro están 54 edificios.

En la clase de suelo D, sólo tenemos en la muestra 36 edificios, inferior a un 5% del total de edificios. Este suelo no se considera en el análisis estadístico.

A continuación se muestra la Tabla 7.17 con estos datos.

Tabla 7.17 Tabla de contingencia con las frecuencias y porcentajes de la relación del tipo de suelo según el Eurocódigo8 sobre el que se asientan la muestra de edificios objeto de estudio en Lorca y su daño en el terremoto de 2011.

		TRIAJE					Total
		BLANCO	VERDE	AMARILLO	ROJO	NEGRO	
Tipo B	Recuento	382	38	83	37	1	541
	% dentro de TRIAJE	72,6%	35,8%	68,6%	59,7%	100,0%	66,3%
Tipo C	Recuento	128	58	36	18	0	240
	% dentro de TRIAJE	24,1%	54,7%	29,8%	29,0%	,0%	29,3%
Tipo D	Recuento	16	10	2	7	0	35
	% dentro de TRIAJE	3,2%	9,4%	1,7%	11,3%	,0%	4,4%
Total	Recuento	526	106	121	62	1	816
	% dentro de TRIAJE	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

La otra variable independiente sería la tipología estructural. El estudio estadístico se realiza separando los edificios de hormigón armado y mampostería.

En total hay 562 edificios de hormigón armado, 353 se encuentran en el tipo de suelo B y 209 en el tipo de suelo C. En suelo de tipo B el 50% aproximado están clasificados “sin daño (blanco) y daño

no estructural (verde)” frente al 70% en el suelo de tipo C clasificados “sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)” (ver Tabla 7.18 y Tabla 7.19).

De mampostería hay un total de 219 edificios, 188 se encuentran en el tipo de suelo B y 31 en el tipo de suelo C. En suelo de tipo B el 35% aproximado están clasificados “sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)” frente al 6% en el suelo de tipo C clasificados “sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)” (ver Tabla 7.18 y Tabla 7.19).

Tabla 7.18 Tabla de contingencia en el Tipo de suelo B con las frecuencias y porcentajes que relacionan la tipología constructiva de los edificios objeto de estudio y su daño en el terremoto de 2011

TIPO DE SUELO B		TRIAJE					Total
		BLANCO	VERDE	AMARILLO	ROJO	NEGRO	
Hormigón	Recuento	237	34	61	20	1	353
	% dentro de TRIAJE	44,0%	6,1%	11,1%	3,7%	,2%	65,1%
Mampostería	Recuento	143	5	23	17	0	188
	% dentro de TRIAJE	26,5%	,9%	4,3%	3,2%	,0%	34,9%
Total	Recuento	1	38	83	37	1	541
	% dentro de TRIAJE	,2%	7,1%	15,4%	6,9%	,2%	100,0%

Tabla 7.19 Tabla de contingencia en el Tipo de suelo C con las frecuencias y porcentajes que relacionan la tipología constructiva de los edificios objeto de estudio y su daño en el terremoto de 2011

TIPO DE SUELO C		TRIAJE				Total
		BLANCO	VERDE	AMARILLO	ROJO	
Hormigón	Recuento	115	57	30	11	209
	% dentro de TRIAJE	47,9%	23,8%	12,5%	4,6%	88,8%
Mampostería	Recuento	13	5	6	7	31
	% dentro de TRIAJE	5,4%	,4%	2,5%	2,9%	11,3%
Total	Recuento	128	58	36	18	240
	% dentro de TRIAJE	53,3%	24,2%	15,0%	7,5%	100,0%

7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En primer lugar se realizó un estudio con los diferentes tipos de daño, concluyéndose que no había una discriminación entre los daños: Amarillo, Rojo y Negro ni en suelo tipo B ni en el suelo tipo C (ver tabla Anexo V Tipo suelo B). Así pues, en el estudio que se presenta, se ha realizado la discriminación de este factor daño de acuerdo a la clasificación de la habitabilidad descrita en el Capítulo 5, apartado 5.6.3 Evaluación de daños, está el factor "daño", teniendo dos categorías: 0. "No hay daño estructural/ Edificios Habitables" “sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)” y 1. "Con daño estructural/Edificios No Habitables" (Amarillo, Rojo y Negro).

Los parámetros urbanísticos con más de dos categorías se dicotomizaron, es decir se crean variables dicotómicas (1. categoría a estudiar, 2. resto de las categorías), con la finalidad de calcular la probabilidad de daño dada cada una de las variables creadas. En resumen, todos los parámetros urbanísticos se convirtieron en variables dicotómicas (ver Anexo VI).

Se ha hecho el estudio estadístico diferenciando dos casos:

- a) sólo con las edificaciones de hormigón armado
- b) y sólo con las edificaciones de mampostería

Además, como se ha dicho anteriormente, para realizar el estudio estadístico se han estratificado los datos según el tipo de suelo B o C.

7.5.1 Análisis de los parámetros urbanísticos y el daño

A continuación se presenta un primer análisis exploratorio de la relación de los parámetros urbanísticos con el daño observado (Figura 7.14, Figura 7.15, Figura 7.16 y Figura 7.17) en cada tipo de suelo y para las tipologías constructiva de mampostería y hormigón armado.

Con este tipo de estudios pretendemos tener un primer marco de referencia teórico sobre la relación del daño con los parámetros urbanísticos, e identificar en qué tipo de suelo y para que tipología constructiva la cantidad de edificios, con un determinado parámetro urbanístico, con daño estructural es mayor que cuando no tiene daño estructural.

Se puede ver que en el tipo de suelo B, en los edificios de hormigón armado (Figura 7.14) , en los parámetros FGA_4 (forma geométrica irregular, entrante y saliente), PBD_3 (piso blando parcialmente cerrado), TED_1 (tipología edificatoria residencial colectiva, manzana cerrada con patio central) y ALT_2 (altura entre 2 y cuatro plantas) el número de edificios con daño estructural es superior a los edificios con daño no estructural, esto no ocurre en ningún parámetro urbanístico en los edificios de mampostería para este tipo de suelo (Figura 7.15).

En cambio, en el suelo de tipo C, es en los edificios de mampostería (Figura 7.17), en los parámetros urbanísticos FGA_3 (forma geométrica en alzado irregular voladizos abiertos), DAD_2 (misma altura por la derecha), PB_1 (sin piso blando), PEL_1 (posición en elevación, edificios adyacentes misma altura) y ALT_1 (altura menor o igual a dos pisos) el número de edificios con daño estructural es superior al número de edificios que no tienen daño estructural.

Con este análisis inicial se podría indicar que en el suelo Tipo B, los edificios de hormigón armado con determinados parámetros urbanísticos han sufrido más daño estructural que los edificios de mampostería, sin embargo, en el tipo de suelo C, los edificios de mampostería han sufrido más daño que los edificios de hormigón armados con determinados parámetros urbanísticos.

• Tipo de suelo B

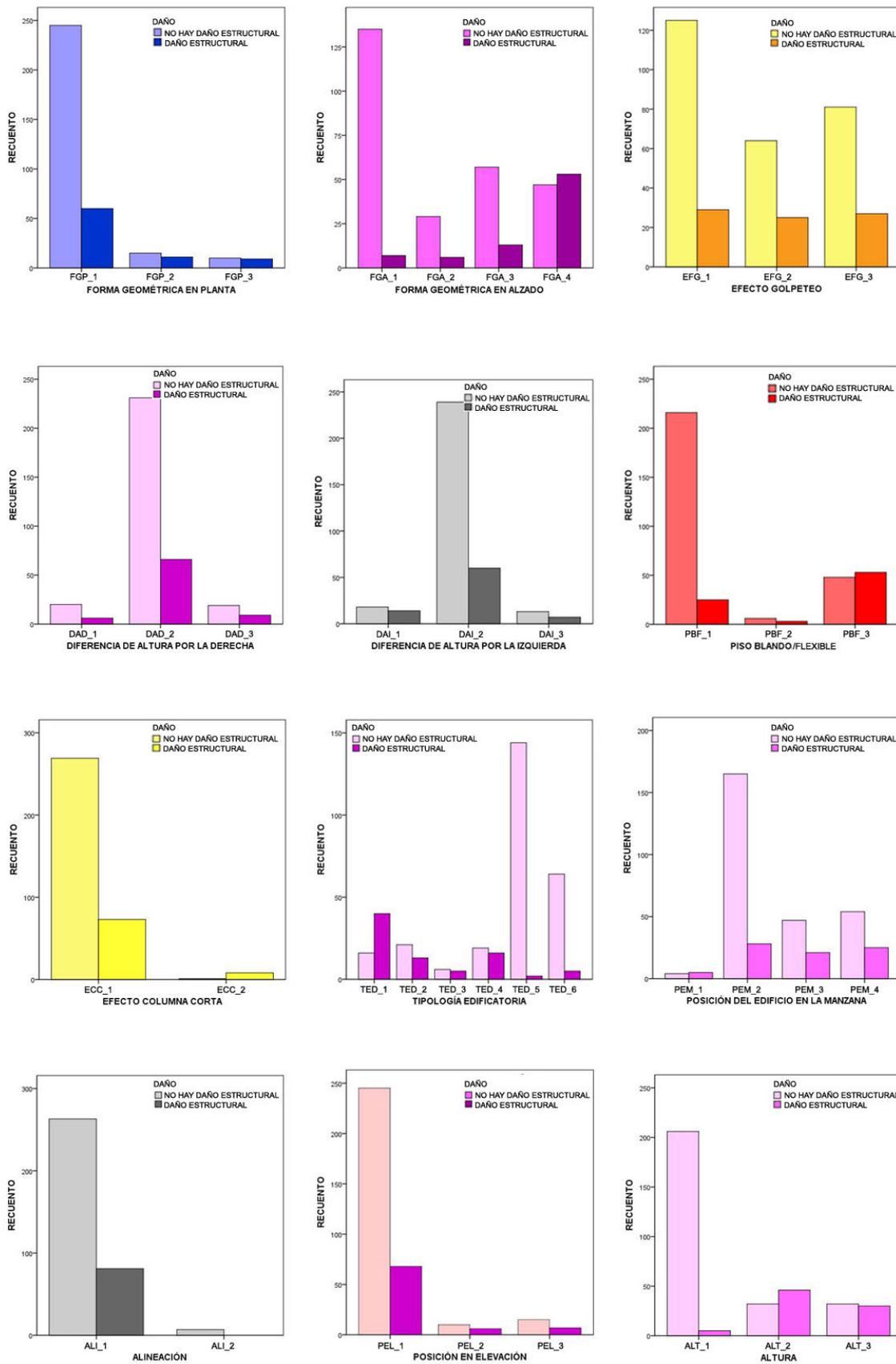


Figura 7.14 Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo B

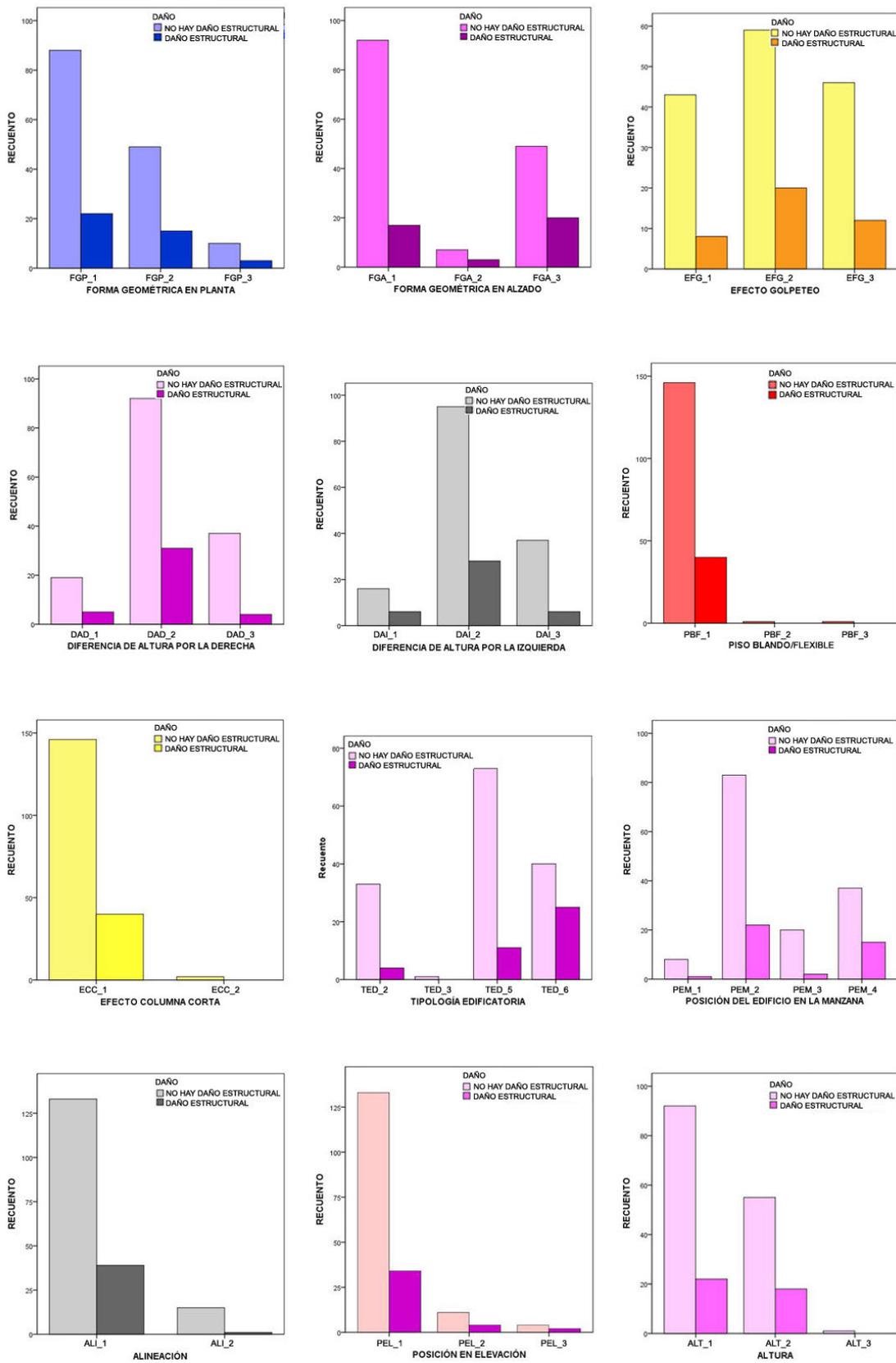


Figura 7.15 Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de mampostería en el tipo de suelo B

• Tipo de suelo C

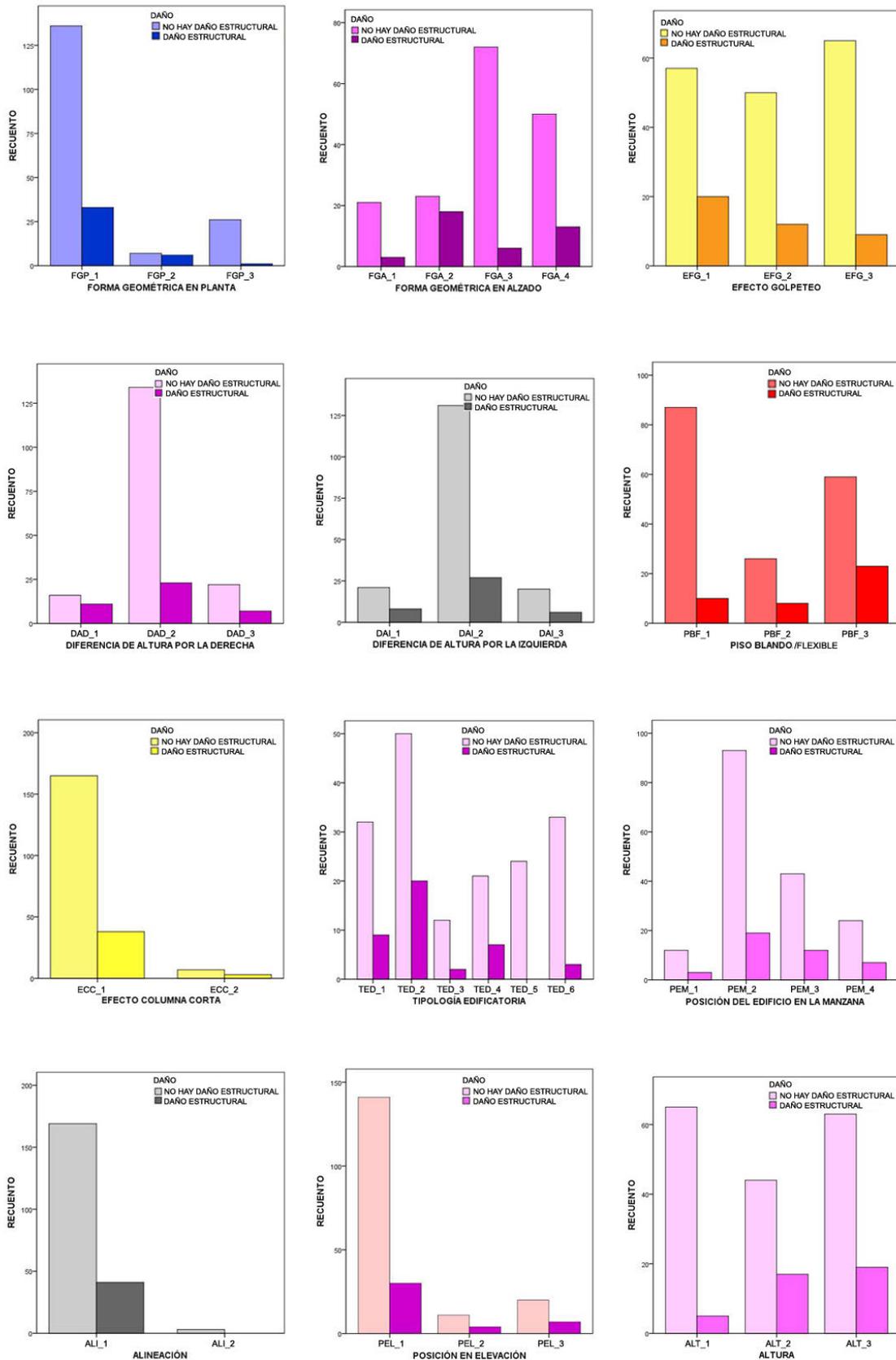


Figura 7.16 Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo C.

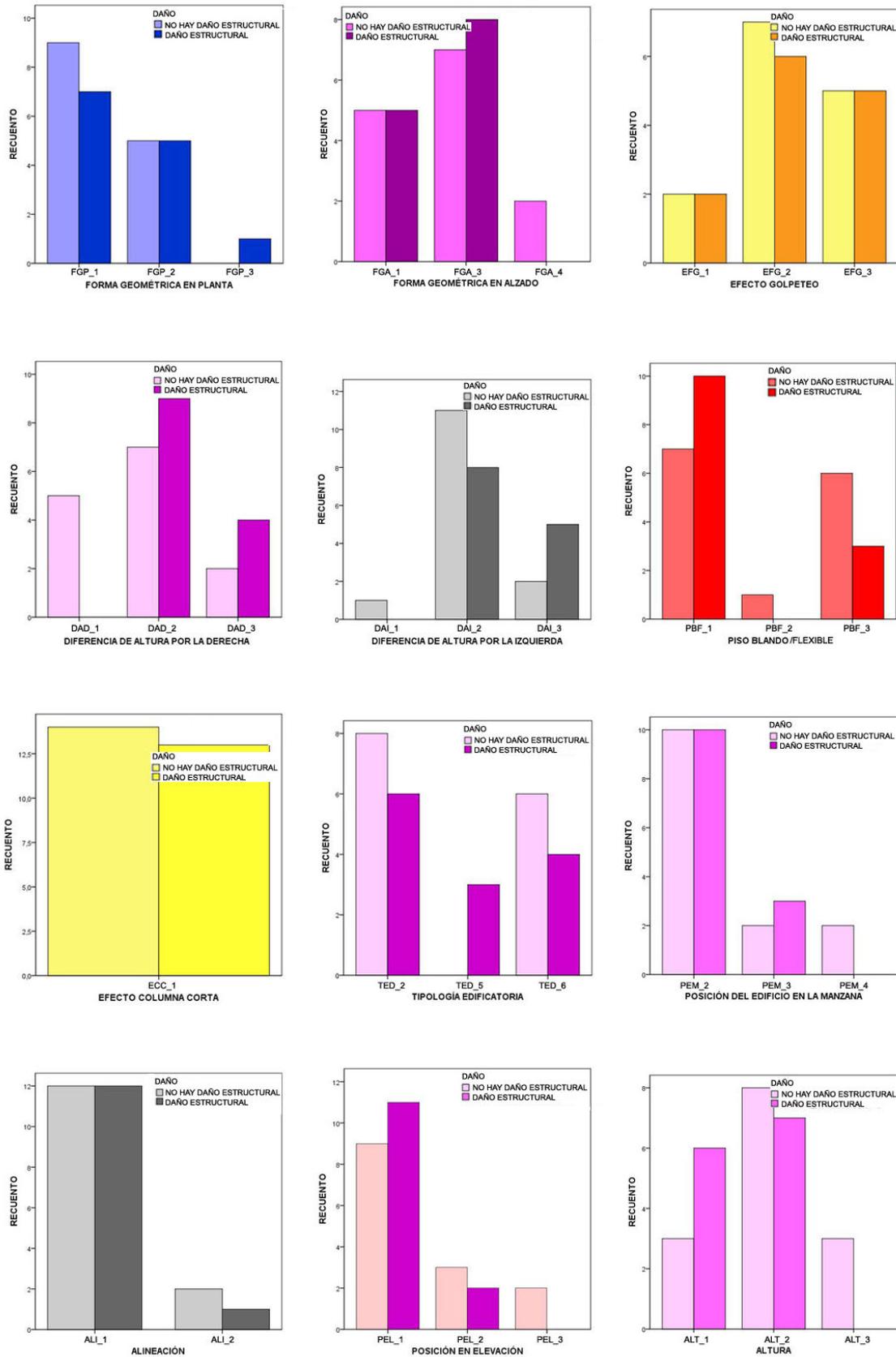


Figura 7.17 Frecuencia del número de edificios que no han tenido daño estructural y el número de edificios con daño estructural para la tipología constructiva de mampostería en el tipo de suelo C

7.5.2 Metodología aplicada del análisis estadístico

En esta tesis doctoral tenemos un conjunto de edificios con una serie de características, llamados parámetros urbanísticos, que a su vez están divididos en niveles. Por ejemplo, el parámetro urbanístico, Forma geométrica en planta tiene tres niveles: (apartado 8.3, Análisis descriptivo de los parámetros urbanísticos, 8.3.1 Forma geométrica en planta) “Regular”, “Irregular: Entrantes exteriores” e “Irregular. Entrantes interiores”. Además, tras el terremoto de Lorca de 2011 se han clasificado los edificios con el daño observado (Apartado 8.5 Análisis Estadístico) en dos categorías "No hay daño estructural/ Edificios Habitables" (sin daño (blanco) y daño no estructural (verde)) y "Con daño estructural/Edificios No Habitables" (Amarillo, Rojo y Negro).

El objetivo de este estudio es conocer si los niveles de los parámetros urbanísticos están relacionados con el daño. Para encontrar esta relación desarrollamos una metodología descrita en el Capítulo 4 línea metodológica, apartado 4.3.2.1. Análisis estadístico. Se transcriben a continuación los tres puntos fundamentales descritos anteriormente:

1. Cálculo del índice de discriminación, definido de la siguiente forma:

$$i = \frac{\text{N}^\circ \text{ de edificios de un nivel de un parámetro urbanístico con daño estructural}}{\text{N}^\circ \text{ total de edificios con daño estructural}} - \frac{\text{N}^\circ \text{ de edificios de un nivel de un parámetro urbanístico no hay daño estructural}}{\text{N}^\circ \text{ total de edificios que no tienen daño estructural}}$$

2. Una vez calculado los índices de discriminación, se hace un cambio de escala para que todos los índices calculados estén entre el 0 y 1. Para ello, al valor -1 le damos el valor 0 y al valor +1 el valor 1. Con este cambio de escala se obtiene la probabilidad asociada a cada uno de los parámetros urbanísticos dicotómicos con el parámetro "Daño".

3. Finalmente, para analizar la relación de dependencia o independencia entre dos variables cualitativas nominales u ordinales, se estudia su distribución conjunta o tabla de contingencia. Para estudiar si la asociación entre los parámetros urbanísticos dicotómicos con el factor daño era significativa y no se debía al azar, se utilizó el estadístico Chi-cuadrado de independencia, cuyo calculo nos permite afirmar con un nivel de confianza del 95% si los niveles de una variable cualitativa influyen en los niveles de la otra variable nominal analizada. Tal como se indicó en el apartado de metodología, las hipótesis de este contraste son las siguientes:

H₀: El nivel del parámetro urbanístico (a estudiar) **no se** relaciona con el daño estructural

H₁: El nivel del parámetro urbanístico (a estudiar) **sí se** relaciona con el daño estructural



H₀: Las dos variables son independientes

H₁: Las dos variables no son independientes

En las Figuras 7.18 y 7.19 se representan los índices de discriminación de los niveles de los parámetros urbanísticos para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo B y C.

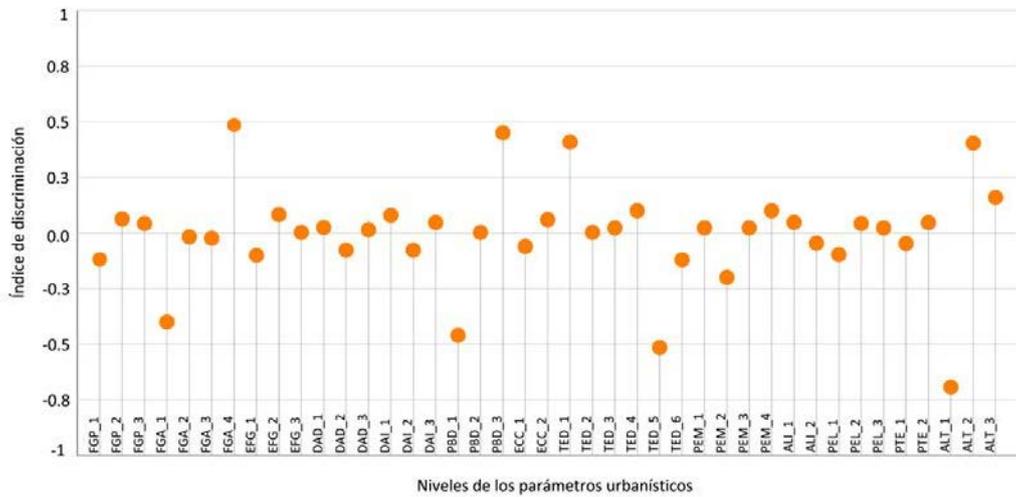


Figura 7.18 Representación gráfica del índice de discriminación de los niveles de los parámetros urbanísticos para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo B

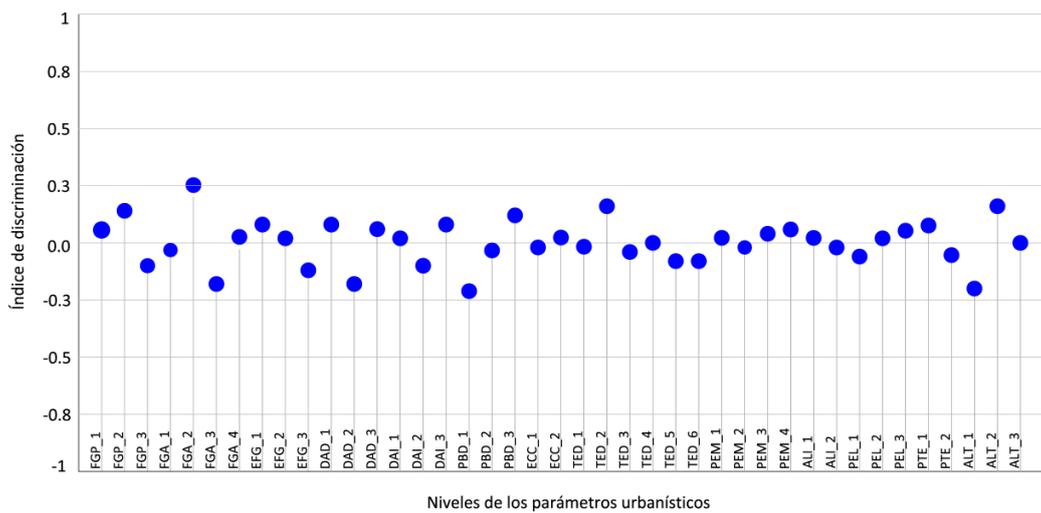


Figura 7.19 Representación gráfica del índice de discriminación de los niveles de los parámetros urbanísticos para la tipología constructiva de hormigón armado en el tipo de suelo C

Puede observarse como en el tipo de suelo B existen valores que discriminan al nivel, mientras que en el tipo de suelo C, estos valores discriminantes son nulos.

A continuación se muestra un ejemplo de la tabla de contingencia del nivel 101 del parámetro urbanístico alineación con el daño y el cálculo del estadístico chi-cuadrado:

Tabla de contingencia ALI_1 * TRIAJE_12

			DAÑO		TOTAL
			No hay daño estructural (blanco-verde)	Daño estructural (amarillo-rojo-negro)	
ALI_1	101. ALINEADA	Frecuencia empírica/observada	398	120	518
		Frecuencia teórica/esperada	402.1	115.9	518.0
		% dentro de DAÑO	94.8%	99.2%	95.7%
los demás tipos		Frecuencia empírica/observada	22	1	23
		Frecuencia teórica/esperada	17.9	5.1	23.0
		% dentro de DAÑO	5.2%	.8%	4.3%
Total		Frecuencia empírica/observada	420	121	541
		Frecuencia teórica/esperada	420.0	121.0	541.0
		% dentro de DAÑO	100.0%	100.0%	100.0%

$$\chi^2 = \frac{(398 - 402,1)^2}{402,1} + \frac{(120 - 115,9)^2}{115,9} + \frac{(22 - 17,9)^2}{17,9} + \frac{(1 - 5,1)^2}{5,1} = 4,42$$

Una vez conocido el estadístico χ^2 , se acepta la H_1 (el parámetro urbanístico (a estudiar) sí se relaciona con el daño estructural con un nivel de confianza del 95% si p-valor < 0,05, en caso contrario no hay evidencias para rechazar H_0).

7.6 TABLAS DE RESULTADOS

Los resultados de nuestro estudio, utilizando el Software de IBM SPSS Estatistics 20 y el Software Microsoft Excel 2010, se presentan en las siguientes tablas para cada tipo de suelo:

1. Tipo de suelo B

a) Edificios de hormigón armado

Parámetros Urbanísticos	i	p	Chi-cuadrado	p-valor
1. FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA				
FGP_1 11. REGULAR	-0,163318	0,418341	14,377	0,000
FGP_2 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores.	0,080452	0,540226	5,90	0,015
FGP_3 122. IRREGULAR. Entrantes interiores.	0,070521	0,535260	5,787	0,016
2. FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO				
FGA_1 21. REGULAR.	-0,415425	0,292287	44,617	0,000
FGA_2 221. IRREGULAR. Voladizos cerrados.	-0,032937	0,483532	0,756	0,385
FGA_3 222. IRREGULAR. Voladizos abiertos.	-0,049838	0,475081	0,972	0,324
FGA_4	0,480889	0,740445	70,907	0,000

223. IRREGULAR. Entrantes y salientes				
3. EFECTO GOLPETEO				
EFG_1 31. NO PRESENTA	-0,106920	0,446540	2,893	0,089
EFG_2 321. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos un lado	0,072480	0,536240	1,734	0,188
EFG_3 322. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos dos lados	0,034440	0,517220	0,348	0,555
4. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA DERECHA				
DAD_1 41. Diferencia de altura $x \leq -1$	0,000273	0,500137	0,000	0,993
DAD_2 42. Misma altura por la derecha	-0,041274	0,479363	0,818	0,366
DAD_3 43. Diferencia de altura $X \geq +1$	0,041000	0,520500	1,432	0,231
5. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA IZQUIERDA				
DAI_1 51. Diferencia de altura $x \leq -1$	0,106419	0,553209	8,545	0,003
DAI_2 52. Misma altura por la izquierda	-0,144868	0,427566	10,395	0,001
DAI_3 53. Diferencia de altura $X \geq +1$	0,038449	0,519225	1,720	0,190
6. PISO BLANDO/FLEXIBLE				
PBF_1 61. NO PRESENTA	-0,488406	0,255797	68,9	0,000
PBF_2 621. PRESENTA. Sin cerramientos	0,014897	0,507448	0,555	0,456
PBF_3 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado	0,473509	0,736755	67,938	0,000
7. EFECTO COLUMNA CORTA				
ECC_1 71. NO PRESENTA	-0,095075	0,452462	22,625	0,000
ECC_2 72. PRESENTA	0,095075	0,547538	22,625	0,000
8. TIPOLOGÍA EDIFICATORIA				
TED_1 8111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central	0,434787	0,717393	88,119	0,000
TED_2 8112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	0,083003	0,541502	4,924	0,026
TED_3 8121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto exento	0,035898	0,517949	2,441	0,118
TED_4 8122. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto agrupado	0,127420	0,563710	11,307	0,001
TED_5 821. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hilera	-0,506674	0,246663	65,953	0,000
TED_6 822. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	-0,174434	0,412783	12,040	0,001
9. POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA				
PEM_1 91. Aislado	0,043278	0,521639	4,232	0,040
PEM_2 92. Intermedio	-0,263177	0,368411	17,440	0,000
PEM_3 93. Esquina	0,085828	0,542914	2,947	0,086
PEM_4 94. Terminal	0,109380	0,554690	4,286	0,038
10. ALINEACIONES				

ALI_1 101. Alineada	0,025830	0,512915	2,135	0,144
ALI_2 102. No Alineada	-0,025830	0,487085	2,135	0,144
11. POSICIÓN EN ELEVACIÓN				
PEL_1 111. Edificios adyacentes misma altura	-0,068243	0,465879	3,016	0,082
PEL_2 112. Algún edificio adyacente más alto	0,037174	0,518587	1,986	0,159
PEL_3 113. Algún edificio adyacente más bajo	0,031069	0,515535	1,027	0,311
12. MORFOLOGÍA DEL TERRENO				
PTE_1 121. Pendiente < 10%	-0,110519	0,444741	4,781	0,029
PTE_2 122. Pendiente > 10%	0,110519	0,555259	4,781	0,029
13. ALTURA DE LA EDIFICACIÓN				
ALT_1 131. Altura ≤ 2 pisos	-0,698419	0,150790	126,686	,000
ALT_2 132. Altura > 2 pisos y ≤ 4 pisos	0,449820	0,724910	73,153	,000
ALT_3 133. Altura > 4 pisos	0,248599	0,624300	26,228	,000

Donde:

parámetros urbanísticos: parámetros urbanísticos dicotomizados.

i: índices discriminatorios.

p: probabilidad asociada a cada uno de los parámetros urbanísticos dicotómicos con el daño

chi-cuadrado: cálculo del estadístico Chi-cuadrado.

p-valor: significación del contraste.

b) Edificios de mampostería

Parámetros Urbanísticos	i	p	Chi-cuadrado	p-valor
1. FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA				
FGP_1 11. REGULAR	-0,044595	0,477703	0,258	0,612
FGP_2 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores.	0,043919	0,521959	0,271	0,603
FGP_3 122. IRREGULAR. Entrantes interiores.	0,007432	0,503716	0,027	0,869
2. FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO				
FGA_1 21. REGULAR.	-0,196622	0,401689	4,997	0,025
FGA_2 221. IRREGULAR. Voladizos cerrados.	0,027703	0,513851	0,480	0,488
FGA_3 222. IRREGULAR. Voladizos abiertos.	0,168919	0,584459	3,868	0,049
FGA_4 223. IRREGULAR. Entrantes y salientes				
3. EFECTO GOLPETEO				
EFG_1 31. NO PRESENTA	-0,090541	0,454730	1,306	0,253
EFG_2 321. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos un lado	0,101351	0,550676	1,328	0,249
EFG_3 322. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos dos lados	-0,010811	0,494595	0,017	0,896
4. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA DERECHA				
DAD_1 41. Diferencia de altura $x \leq -1$	-0,003378	0,498311	0,003	0,955
DAD_2 42. Misma altura por la derecha	0,153378	0,576689	3,275	0,070
DAD_3	-0,150000	0,425000	4,155	0,042

43. Diferencia de altura $X \geq +1$				
5. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA IZQUIERDA				
DAI_1 51. Diferencia de altura $x \leq -1$	0,041892	0,520946	0,535	0,465
DAI_2 52. Misma altura por la izquierda	0,058108	0,529054	0,470	0,493
DAI_3 53. Diferencia de altura $X \geq +1$	-0,100000	0,450000	1,785	0,182
6. PISO BLANDO/FLEXIBLE				
PBF_1 61. NO PRESENTA	0,013514	0,506757	0,546	0,460
PBF_2 621. PRESENTA. Sin cerramientos	-0,006757	0,496622	0,272	0,602
PBF_3 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado	-0,006757	0,496622	0,272	0,602
7. EFECTO COLUMNA CORTA				
ECC_1 71. NO PRESENTA				
ECC_2 72. PRESENTA				
8. TIPOLOGÍA EDIFICATORIA				
TED_1 8111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central				
TED_2 8112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	-0,122973	0,438514	3,012	0,083
TED_3 8121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto exento	-0,006757	0,496622	0,272	0,602
TED_4 8122. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto agrupado				
TED_5 821. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hileras	-0,218243	0,390878	6,068	0,014
TED_6 822. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	0,354730	0,677365	17,517	0,000
9. POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA				
PEM_1 91. Aislado	-0,029054	0,485473	0,583	0,445
PEM_2 92. Intermedio	-0,010811	0,494595	0,015	0,903
PEM_3 93. Esquina	-0,085135	0,457432	2,209	0,137
PEM_4 94. Terminal	0,125000	0,562500	2,459	0,117
10. ALINEACIONES				
ALI_1 101. Alineada	0,076351	0,538176	2,358	0,125
ALI_2 102. No Alineada	-0,076351	0,461824	2,358	0,125
11. POSICIÓN EN ELEVACIÓN				
PEL_1 111. Edificios adyacentes misma altura	-0,048649	0,475676	0,751	0,386
PEL_2 112. Algún edificio adyacente más alto	0,025676	0,512838	0,283	0,595
PEL_3 113. Algún edificio adyacente más bajo	0,022973	0,511486	0,538	0,463
12. MORFOLOGÍA DEL TERRENO				
PTE_1 121. Pendiente $< 10\%$	-0,087838	0,456081	3,775	0,042
PTE_2	0,087838	0,543919	3,775	0,042

122. Pendiente >10%				
13. ALTURA DE LA EDIFICACIÓN				
ALT_1 131. Altura ≤2 pisos	-0,071622	0,464189	0,677	,411
ALT_2 132. Altura > 2 pisos y ≤ 4 pisos	0,078378	0,539189	0,814	,367
ALT_3 133. Altura > 4 pisos	-0,006757	0,496622	0,272	,602

Donde:

parámetros urbanísticos: parámetros urbanísticos dicotomizados.

i: índices discriminitorios.

p: probabilidad asociada a cada uno de los parámetros urbanísticos dicotómicos con el daño

chi-cuadrado: cálculo del estadístico Chi-cuadrado.

p-valor: significación del contraste.

2. Tipo de suelo C

a) Edificios de hormigón armado

Parámetros Urbanísticos	i	p	Chi-cuadrado	p-valor
1. FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA				
FGP_1 11. REGULAR	0,014180	0,507090	0,041	0,840
FGP_2 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores.	0,105644	0,552822	6,448	0,011
FGP_3 122. IRREGULAR. Entrantes interiores.	-0,126773	0,436614	4,807	0,028
2. FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO				
FGA_1 21. REGULAR.	-0,048922	0,475539	0,793	0,373
FGA_2 221. IRREGULAR. Voladizos cerrados.	0,305303	0,652652	19,854	0,000
FGA_3 222. IRREGULAR. Voladizos abiertos.	-0,272263	0,363868	10,574	0,001
FGA_4 223. IRREGULAR. Entrantes y salientes	0,026375	0,513188	0,111	0,739
3. EFECTO GOLPETEO				
EFG_1 31. NO PRESENTA	0,156410	0,578205	3,509	0,061
EFG_2 321. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos un lado	0,001985	0,500993	0,001	0,980
EFG_3 322. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos dos lados	-0,158395	0,420803	3,664	0,056
4. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA DERECHA				
DAD_1 41. Diferencia de altura $x \leq -1$	0,175269	0,587635	9,188	0,002
DAD_2 42. Misma altura por la derecha	-0,218094	0,390953	8,126	0,004
DAD_3 43. Diferencia de altura $X \geq +1$	0,042825	0,521412	0,516	0,472
5. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA IZQUIERDA				
DAI_1 51. Diferencia de altura $x \leq -1$	0,073029	0,536514	1,501	0,220
DAI_2 52. Misma altura por la izquierda	-0,103091	0,448454	1,837	0,175
DAI_3 53. Diferencia de altura $X \geq +1$	0,030062	0,515031	0,279	0,597
6. PISO BLANDO/FLEXIBLE				
PBF_1 61. NO PRESENTA	-0,261912	0,369044	9,157	0,002
PBF_2 621. PRESENTA. Sin cerramientos	0,043959	0,521980	0,477	0,490

PBF_3 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado	0,217952	0,608976	6,642	0,010
7. EFECTO COLUMNA CORTA				
ECC_1 71. NO PRESENTA	-0,032473	0,483763	0,780	0,377
ECC_2 72. PRESENTA	0,032473	0,516237	0,780	0,377
8. TIPOLOGÍA EDIFICATORIA				
TED_1 8111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central	0,033466	0,516733	0,239	0,625
TED_2 8112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	0,197107	0,598554	5,830	0,016
TED_3 8121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto exento	-0,020987	0,489507	0,237	0,626
TED_4 8122. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto agrupado	0,048639	0,524319	0,686	0,408
TED_5 821. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hilera	-0,139535	0,430233	6,447	0,011
TED_6 822. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	-0,118690	0,440655	3,321	0,068
9. POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA				
PEM_1 91. Aislado	0,003403	0,501702	0,006	0,939
PEM_2 92. Intermedio	-0,077283	0,461358	0,793	0,373
PEM_3 93. Esquina	0,042683	0,521341	0,315	0,575
PEM_4 94. Terminal	0,031197	0,515598	0,259	0,611
10. ALINEACIONES				
ALI_1 101. Alineada	0,017442	0,508721	0,725	0,394
ALI_2 102. No Alineada	-0,017442	0,491279	0,725	0,394
11. POSICIÓN EN ELEVACIÓN				
PEL_1 111. Edificios adyacentes misma altura	-0,088060	0,455970	1,622	0,203
PEL_2 112. Algún edificio adyacente más alto	0,033607	0,516804	0,571	0,450
PEL_3 113. Algún edificio adyacente más bajo	0,054453	0,527226	0,887	0,346
12. MORFOLOGÍA DEL TERRENO				
PTE_1 121. Pendiente < 10%	0,037294	0,518647	0,497	0,481
PTE_2 122. Pendiente >10%	-0,037294	0,481353	0,497	0,481
13. ALTURA DE LA EDIFICACIÓN				
ALT_1 131. Altura ≤2 pisos	-0,255956	0,372022	9,831	,002
ALT_2 132. Altura > 2 pisos y ≤ 4 pisos	0,158820	0,579410	4,086	,043
ALT_3 133. Altura > 4 pisos	0,097136	0,548568	1,319	,251

Donde:

parámetros urbanísticos: parámetros urbanísticos dicotomizados.

i: índices discriminitorios.

p: probabilidad asociada a cada uno de los parámetros urbanísticos dicotómicos con el daño

.chi-cuadrado: cálculo del estadístico Chi-cuadrado.

p-valor: significación del contraste.

b) Edificios de mampostería

Parámetros Urbanísticos	i	p	Chi-cuadrado	p-valor
1. FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA				
FGP_1 11. REGULAR	-0,104396	0,447802	0,304	0,581
FGP_2 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores.	0,027473	0,513736	0,022	0,883
FGP_3 122. IRREGULAR. Entrantes interiores.	0,076923	0,538462	1,118	0,290
2. FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO				
FGA_1 21. REGULAR.	0,027473	0,513736	0,022	0,883
FGA_2 221. IRREGULAR. Voladizos cerrados.	-0,142857	0,428571	2,006	0,157
FGA_3 222. IRREGULAR. Voladizos abiertos.	0,115385	0,557692	0,363	0,547
FGA_4 223. IRREGULAR. Entrantes y salientes				
3. EFECTO GOLPETEO				
EFG_1 31. NO PRESENTA	0,010989	0,505495	0,006	0,936
EFG_2 321. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos un lado	-0,038462	0,480769	0,040	0,842
EFG_3 322. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos dos lados	0,027473	0,513736	0,022	0,883
4. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA DERECHA				
DAD_1 41. Diferencia de altura $x \leq -1$	-0,357143	0,321429	5,698	0,017
DAD_2 42. Misma altura por la derecha	0,192308	0,596154	1,033	0,310
DAD_3 43. Diferencia de altura $X \geq +1$	0,164835	0,582418	1,060	0,303
5. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA IZQUIERDA				
DAI_1 51. Diferencia de altura $x \leq -1$	-0,071429	0,464286	0,964	0,326
DAI_2 52. Misma altura por la izquierda	-0,170330	0,414835	0,938	0,333
DAI_3 53. Diferencia de altura $X \geq +1$	0,241758	0,620879	2,051	0,152
6. PISO BLANDO/FLEXIBLE				
PBF_1 61. NO PRESENTA	0,269231	0,634615	2,095	0,148
PBF_2 621. PRESENTA. Sin cerramientos	-0,071429	0,464286	0,964	0,326
PBF_3 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado	-0,197802	0,401099	1,187	0,276
7. EFECTO COLUMNA CORTA				
ECC_1 71. NO PRESENTA				
ECC_2 72. PRESENTA				
8. TIPOLOGÍA EDIFICATORIA				
TED_1 8111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central				
TED_2 8112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	-0,109890	0,445055	0,326	0,568

TED_3 8121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto exento				
TED_4 8122. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto agrupado				
TED_5 821. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hilera	0,230769	0,615385	3,635	0,05
TED_6 822. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	-0,120879	0,439560	0,422	0,516
9. POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA				
PEM_1 91. Aislado				
PEM_2 92. Intermedio	0,054945	0,527473	0,106	0,745
PEM_3 93. Esquina	0,087912	0,543956	0,345	0,557
PEM_4 94. Terminal	-0,142857	0,428571	2,006	0,157
10. ALINEACIONES				
ALI_1 101. Alineada	0,065934	0,532967	0,297	0,586
ALI_2 102. No Alineada	-0,065934	0,467033	0,297	0,586
11. POSICIÓN EN ELEVACIÓN				
PEL_1 111. Edificios adyacentes misma altura	0,203297	0,601648	1,451	0,228
PEL_2 112. Algún edificio adyacente más alto	-0,060440	0,469780	0,163	0,686
PEL_3 113. Algún edificio adyacente más bajo	-0,142857	0,428571	2,006	0,157
12. MORFOLOGÍA DEL TERRENO				
PTE_1 121. Pendiente < 10%	-0,076923	0,461538	1,118	0,290
PTE_2 122. Pendiente > 10%	0,076923	0,538462	1,118	0,290
13. ALTURA DE LA EDIFICACIÓN				
ALT_1 131. Altura ≤ 2 pisos	0,247253	0,623626	1,854	0,173
ALT_2 132. Altura > 2 pisos y ≤ 4 pisos	-0,032967	0,483516	0,030	0,863
ALT_3 133. Altura > 4 pisos	-0,214286	0,392857	3,134	0,077

Donde:

parámetros urbanísticos: parámetros urbanísticos dicotomizados.

i: índices discriminatorios.

p: probabilidad asociada a cada uno de los parámetros urbanísticos dicotómicos con el daño

chi-cuadrado: cálculo del estadístico Chi-cuadrado.

p-valor: significación del contraste.

En las tablas mostradas, los parámetros que tienen relación con el daño están sombreados en gris. Como puede apreciarse hay mucha más relación con el daño en el suelo duro tipo B que en suelo blando tipo C. Además los edificios de hormigón armado han sufrido mucho más daño que los edificios de mampostería. Como primeras conclusiones del estudio se podrían indicar:

- **En tipo de suelo B.**

o *Edificios de Hormigón.*

Los edificios de hormigón armado en tipo de suelo B con piso blando y en alzado entrantes y salientes son los que tienen una mayor probabilidad asociada al daño estructural, un 75%, al igual que los edificios en manzana cerrada y con más de 2 alturas. Los parámetros, que en este tipo de suelo y para esta tipología constructiva no estarían relacionados con el daño estructural, son los edificios con altura menor de 2, alzado regular, sin piso blando y tipología edificatoria agrupada en hilera.

o *Edificios de mampostería*

En este tipo de suelo, los edificios de mampostería han tenido mucha más relación con el no daño que con el daño. Los edificios con forma geométrica en alzado regular y agrupados en hilera serían los que representarían una mayor probabilidad de ser habitables tras el terremoto.

- **Tipo de suelo C**

o *Edificios de hormigón armado*

Los edificios de hormigón armado que han tenido una mayor relación con el daño han sido los que contienen los parámetros urbanísticos de voladizos cerrados y piso blando. En cambio los edificios que han tenido más relación con el no daño son los de altura menor o igual a dos, voladizos abiertos y sin piso blando.

o *Edificios de mampostería*

En este tipo de suelo los edificios no han tenido relación ni con el daño estructural ni con el no daño.

7.7 REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con los niveles de los parámetros urbanísticos que han tenido relación con el daño se ha representado su tendencia y fragilidad para cada tipo de suelo B y C. Con esta representación analizamos individualmente cada parámetro con sus niveles y podemos ver que niveles tienen más relación con el daño estructural, lo que afectaría al uso restringido del edificio después de un terremoto. También se ha realizado una tabla de habitabilidad con todos los parámetros y sus niveles, para la tipología de hormigón armado y mampostería en tipo de suelo B y C.

• **Gráficas de tendencias**

Como se ha comentado se han realizado unas gráficas que nos permiten ver la relación de los niveles de cada parámetro urbanístico individualmente para el tipo de suelo B y C y para las tipologías constructivas de hormigón armado y mampostería con el daño estructural o daño no estructural. En el Anexo VII se encuentran las gráficas de todos los parámetros. A continuación vamos a mostrar las gráficas del parámetro urbanístico Tipología edificatoria (TED).

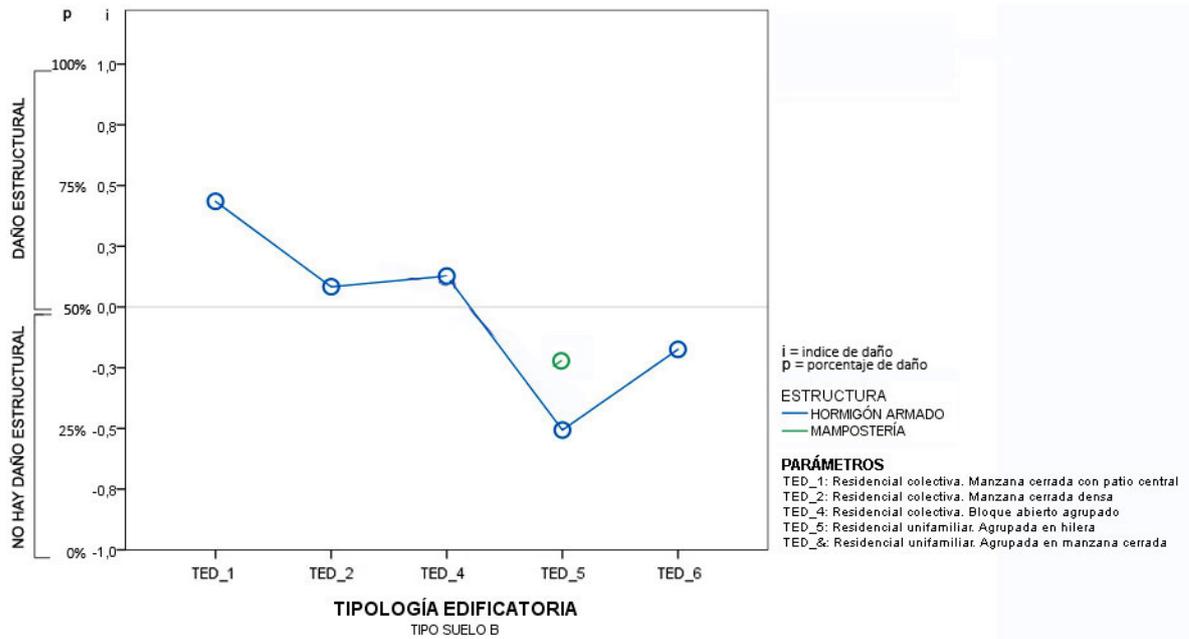


Figura 7.20 Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de mampostería y de hormigón armado para el tipo de suelo B

Como puede verse en la Figura 7.20, los niveles TED_1, TED_2 y TED_3 para los edificios de hormigón armado, en el tipo de suelo B, tienen relación con el daño estructural. Estos niveles representan las tipologías edificatorias residenciales colectivas, en sus niveles de manzana cerrada con patio central porcentaje de daño 72%, bloque abierto agrupado porcentaje del 57% y manzana cerrada densa 54%. Para este parámetro, en los edificios de mampostería no ha habido relación en ningún nivel con el daño estructural. Sin embargo, para el mismo parámetro urbanístico, en el tipo de suelo C (Figura 7.21) para la tipología de hormigón armado, solamente el nivel TED_2, residencial colectiva manzana cerrada densa ha tenido relación con el daño estructural con un porcentaje de daño del 60%. En los edificios de mampostería, la tipología edificatoria TED_5 residencial unifamiliar agrupada en hilera ha tenido relación con el daño estructural, con un porcentaje de daño del 65%

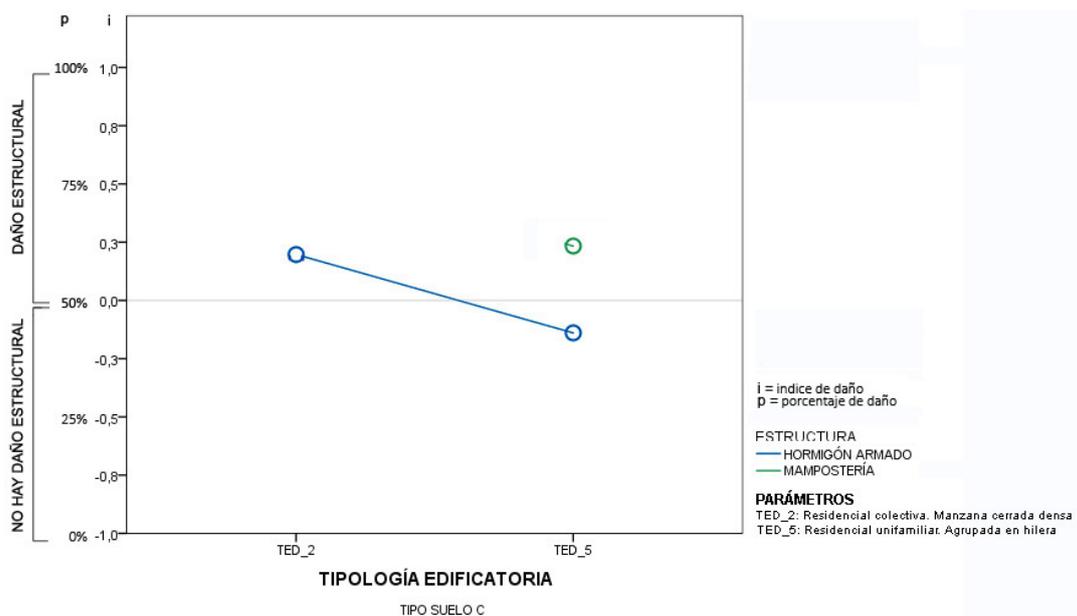


Figura 7.21 Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de mampostería y de hormigón armado para el tipo de suelo C

En la Figura 7.22 y la Figura 7.23 se pueden ver los dos tipos de suelo con los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria. Para los edificios de hormigón armado (Figura 7.22), en ambos tipos de suelo, los niveles del parámetro coinciden en su relación con el daño estructural o no estructural. Sin embargo, en los edificios de mampostería (Figura 7.23), el mismo nivel TED_5, en el tipo de suelo B no tiene relación con el daño estructural y en el tipo de suelo C si tiene.

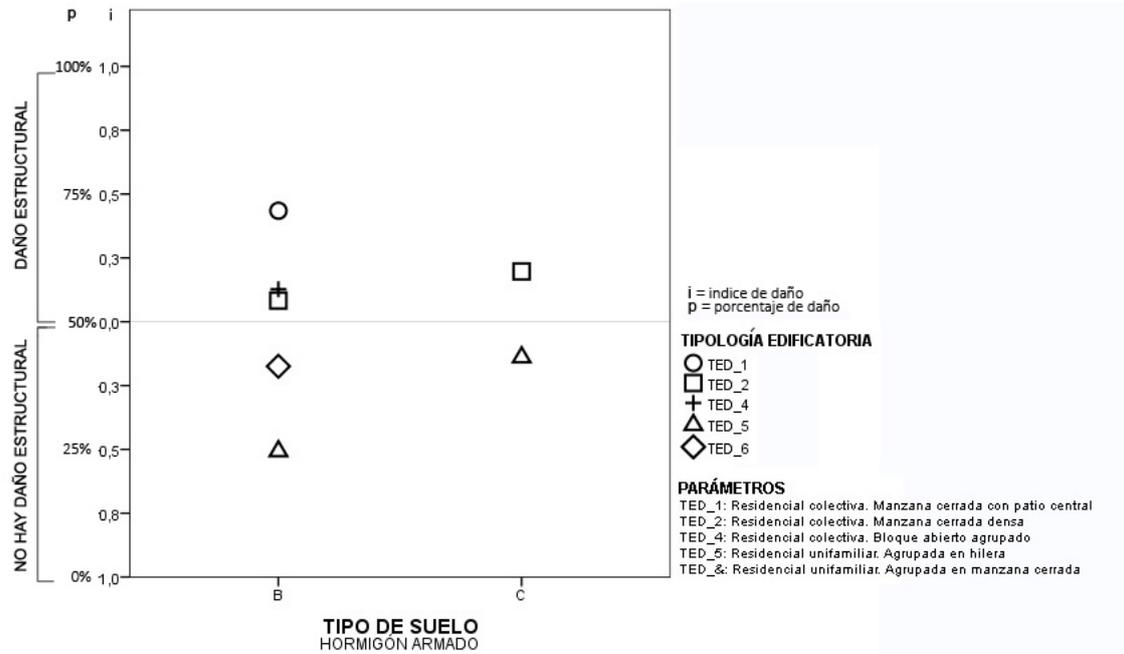


Figura 7.22 Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de hormigón armado para el tipo de suelo B y C

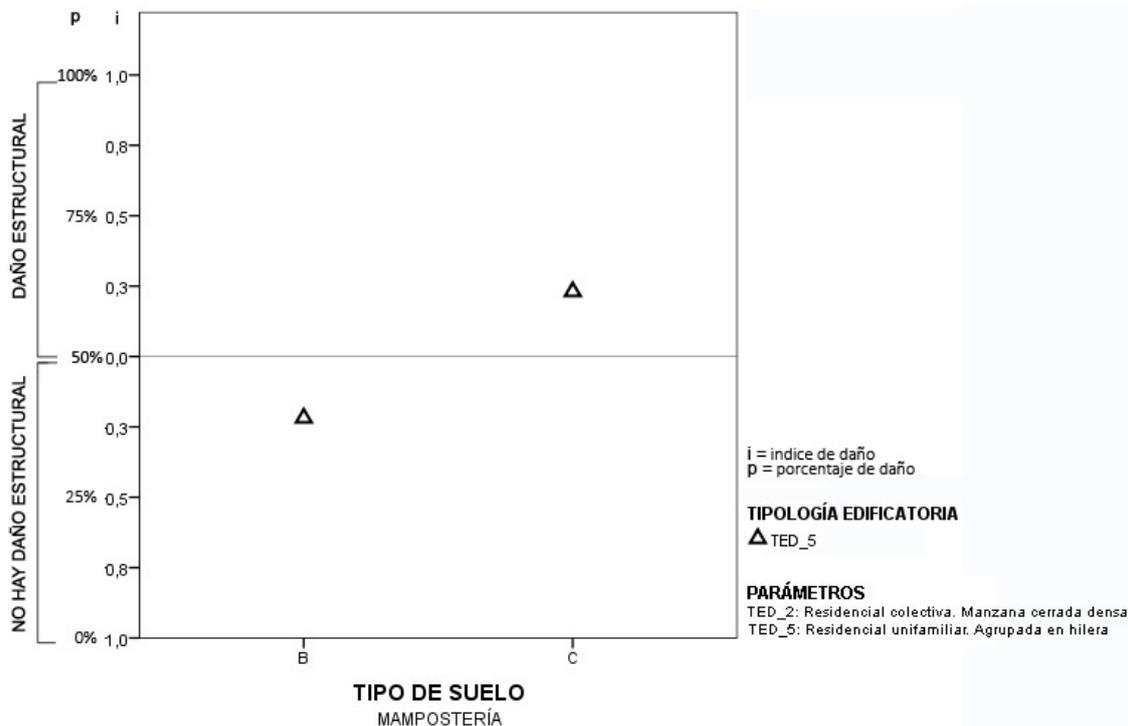


Figura 7.23 Índice de daño y porcentaje de daño para los niveles del parámetro urbanístico tipología edificatoria para la tipología estructural de mampostería para el tipo de suelo B y C

• **Tabla de Habitabilidad**

Se ha realizado una tabla en la que el índice de daño se transforma en el índice de habitabilidad. En el estudio estadístico la agrupación del daño fue de acuerdo a la clasificación de habitabilidad propuesta en la Tabla 5.2 del Capítulo 5. La representación de los datos se ha realizado con los siguientes criterios (Figura 7.24):

- En rojo se grafía los niveles relacionados con la inhabilitación de los edificios y en verde con la habitabilidad. A medida que la relación con el daño es mayor en ambos casos el color varía su intensidad a más oscuro.
- Una línea gruesa representa la tipología constructiva de hormigón armado y una línea fina la tipología constructiva de mampostería.

Esta graduación de los parámetros urbanísticos en su relación con el daño nos va a permitir poder incidir en las normas urbanísticas de las ciudades y dar recomendaciones en cada una de sus secciones en ciudades de riesgo sísmico. Podemos identificar rápidamente cuales son los parámetros urbanísticos que podrían producir daño estructural en la edificación si ocurriera un terremoto con las mismas características.

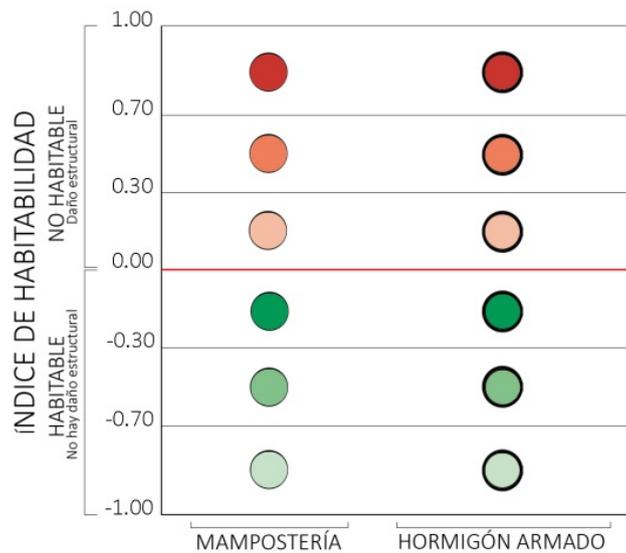


Figura 7.24 Escala de Habitabilidad. Índice de Habitabilidad.

TIPO DE SUELO B	ÍNDICE DE HABITABILIDAD			
	HABITABLE (NO hay daño estructural)		NO HABITABLE (Daño estructural)	
	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO
FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA				
FGP_1. 11. REGULAR		●		
FGP_2. 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores				●
FGP_3. 122. IRREGULAR. Entrantes interiores				●
FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO				
FGA_1. 21. REGULAR	●	●		
FGA_4. 223. IRREGULAR. Entrantes y salientes				●
DIFERENCIA DE ALTURA				
DAI_1. 51. Diferencia de altura por un lado $x < -1$				●
DAI_2. 52. Misma altura por un lado		●		
DAD_3. 43. Diferencia de altura por un lado $x > -1$	●			
PISO BLANDO/DÉBIL				
PBD_1. 61. NO PRESENTA		●		
PBD_3. 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado				●
EFFECTO COLUMNA CORTA				
ECC_1. 71. NO PRESENTA		●		
ECC_2. 72. PRESENTA				●
TIPOLOGÍA EDIFICATORIA				
TED_1. 8111. R.C. Manzana cerrada con patio central				●
TED_2. 8112. R.C. Manzana cerrada densa				●
TED_4. 8122. R.C. Bloque abierto agrupado				●
TED_5. 821. R.U. Agrupada en hilera	●	●		
TED_6. 822. R.U. Agrupada en manzana cerrada		●		
POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA				
PEM_1. 91. Aislado				●
PEM_2. 92. Intermedio		●		
PEM_4. 94. Terminal				●
POSICIÓN EN ELEVACIÓN				
PEL_1. 111. Edificios adyacentes misma altura		●		
MORFOLOGÍA DEL TERRENO				
PTE_1. 121. Pendiente $< 10\%$	●	●		
PTE_2. 122. Pendiente $> 10\%$			●	●
ALTURA DE LA EDIFICACIÓN				
ALT_1. 131. Altura < 2 pisos		●		
ALT_2. 132. Altura > 2 pisos y < 4 pisos				●
ALT_3. 133. Altura > 4 pisos				●

Figura 7.25 Escala de Habitabilidad de los niveles de los parámetros urbanísticos en el tipo de suelo B para la tipología de mampostería y hormigón armado

TIPO DE SUELO C

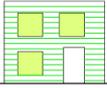
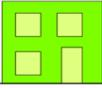
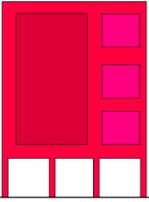
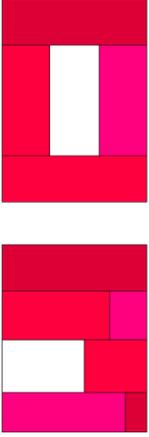
PARÁMETROS URBANÍSTICOS	ÍNDICE DE HABITABILIDAD			
	HABITABLE <small>(No hay daño estructural)</small>		NO HABITABLE <small>(Daño estructural)</small>	
	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO
FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA				
FGP_2. 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores				●
FGP_3. 122. IRREGULAR. Entrantes interiores		●		
FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO				
FGA_2. 221. IRREGULAR. Voladizos cerrados				●
FGA_3. 222. IRREGULAR. Voladizos abiertos		●		
DIFERENCIA DE ALTURA				
DAI_1. 51. Diferencia de altura por un lado $x < -1$	●			●
DAI_2. 52. Misma altura por un lado		●		
PISO BLANDO/DÉBIL				
PBD_1. 61. NO PRESENTA		●		
PBD_3. 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado				●
TIPOLOGÍA EDIFICATORIA				
TED_2. 8112. R.C. Manzana cerrada densa				●
TED_5. 821. R.U. Agrupada en hilera		●		
ALTURA DE LA EDIFICACIÓN				
ALT_1. 131. Altura < 2 pisos		●		
ALT_2. 132. Altura > 2 pisos y < 4 pisos				●

Figura 7.26 Escala de Habitabilidad de los niveles de los parámetros urbanísticos en el tipo de suelo B para la tipología de mampostería y hormigón armado

Además, este tipo de tablas (Figura 7.25 y Figura 7.26) pueden ser muy útiles para determinar rápidamente en el análisis de vulnerabilidad de una ciudad que edificaciones pueden quedarse inhabitables en función de sus parámetros urbanísticos tras un terremoto. En los planes de riesgo sísmico pueden servir para planificar previamente la estrategia frente a un terremoto con el cálculo de habitantes, ubicación de campamentos de emergencia.....

7.8 SIMULACIÓN DE DAÑOS

Después de realizar las escalas de habitabilidad en el apartado 8.7 e identificar cuáles son los niveles de los parámetros urbanísticos que tienen una mayor relación con el daño estructural o no estructural, hemos unido niveles con una probabilidad asociada al daño superior o igual al 65% en cada tipología constructiva y para cada tipo de suelo. Como resultado hemos obtenido (ver Figura 7.27) diferentes tipologías de edificios que nos darían una cartografía de habitabilidad con un 65% de coincidencia como mínimo, es decir, podríamos afirmar con un 65% de fiabilidad cuales serían los edificios que se quedarían inhabitables y cuales no si ocurriera en Lorca un terremoto con las mismas características que el de mayo de 2011 (ver Figura 7.28)

TIPO DE SUELO B	EDIFICIOS HABITABLES		EDIFICIOS INHABITABLES	
	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO
				
				
PARÁMETROS URBANÍSTICOS	FGA_1 (21) / TED_5,6 (821, 822)	FGA_1 (21) / PBD_1 (61) TED_5,6 (821, 822) / ALT_1 (131)		FGA_4 (223) / PBD_3 (622) TED_1,2,4 (8111, 8112, 8122) / ALT_2,3 (132,133)

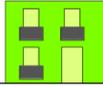
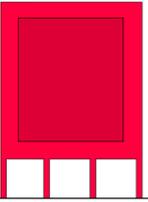
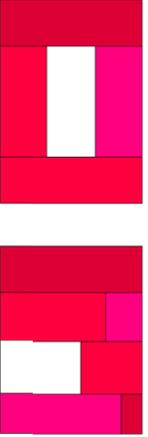
TIPO DE SUELO C	EDIFICIOS HABITABLES		EDIFICIOS INHABITABLES	
	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO	MAMPOSTERÍA	HORMIGÓN ARMADO
				
				
PARÁMETROS URBANÍSTICOS		FGA_3 (222) / PBD_1 (61) TED_5,6 (821, 822) / ALT_1 (131)		FGA_2 (221) / PBD_3 (622) TED_1,2,4 (8111, 8112, 8122) ALT_2,3 (132,133)

Figura 7.27 Tabla con las tipologías de edificios habitables e inhabitables si ocurriera en Lorca un terremoto con las mismas características que el de mayo de 2011 con una probabilidad del 65%.

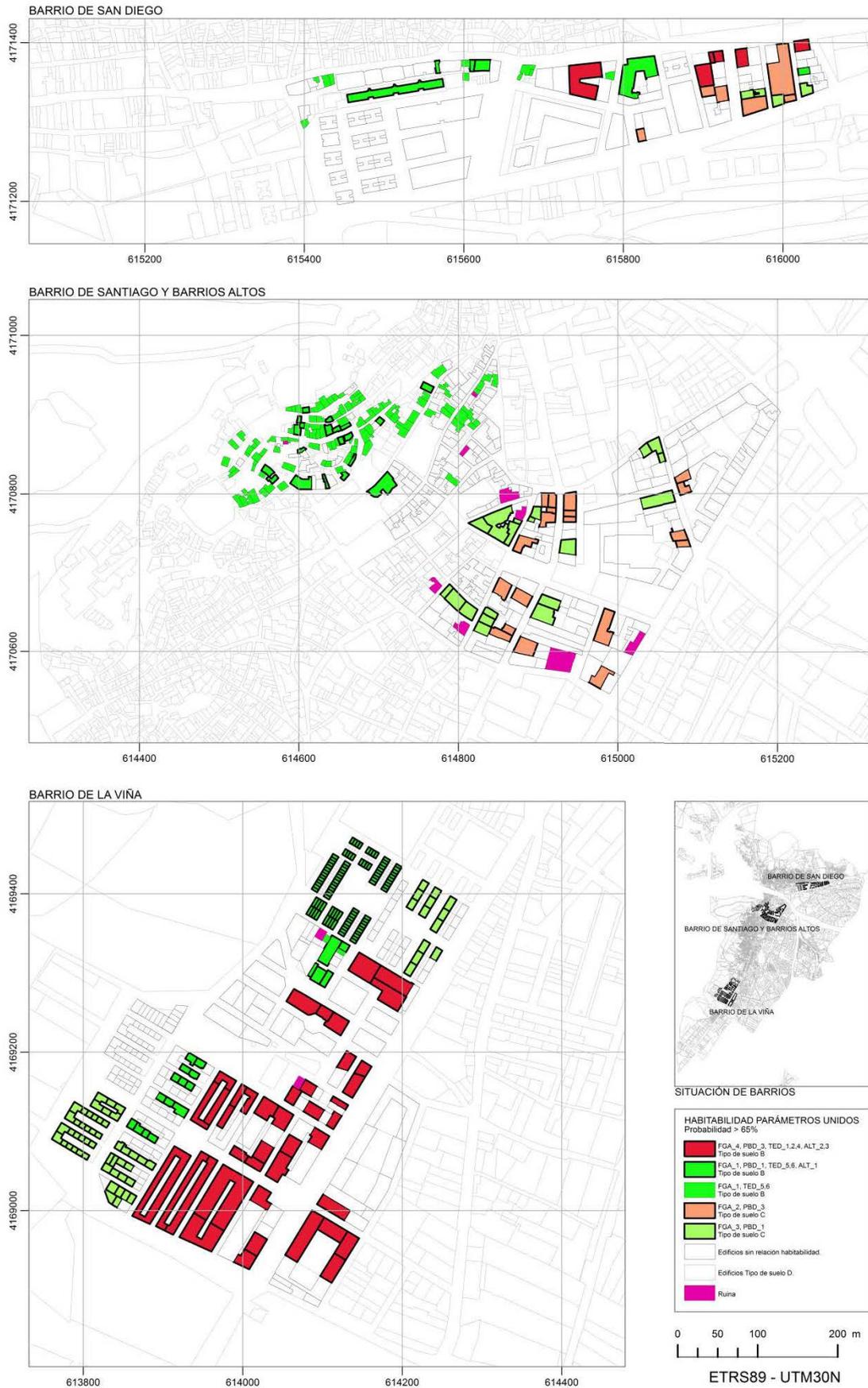


Figura 7.28 Cartografía con los edificios habitables e inhabitables si ocurriera en Lorca un terremoto con las mismas características que el de mayo de 2011 con una probabilidad del 65%.

En la Figura 7.27 puede verse como en los edificios de hormigón armado el piso blando ha sido determinante en la previsión del daño y como es en la tipología edificatoria de bloque colectivo donde se dan los edificios inhabitables y en la tipología de viviendas unifamiliares los edificios habitables. La altura juega un papel importante también a la hora de clasificar la habitabilidad de los edificios, alturas iguales o inferiores a dos tanto en edificios de hormigón armado como en edificios de mampostería dan como resultado edificios habitables.

Además con este tipo de análisis podemos realizar cartografías de análisis de la habitabilidad de los edificios (ver Figura 7.28) cartografía que puede aportar aproximaciones de gran interés para tareas de mitigación o de planificación de la respuesta temprana (ver la clasificación de habitabilidad observada en Lorca, Figura 5.15, página 130). Es fundamental transferir los resultados obtenidos a los organismos con responsabilidad en planificar las ciudades y en gestión de la protección civil y de emergencia, para desarrollar ciudades con menos riesgo sísmico y elaborar planes de emergencia viables.

PARTE III

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

8.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se han expuesto las metodologías usadas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las ciudades que permiten obtener y analizar escenarios de daño sísmico. Se ha profundizado en las metodologías empíricas, evaluando los modificadores por comportamiento que aumentan o disminuyen los índices básicos de vulnerabilidad según la tipología constructiva de los edificios. Además, el análisis del Planeamiento Urbanístico, profundizando en la Normativa, nos ha permitido determinar cuáles son los modificadores por comportamiento con carácter urbanístico, identificando trece parámetros objeto de estudio en esta tesis doctoral, con sus respectivos niveles de acuerdo a la literatura (Teresa Guevara, 2012).

La metodología propuesta se ha aplicado a cuatros barrios de Lorca, tres zonas de trabajo, para lo que se ha realizado un profundo trabajo de campo para la construcción de una completa y detallada base de datos de 850 edificios con su tipología constructiva y sus características urbanísticas. El uso de los Sistemas de Información Geográfica ha permitido desarrollar una cartografía inicial de georreferenciación de los datos, así como una aplicación piloto -de análisis de la habitabilidad- obteniendo resultados capaces de ser contrastados con los daños observados en el terremoto de 2011.

La existencia de un buen conocimiento de los daños en Lorca tras el terremoto del 11 de mayo de 2011 nos ha permitido realizar un estudio estadístico exhaustivo de cada nivel de los parámetros urbanísticos y su relación con el daño.

8.2 CONCLUSIONES

En este apartado se describen las principales conclusiones que hacen referencia a la consecución de los objetivos de esta tesis. Se presentan en tres bloques de acuerdo al alcance de los objetivos; objetivos específicos de evaluación y análisis de las metodologías actuales, objetivos de aplicación a la ciudad de Lorca y objetivo general de caracterización y graduación de los parámetros urbanísticos que tienen mayor correlación con el daño en las edificaciones tras un terremoto para poder reducir la vulnerabilidad sísmica de las ciudades.

8.2.1 Alcance de los objetivos específicos

Modificadores por comportamiento

Del análisis detallado de la definición y calibración de los modificadores por comportamiento de los distintos expertos y usados en las metodologías empíricas de evaluación de la vulnerabilidad sísmica se concluye:

- Los modificadores se definen y caracterizan según el conocimiento de las irregularidades sísmicas que presentan las edificaciones para las tipologías constructivas de hormigón armado y mampostería.
- La calibración de los modificadores depende del daño observado en terremotos pasados. Se gradúan en pasos $\pm 0,02$ sobre unos índices que van desde -0.08 hasta +0.08.
- El estudio histórico del daño en diferentes terremotos hacen que aparezcan nuevos modificadores. Por ejemplo, hasta el terremoto de Lorca no se había tenido en cuenta el modificador de piso blando flexible para edificios de hormigón armado.
- La máxima penalización en edificios de mampostería es para el modificador de edificios con altura superior a seis plantas y en edificios de hormigón armado alturas superiores a ocho plantas con un valor máximo en ambos casos de +0.08.

- Los modificadores que indican una reducción de la vulnerabilidad en edificios de mampostería y en edificios de hormigón armado son los edificios con posición en manzana intermedia con un valor en ambos casos de -0.04. También, en edificios de hormigón armado, son las edificaciones con altura inferior o igual a dos con un valor de -0.04.
- Por consiguiente, la incorporación de modificadores a los índices de clase permite representar bien las características geométricas, estructurales y de situación de los edificios.

Planeamiento Urbanístico en zonas sísmicas

Del estudio del planeamiento urbanístico en zonas sísmicas, y en particular de las disposiciones de las normas urbanísticas las conclusiones principales son:

- A la hora de planificar ciudades en zonas sísmicas los planos geológicos, geotectónicos y topográficos son muy importantes, puesto que las características locales del terreno filtran o amplifican determinados rangos de frecuencia de las ondas sísmicas en relación con las registradas en roca (“efecto local o de sitio”) lo que modifica la vulnerabilidad de tipologías constructivas específicas, que debiera ser información de gran relevancia en los procesos de planeamiento.
- La definición y caracterización de los parámetros que componen las normas urbanísticas de un plan general es fundamental para no crear ciudades irregulares sísmicamente, y por consiguiente, con una elevada vulnerabilidad sísmica.

8.2.2 Alcance de los objetivos específicos de aplicación a la ciudad de Lorca

El trabajo de campo y los datos

Este estudio no habría sido posible sin un extenso trabajo de campo que ha permitido definir, recopilar y estructurar todos los datos necesarios para crear una base de datos extensa, completa y fiable sobre una muestra significativa de edificios. También, se ha dispuesto de una serie de trabajos previos que han permitido disponer de una importante información sobre la clasificación de los daños del terremoto. Se resumen a continuación las principales conclusiones sobre este aspecto.

- El levantamiento “in situ” de 816 edificios, detallando su tipología constructiva y sus parámetros urbanísticos, ha sido fundamental tanto para tener un conocimiento detallado y fiable de los edificios como para poder desarrollar una base de datos extensa, completa e íntegra.
- La mayor complejidad en los trabajos de campo es la recopilación de los datos. La previa clasificación y codificación de los distintos niveles en este trabajo, así como la ejecución de una ficha de vulnerabilidad sísmica, han demostrado la eficiencia en este tipo de trabajos para alcanzar unos resultados con una gran resolución.

- Para la calibración de los modelos ha sido fundamental la base de datos obtenida de los parámetros constructivos y urbanísticos y la clasificación de daño observado en el terremoto (facilitado por el ayuntamiento de Lorca). Esta clasificación del daño observado en terremotos es una fuente inestimable para los métodos de análisis de daño.
- Es imprescindible la realización de estudios de microzonificación sísmica de los suelos de las ciudades. Sin ellos no es posible incorporar, de forma adecuada, fenómenos de amplificación local de la acción sísmica, sin los que los resultados de daño resultan menos significativos estadísticamente.

Los Sistemas de Información Geográfica

Se describen a continuación las conclusiones más relevantes respecto a la herramienta GIS diseñada y utilizada en este trabajo

- Los Sistemas de Información Geográfica son imprescindibles para depurar, homogeneizar y georreferenciar las bases de datos disponibles.
- El análisis de la vulnerabilidad en una gran ciudad requiere la creación de una base de información específica y “*a medida*”.
- Se ha implementado un SIG donde se ha homogeneizado y organizado toda la información recopilada en este estudio, así como los resultados obtenidos. Contiene una base de datos de los edificios de la localidad de Lorca con atributos como geometría, datos sobre direcciones postales, referencias catastrales y características estructurales y urbanísticas, entre otras. También contiene otro tipo de información como ortofotos, modelos digitales del terreno o un mapa de pendientes. Se trata de un SIG muy completo y fiable que puede servir de base para trabajos futuros sobre riesgo sísmico de Lorca.

El estudio estadístico

Se ha realizado un estudio estadístico de los parámetros urbanísticos y su correlación con el daño. Se han agrupado los edificios según su tipología estructural (mampostería y hormigón armado) y el tipo de suelo sobre el que se asientan de acuerdo a la clasificación del Eurocódigo8. Se resumen a continuación las conclusiones más relevantes sobre la metodología del estudio estadístico, los resultados obtenidos en el estudio estadístico y su representación.

Metodología

- La validación de los resultados requiere utilizar un contraste estadístico que permita desechar con confianza suficiente la hipótesis de que las correlaciones obtenidas no lo han sido por mero azar. En este trabajo se ha usado para ello el contraste estadístico basado en el estadístico χ^2 (Chi-cuadrado).

- En este tipo de estudios es fundamental identificar los niveles de los parámetros urbanísticos que han tenido una relación de dependencia con el daño observado. Con esta metodología los modificadores por comportamiento se podrían calibrar estadísticamente en otras ciudades de acuerdo a los daños observados.

Resultados

- En el tipo de suelo B ha habido una mayor correlación de los niveles de los parámetros urbanísticos con el daño, tanto en los edificios de mampostería como en los de hormigón armado.
- En los edificios de hormigón armado existe una cantidad mayor de parámetros urbanísticos que tienen relación con el daño que en los edificios de mampostería.

En tipo de suelo B

- Edificios de hormigón armado
Los edificios de hormigón armado en tipo de suelo B con piso blando y en alzado entrantes y salientes son los que tienen una mayor probabilidad asociada al daño estructural, un 75%, al igual que los edificios en manzana cerrada y con más de 2 alturas. Los parámetros, que en este tipo de suelo y para esta tipología constructiva no estarían relacionados con el daño estructural, son los edificios con altura menor de 2, alzado regular, sin piso blando y tipología edificatoria agrupada en hilera.
- Edificios de mampostería
En este tipo de suelo, los edificios de mampostería han tenido mucha más relación con el no daño que con el daño. Los edificios con forma geométrica en alzado regular y agrupados en hilera serían los que representarían una mayor probabilidad de ser habitables tras el terremoto.

Tipo de suelo C

- Edificios de hormigón armado
Los edificios de hormigón armado que han tenido una mayor relación con el daño han sido los que contienen los parámetros urbanísticos de voladizos cerrados y piso blando. En cambio los edificios que han tenido más relación con el no daño son los de altura menor o igual a dos, voladizos abiertos y sin piso blando.
- Edificios de mampostería
En este tipo de suelo los edificios no han tenido relación ni con el daño estructural ni con el no daño.

Representación

Se han realizado una gráficas que nos permiten ver la relación de los niveles de cada parámetro urbanístico individualmente para el tipo de suelo B y C y para las tipologías constructivas de hormigón armado y mampostería con el daño estructural o daño no estructural. Esta representación nos permite identificar rápidamente que nivel ha tenido la mayor relación con el daño estructural y puede ser muy útil para la gestión del riesgo sísmico de una ciudad.

- Las tablas de habitabilidad pueden ser muy útiles para determinar rápidamente en el análisis de vulnerabilidad de una ciudad que edificaciones pueden quedarse inhabitables en función de sus parámetros urbanísticos tras un terremoto.

8.2.3 Alcance del objetivo general

El objetivo general de esta tesis doctoral es poder caracterizar y graduar los parámetros urbanísticos (aquellos que están regulados en las Normas Urbanísticas de un Plan General de Ordenación Urbana) que tienen mayor correlación con el daño en las edificaciones tras un terremoto para poder reducir la vulnerabilidad sísmica de las ciudades. Se describen a continuación las conclusiones más relevantes sobre el logro del objetivo general.

- Todos los niveles de los parámetros urbanísticos han sido definidos y caracterizados, de tal manera que en futuros trabajos de vulnerabilidad sea fácil identificar en los edificios los parámetros que hacen que tengan un comportamiento irregular sísmicamente.
- Se ha realizado una graduación de los parámetros urbanísticos en su relación con el daño. Esto nos va a permitir poder incidir en las normas urbanísticas de las ciudades y dar recomendaciones en cada una de sus secciones en ciudades de riesgo sísmico.
- Las tablas realizadas de tipologías de edificios y cartografía de habitabilidad nos permiten identificar, con un 65% de fiabilidad, cuáles serían los edificios que se quedarían inhabitables y cuales no si ocurriera en Lorca un terremoto con las mismas características que el de mayo de 2011.
- Es fundamental transferir los resultados obtenidos a los organismos con responsabilidad en planificar las ciudades y en gestión de la protección civil y de emergencia, para desarrollar ciudades con menos riesgo sísmico y elaborar planes de emergencia viables.

8.3 LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo es un paso más hacia la evaluación de la vulnerabilidad de las ciudades, y más concretamente la ciudad de Lorca, pero también contiene importantes aportaciones metodológicas. A partir de la experiencia adquirida en él y a partir de otros trabajos previos o recientes relacionados con la vulnerabilidad sísmica en entornos urbanos, se exponen a continuación algunas recomendaciones y líneas de investigación abiertas. Estos aspectos de complementación y de progreso se han estructurado, también como en los apartados anteriores, de acuerdo a la secuencia de: modificadores por comportamiento, planeamiento urbanístico, trabajo de campo y los datos.

Modificadores por comportamiento

- Desarrollar los métodos analíticos de análisis de la vulnerabilidad sísmica de forma que permita incorporar a los espectros de capacidad las características específicas de los edificios particulares (modificadores por comportamiento), especialmente las que están más relacionadas con el daño.

En este sentido, el profesor Lagomarsino ha introducido ya mejoras presentadas en el Tercer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica de 2007 (Lagomarsino y Giovinazzi, 2006; Lagomarsino 2007).

- Definir y caracterizar nuevos modificadores. Este estudio nos ha permitido identificar otros posibles modificadores que no se han tenido en cuenta en las metodologías actuales como es el caso de la Tipología edificatoria y que pueden estar relacionados con el daño.
- Adaptar y calibrar los modificadores por comportamiento actuales a las distintas zonas urbanas considerando estados de daño de la literatura.

Planeamiento Urbanístico en zonas sísmicas

Este trabajo deja abierta una línea de investigación para que las administraciones públicas y los técnicos especializados en sismicidad trabajen conjuntamente para planificar ciudades regulares sísmicamente. Se apuntan aquí algunas líneas futuras que se refieren a la redacción de normativas sismorresistentes.

- Incidir en las Administraciones para poder aportar dentro de la documentación de un Plan General una cartografía de Vs30.
- Redactar Normas urbanísticas sismorresistentes en todas las ciudades con riesgo sísmico diferenciando en la definición y caracterización de los parámetros urbanísticos el tipo de suelo sobre el que se asienta el edificio y el tipo de construcción.
- Es conveniente crear y mantener bases de datos identificando y clasificando los parámetros de carácter urbanístico potenciales modificadores de la vulnerabilidad frente a un sismo.

Estas bases de datos serían una fuente de inestimable para la calibración de los modelos y métodos de evaluación de la vulnerabilidad.

Trabajo de campo y los datos

Los datos son imprescindibles en todo trabajo científico que se fundamenta en la dialéctica observación, modelización y contraste, calibración y validación del modelo. Se apuntan aquí algunas líneas futuras.

- La codificación de los parámetros nos permite realizar futuros trabajos de campo de forma más eficaz y usando dispositivos electrónicos que faciliten luego el trabajo de gabinete.
- Investigar cómo aplicar las nuevas tecnologías de la información geográfica (fotogrametrías, teledetección, Lidar.....) para obtener bases de datos que permitan cuantificar parámetros claves en el impacto sísmico de las ciudades. Esto permitiría no tener que realizar el trabajo de campo tan laborioso.
- Es conveniente crear y mantener una base de datos que inventarién los tipos de edificios con sus características urbanísticas y clasifiquen los daños observados en terremotos. Se podría usar como ejemplo la iniciativa de la Worl Housing Encyclopedia. Estas bases de datos sería una fuente inestimable para la calibración de los modelos y métodos de análisis de daño.
- Con respecto a otra información útil, es importante incorporar a los protocolos de obtención de información el detalle de su sistema estructural y el nivel de reformas que ha sufrido a lo largo del tiempo como el desarrollo de planeamiento al que pertenece el edificio.

El estudio estadístico

En este trabajo el estudio estadístico nos ha permitido obtener resultados relevantes de los parámetros urbanísticos que han tenido relación con el daño en una muestra de 816 edificios. Sería interesante poder continuar con las siguientes líneas de recomendación:

- Aplicar y calibrar esta metodología en toda la ciudad de Lorca y replicar en otras ciudades.
- Realizar estudio de otros tipo de edificios (sanitarios, docentes...) y de las líneas vitales y servicios esenciales.
- Agrupar los diferentes parámetros urbanísticos, de acuerdo a las tipologías más comunes de edificios existentes en una ciudad (ejemplo: edificio de hormigón armado de más de cuatro altura con piso blando en planta baja, entrantes y salientes en alzado, forma geométrica en

planta regular y tipología edificatoria de bloque abierto), y buscar relaciones con el daño de acuerdo a estos tipos de edificios.

- Sistematizar y protocolizar la revisión y actualización de estos estudios. Ello permitirá incorporar nueva información, nuevos avances o cambios en la organización administrativa del territorio.

Los resultados

Se han obtenido resultados de los parámetros urbanísticos que están relacionados con el daño y del tipo de edificio que podría quedarse inhabitable en un terremoto con las mismas características o similares al que ocurrió en Lorca en 2011. Sería interesante poder continuar con las siguientes líneas de recomendación:

- Calcular distintos escenarios sísmicos, que darían distintos tipos de daños, y calibrar con estos datos los parámetros urbanísticos.
- Aplicar a la ciudad entera de Lorca e incluso a toda la Región de Murcia esta metodología y obtener una cartografía de habitabilidad de toda la ciudad.
- Efectuar estudios económicos de la reparación y reconstrucción de los edificios inhabitables y calcular tiempos de ejecución.

ANEXOS

ANEXO I

Fichas de evaluación rápida de daños usadas en el terremoto del 11 de mayo de 2011 en Lorca



CONCEJALÍA DE URBANISMO Y DESARROLLO SOSTENIBLE

C/ Puente de la Alberca, s/n - Complejo la Merced - 30800 Lorca (Murcia)
Teléfono: 968 479726 - Fax: 968 478046 - Web: www.urbanismo.lorca.es
E-mail: urbanismo@lorca.es

MOVIMIENTO SÍSMICO DEL DÍA 11 DE MAYO DE 2011-EVALUACIÓN DE DAÑOS

PROPIEDAD.....
INMUEBLE SITUADO EN CALLE-PLAZA.....
.....

DÍA DE LA INSPECCIÓN.....
HORA DE LA INSPECCIÓN.....

1.- DAÑOS DETECTADOS:

- EN ESTRUCTURA.....
- EN MURO DE CARGA O MEDIANERAS...
- EN FORJADOS.....
- EN TABIQUERÍAS.....
- EN FALSOS TECHOS.....
- EN CARPINTERÍA.....
- EN INSTALACIONES....
- EN CUEBIERTAS.....
- EN CORNISAS.....
- EN ALICATADOS....
- EN SOLADOS.....
- EN OTROS.....

OBSERVACIONES.....
.....

2.- CÓDIGO

VERDE	SIN PROBLEMAS	
AMARILLO	PRECAUCIÓN	
ROJO	COLAPSO	

3. MEDIDAS DE CARÁCTER URGENTE ADOPTADAS

.....
.....
.....

EL TÉCNICO

EN SU CASO, EL PROPIETARIO

Protocolo Técnico de Actuación
 (Seísmo en Lorca 11-05-2011)

Fecha inspección: Grupo de inspección nº:

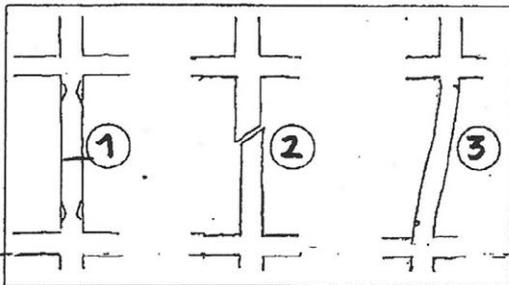
Situación de la edificación:

Inspeccionar preferentemente PB y P1. Igualmente enanos de elevación de nivel 0

Señalización de la edificación tras la inspección

Marcar con aspa lo que proceda

<input type="radio"/>	Verde	Se permite el acceso general con la prudencia personal de los usuarios en cuanto a caída de escayolas, revestimientos, etc.	<input type="checkbox"/>
<input type="radio"/>	Amarillo	Apuntalamientos parciales y/o demoliciones parciales: petos, cornisas, etc.	<input type="checkbox"/>
<input type="radio"/>	Rojo	Desalojo y/o demolición	<input type="checkbox"/>



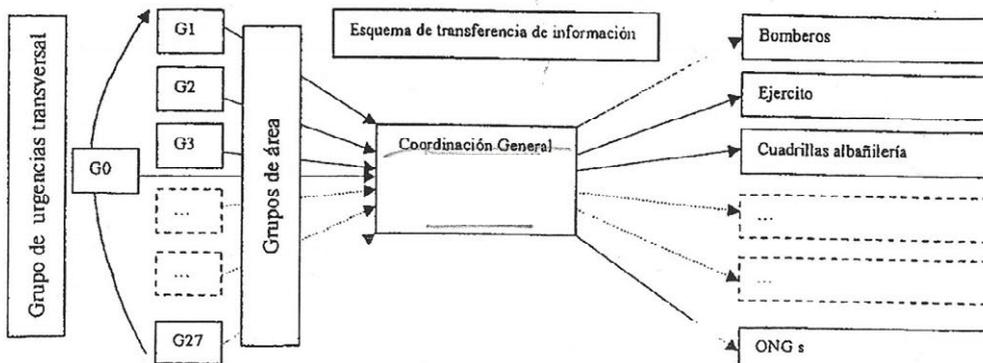
Observaciones

Firma

Coordinación General:

G0	Urgencias transversales
G1	
G2	Ctra Caravaca
G3	San Juan
G4	
G5	Institutos
G6	
G7	Óvalo norte
G8	Teatro Guerra
G9	
G10	San Diego
G11	
G12	La Vifia
G13	
G14	Santa Clara

G15	San José
G16	
G17	Barrios Altos
G18	
G19	Los Angeles
G20	Miguel Angel
G21	Plaza de Toros
G22	San Antonio
G23	
G24	Virgen Huertas
G25	Dip. Río
G26	Apolonia
G27	

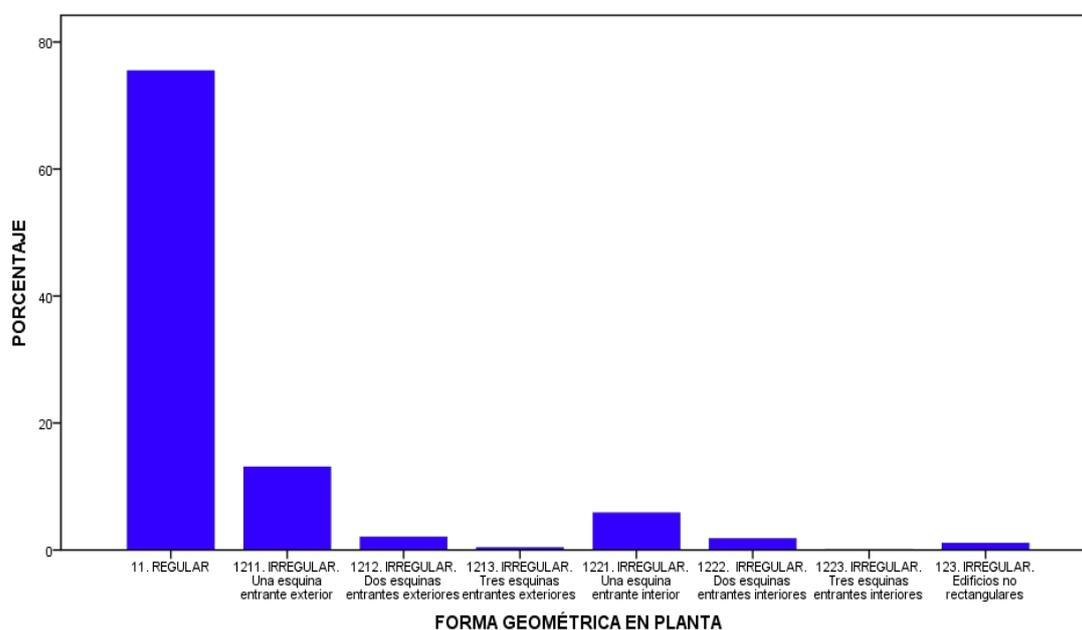


ANEXO II

Estudio exploratorio de los parámetros urbanísticos. Frecuencias, porcentajes y diagramas de barras de los diferentes niveles

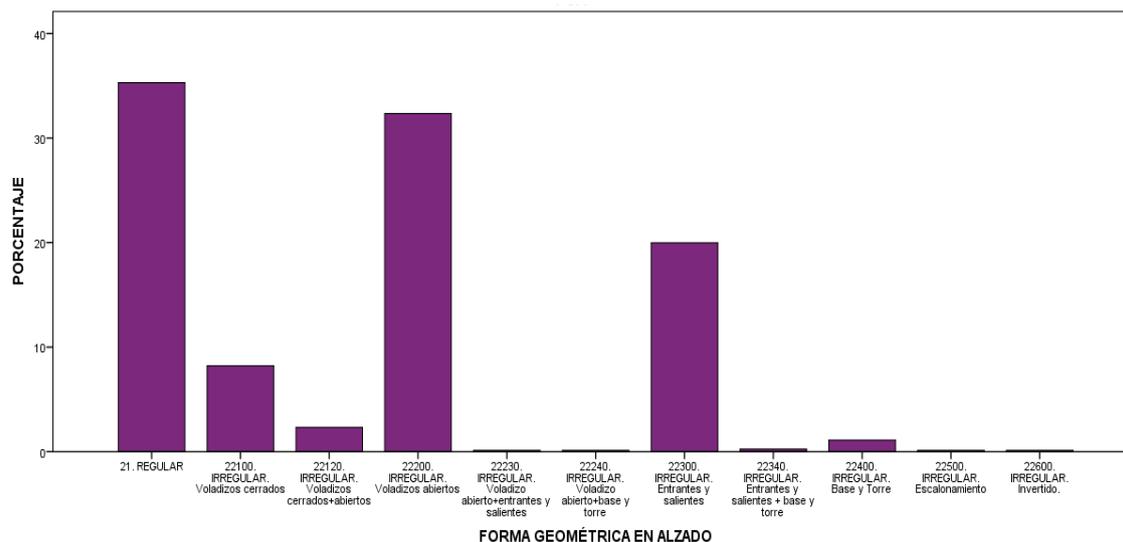
1. FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
11. REGULAR	616	75,5
1211. IRREGULAR. Una esquina entrante exterior	107	13,1
1212. IRREGULAR. Dos esquinas entrantes exteriores	17	2,1
1213. IRREGULAR. Tres esquinas entrantes exteriores	3	,4
1221. IRREGULAR. Una esquina entrante interior	48	5,9
1222. IRREGULAR. Dos esquinas entrantes interiores	15	1,8
1223. IRREGULAR. Tres esquinas entrantes interiores	1	,1
123. IRREGULAR. Edificios no rectangulares	9	1,1
TOTAL	816	100,0



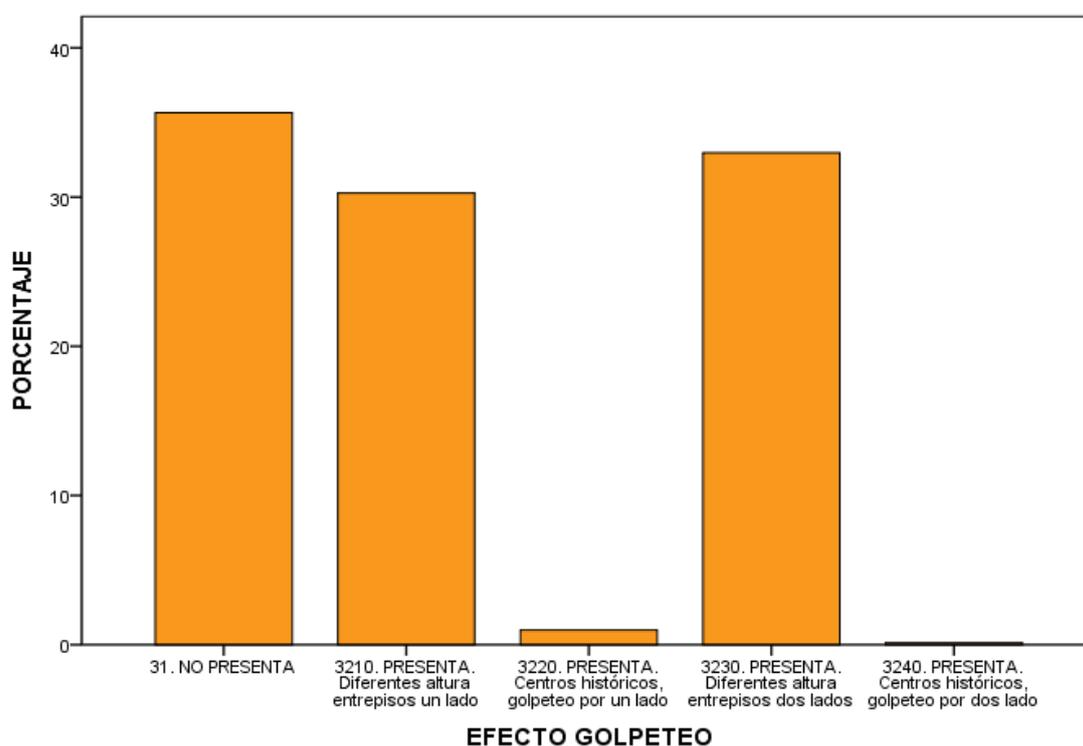
2. FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
21. REGULAR	288	35,3
22100. IRREGULAR. Voladizos cerrados	67	8,2
22120. IRREGULAR. Voladizos cerrados+abiertos	19	2,3
22200. IRREGULAR. Voladizos abiertos	264	32,4
22230. IRREGULAR. Voladizo abierto+entrantes y salientes	1	,1
22240. IRREGULAR. Voladizo abierto+base y torre	1	,1
22300. IRREGULAR. Entrantes y salientes	163	20,0
22340. IRREGULAR. Entrantes y salientes + base y torre	2	,2
22400. IRREGULAR. Base y Torre	9	1,1
22500. IRREGULAR. Escalonamiento	1	,1
22600. IRREGULAR. Invertido.	1	,1
TOTAL	816	100,0



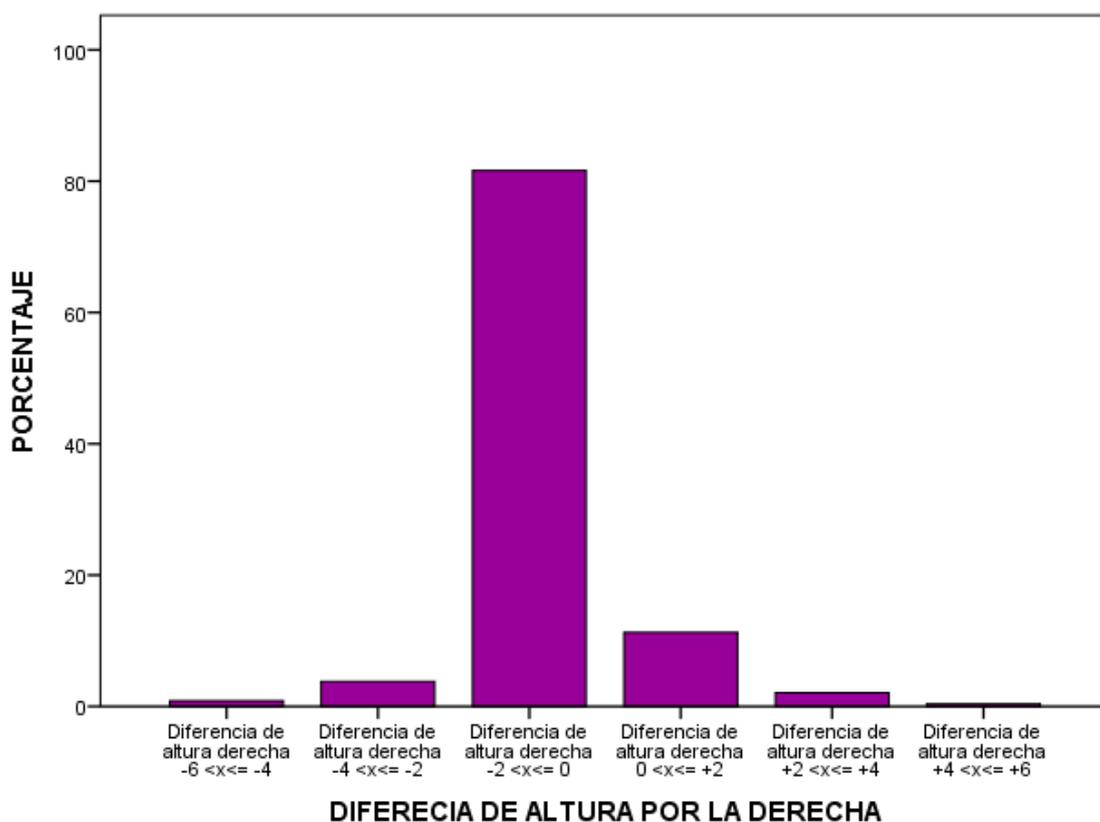
3. EFECTO GOLPETEO

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
31. NO PRESENTA	291	35,7
3210. PRESENTA. Diferentes altura entrepisos un lado	247	30,3
3220. PRESENTA. Centros históricos, golpeteo por un lado	8	1,0
3230. PRESENTA. Diferentes altura entrepisos dos lados	269	33,0
3240. PRESENTA. Centros históricos, golpeteo por dos lado	1	,1
TOTAL	816	100,0



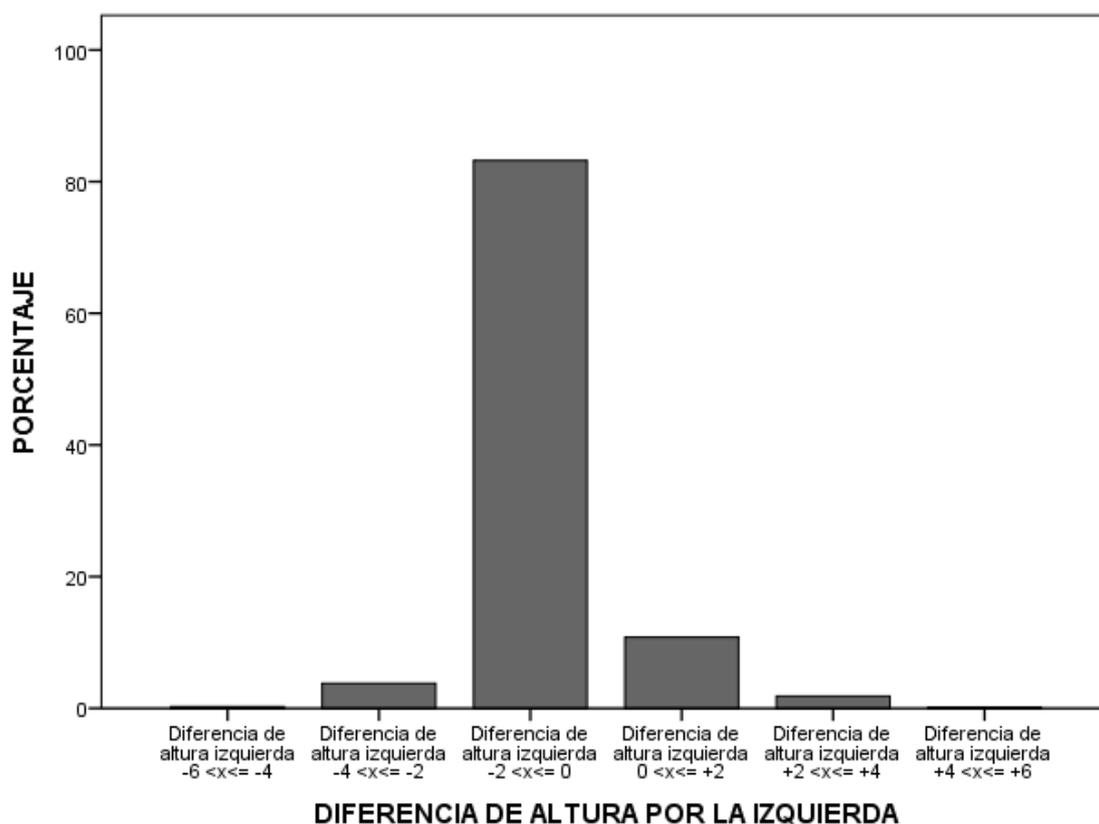
4. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA DERECHA

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
4.1 Diferencia de altura $-6 < x \leq -4$	7	0,9
4.2 Diferencia de altura $-4 < x \leq -2$	31	3,8
4.3 Diferencia de altura $-2 < x \leq 0$	666	81,6
4.4 Diferencia de altura $0 < x \leq +2$	92	11,3
4.5 Diferencia de altura $+2 < x \leq +4$	17	2,1
4.6 Diferencia de altura $+4 < x \leq +6$	3	0,4
TOTAL	816	100,0



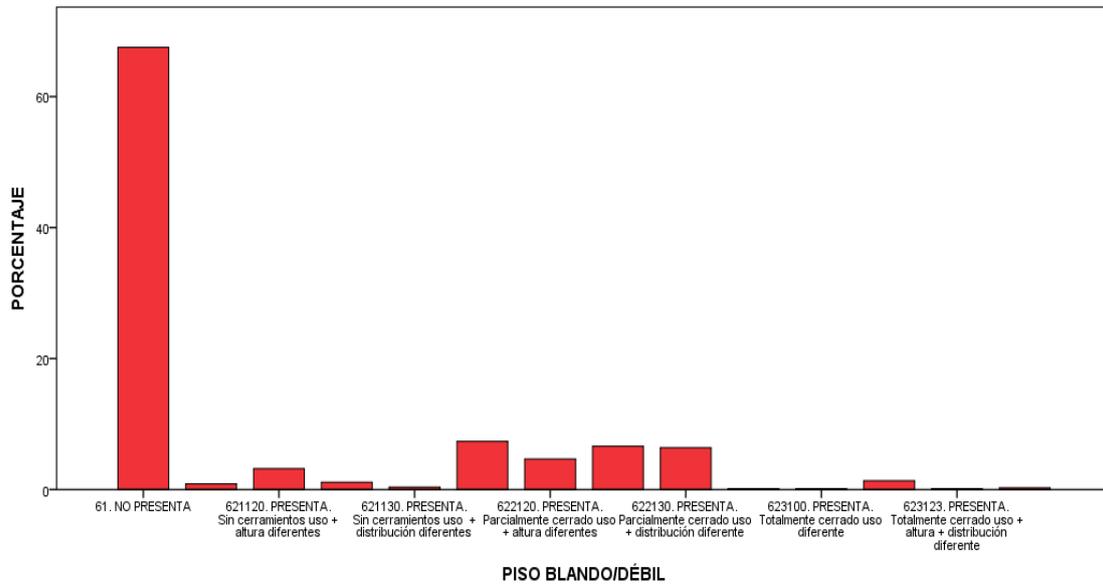
5. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA IZQUIERDA

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
5.1 Diferencia de altura $-6 < x \leq -4$	2	0,2
5.2 Diferencia de altura $-4 < x \leq -2$	31	3,8
5.3 Diferencia de altura $-2 < x \leq 0$	679	83,2
5.4 Diferencia de altura $0 < x \leq +2$	88	10,8
5.5 Diferencia de altura $+2 < x \leq +4$	15	1,8
5.6 Diferencia de altura $+4 < x \leq +6$	1	0,1
TOTAL	816	100,0



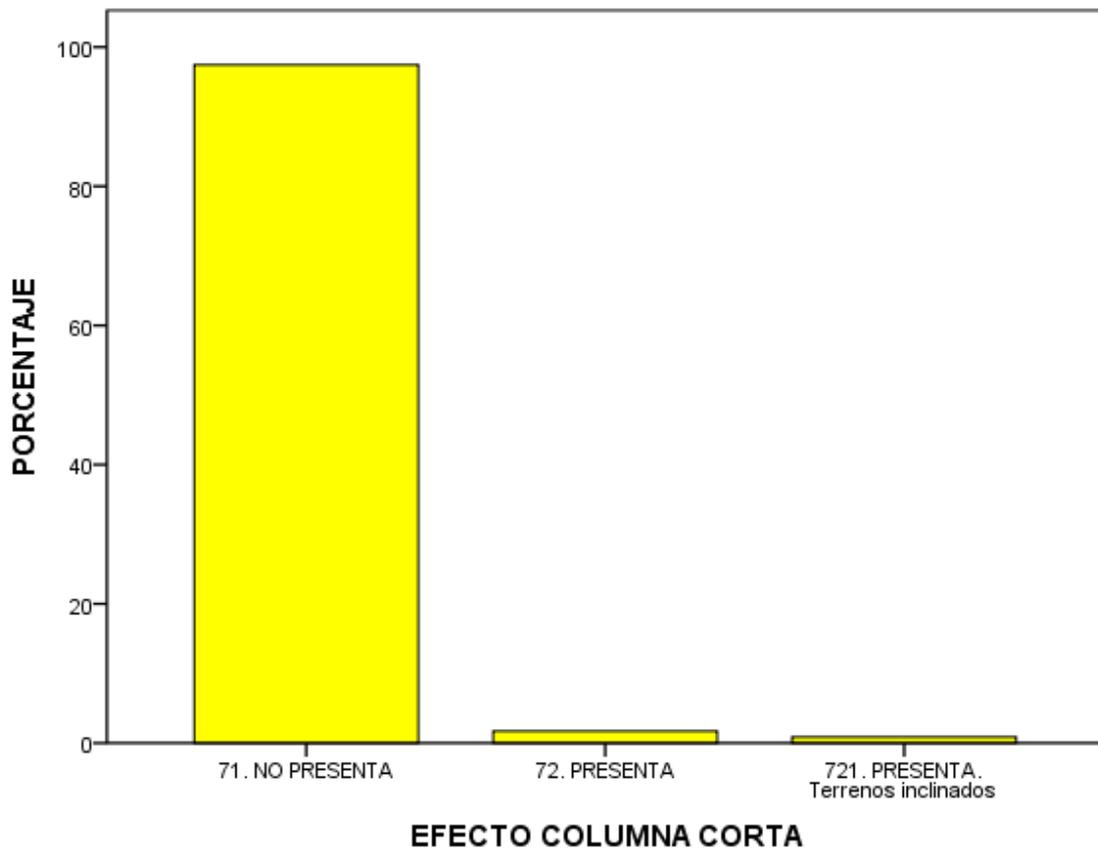
6. PISO BLANDO/FLEXIBLE

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
61. NO PRESENTA	551	67,5
621100. PRESENTA. Sin cerramientos uso diferente	7	,9
621120. PRESENTA. Sin cerramientos uso + altura diferente	26	3,2
621123. PRESENTA. Sin cerramientos uso + altura + distribución diferente	9	1,1
621130. PRESENTA. Sin cerramientos uso + distribución diferente	3	,4
622100. PRESENTA. Parcialmente cerrado uso diferente	60	7,4
622120. PRESENTA. Parcialmente cerrado uso + altura diferente	38	4,7
622123. PRESENTA. Parcialmente cerrado uso + altura+distribución diferente	54	6,6
622130. PRESENTA. Parcialmente cerrado uso + distribución diferente	52	6,4
622200. PRESENTA. Parcialmente cerrado altura diferente	1	,1
623100. PRESENTA. Totalmente cerrado uso diferente	1	,1
623120. PRESENTA. Totalmente cerrado uso + altura diferente	11	1,3
623123. PRESENTA. Totalmente cerrado uso + altura + distribución diferente	1	,1
623200. PRESENTA. Totalmente cerrado altura diferente	2	,2
TOTAL	816	100,0



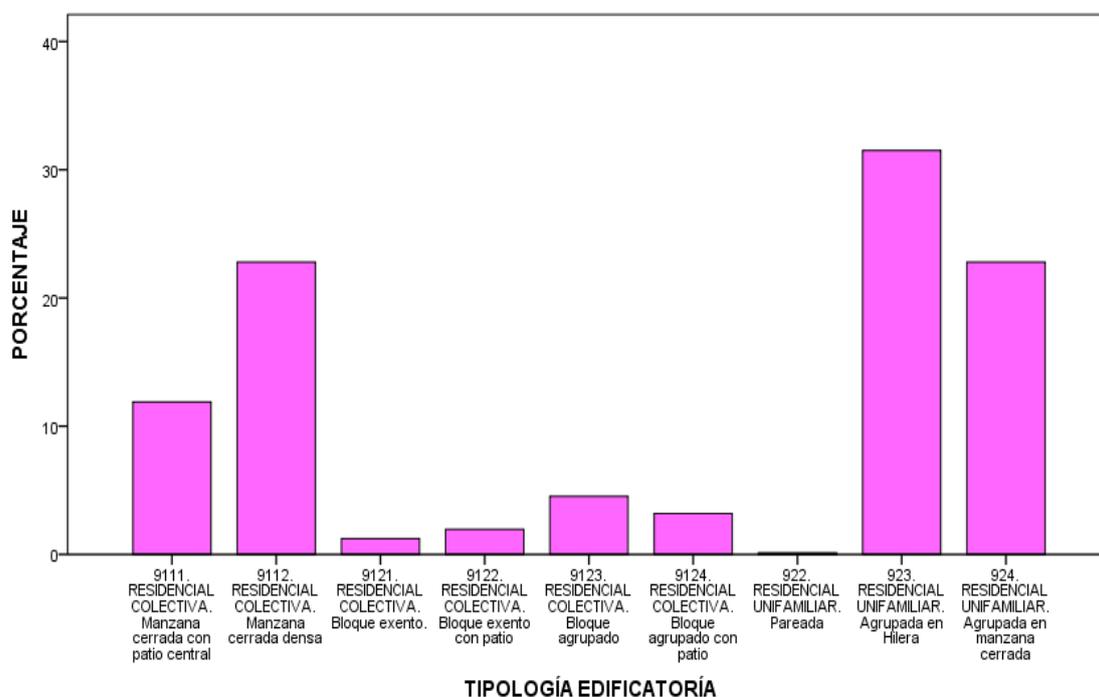
7. EFECTO COLUMNA CORTA

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
71. NO PRESENTA	795	97,4
72. PRESENTA	14	1,7
721. PRESENTA. Terrenos inclinados	7	,9
TOTAL	816	100,0



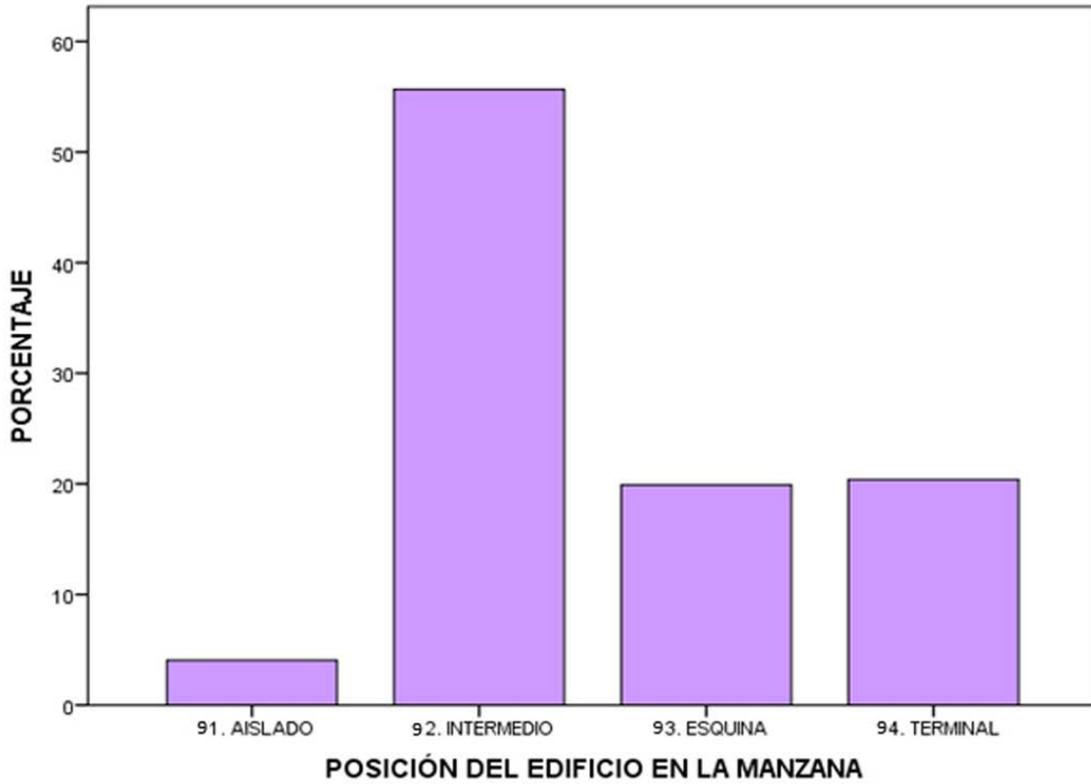
8. TIPOLOGÍA EDIFICATORIA

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
9111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central	97	11,9
9112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	186	22,8
9121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque exento.	10	1,2
9122. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque exento con patio	16	2,0
9123. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque agrupado	37	4,5
9124. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque agrupado con patio	26	3,2
922. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Pareada	1	,1
923. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hilera	257	31,5
924. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	186	22,8
TOTAL	816	100,0



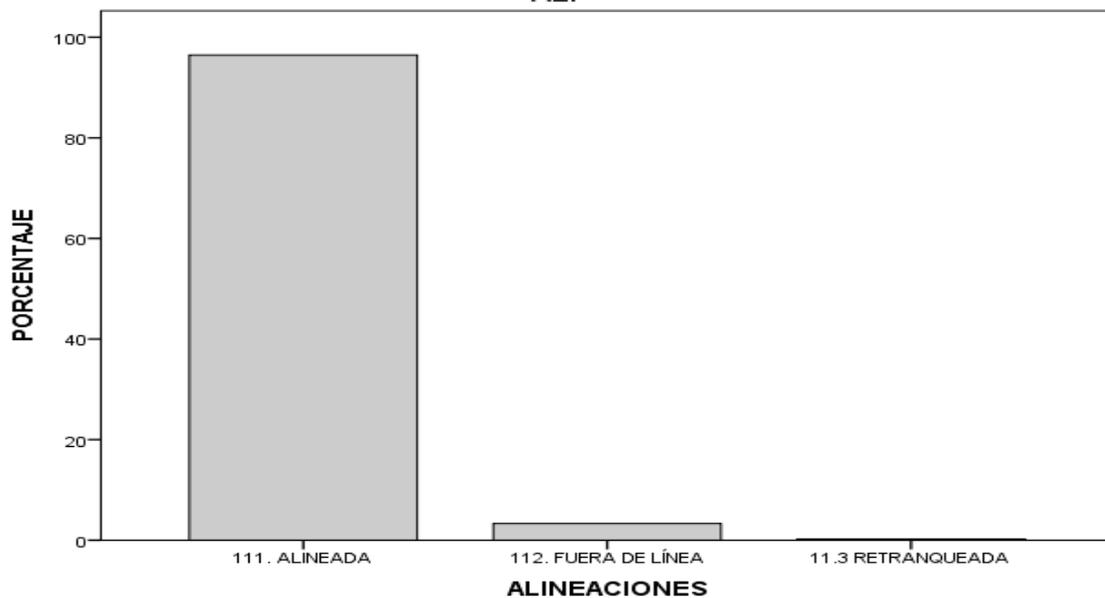
9. POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
91. AISLADO	33	4,0
92. INTERMEDIO	453	55,5
93. ESQUINA	162	19,9
94. TERMINAL	166	20,3
TOTAL	814	99,8



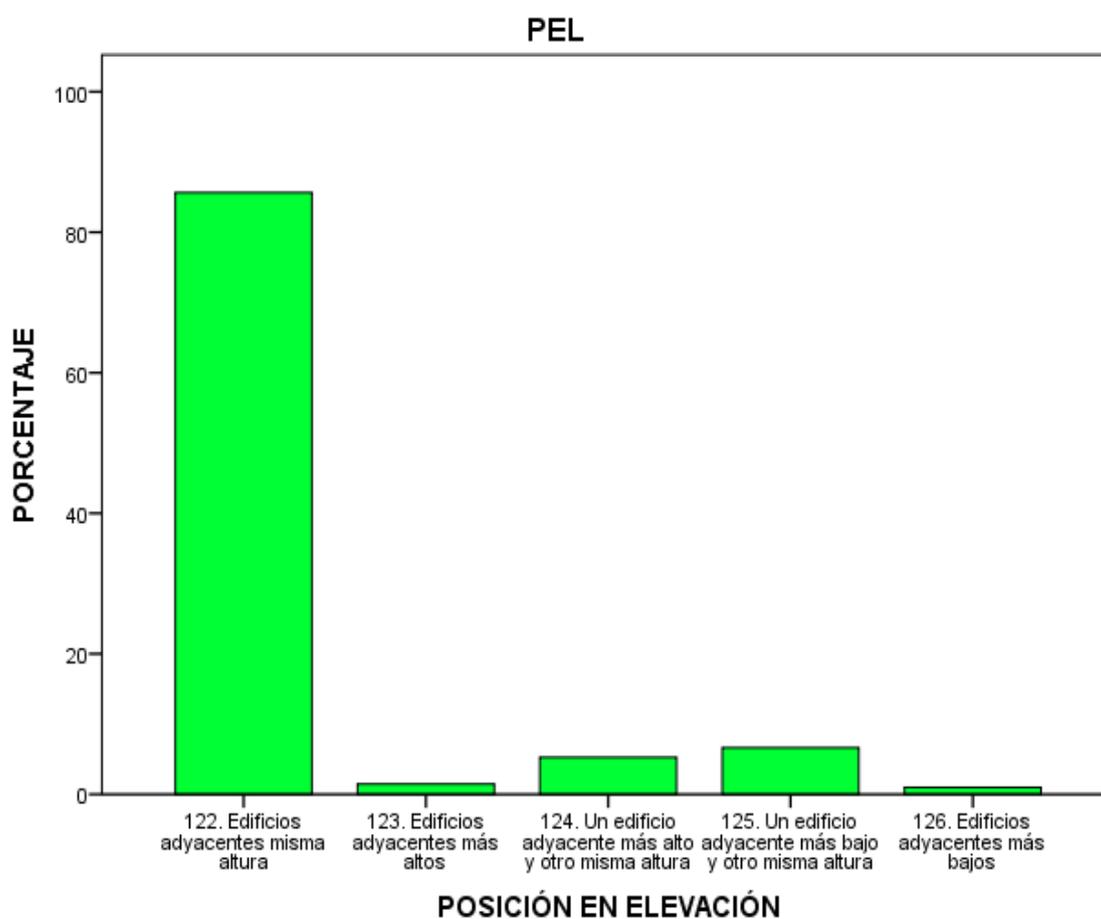
10. ALINEACIÓN

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
111. ALINEADA	787	96,4
112. FUERA DE LÍNEA	27	3,3
11.3 RETRANQUEADA	2	,2
Total	816	100,0



11. POSICIÓN EN ELEVACIÓN

Niveles	Frecuencia	Porcentaje
122. Edificios adyacentes misma altura	699	85,7
123. Edificios adyacentes más altos	12	1,5
124. Un edificio adyacente más alto y otro misma altura	43	5,3
125. Un edificio adyacente más bajo y otro misma altura	54	6,6
126. Edificios adyacentes más bajos	8	1,0
TOTAL	816	100,0



ANEXO III

Cartografía de la distribución espacial de los niveles de los parámetros urbanísticos en las zonas de estudio

FIGURA 1

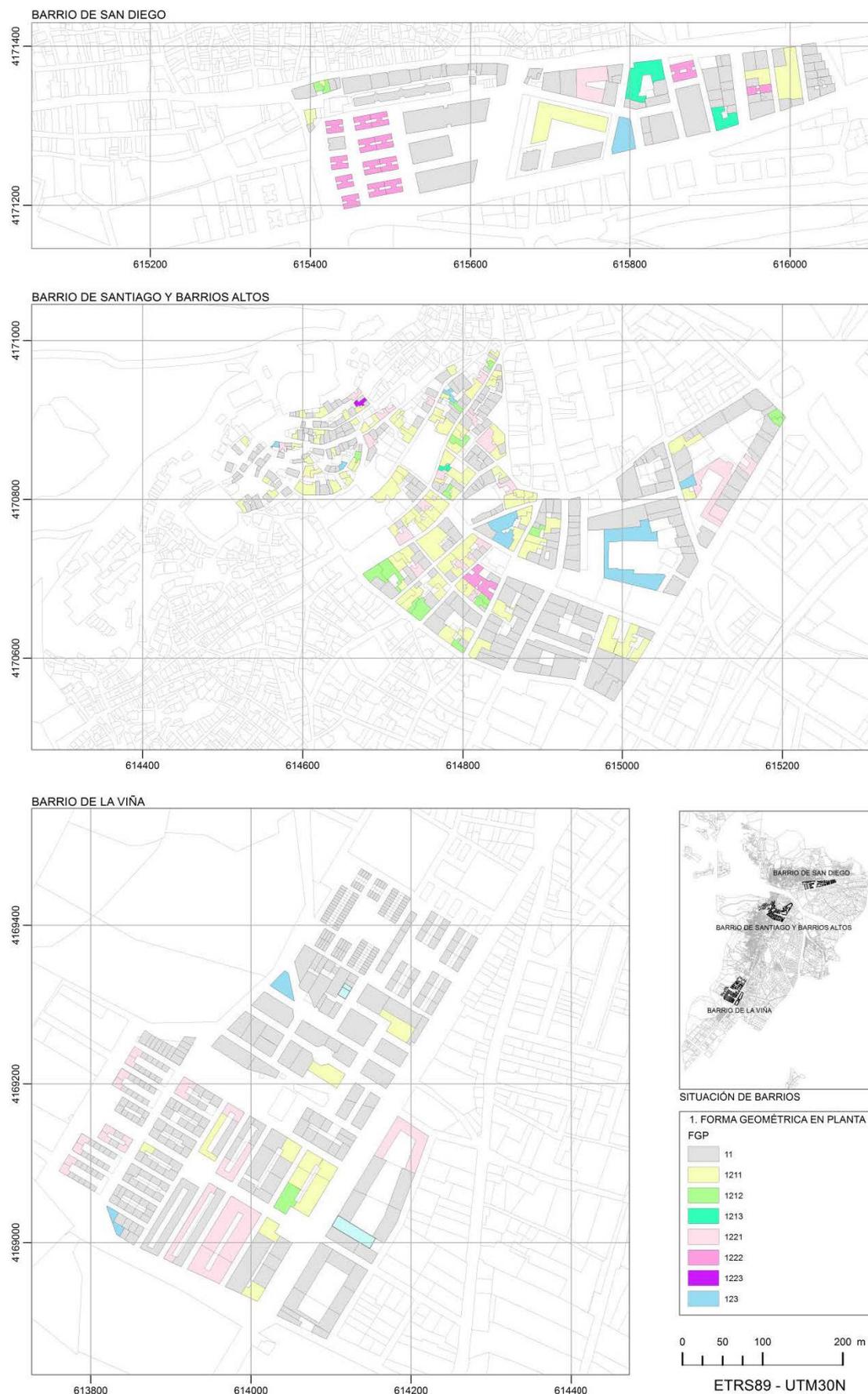


FIGURA 2



FIGURA 3



FIGURA 4

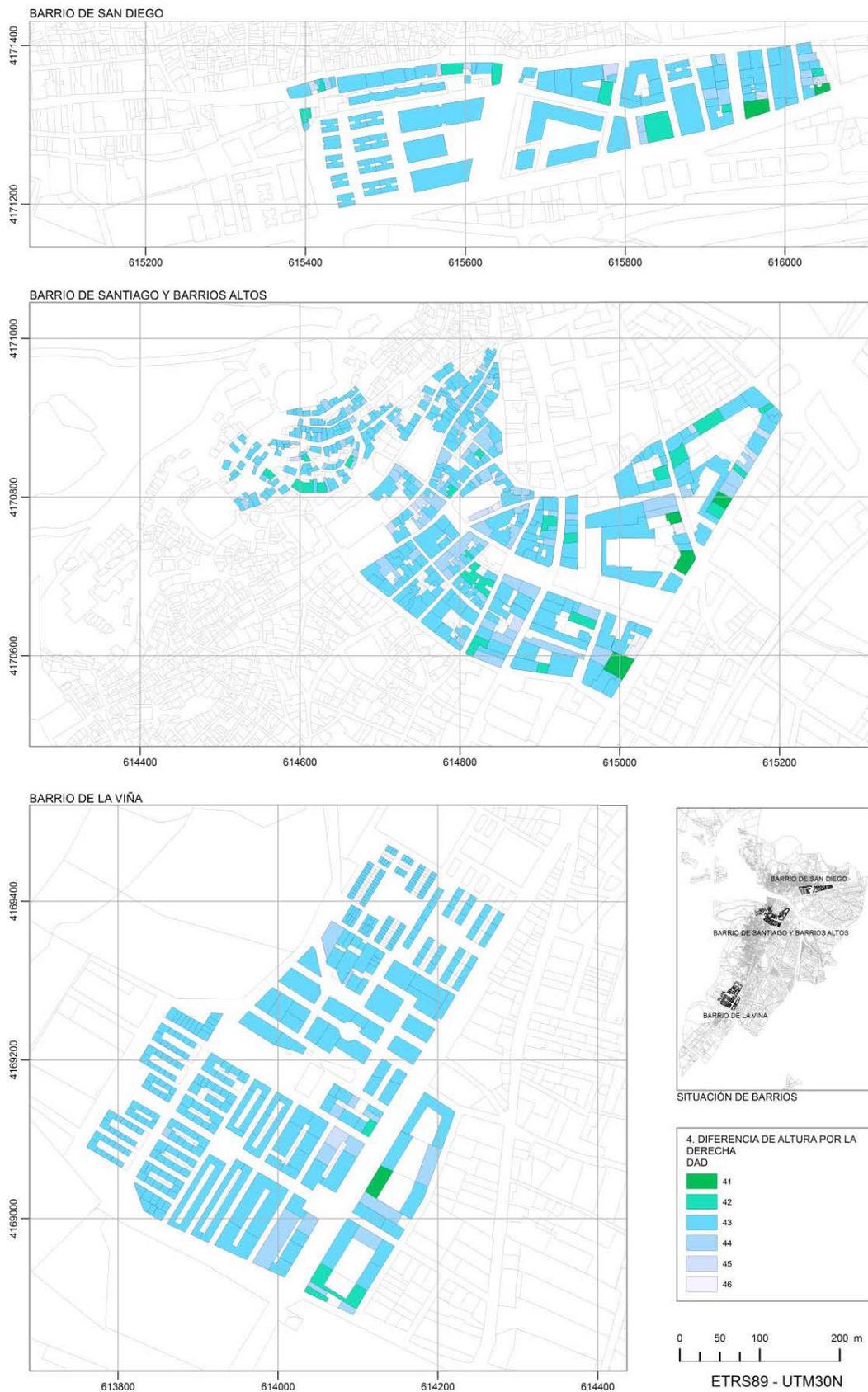


FIGURA 5

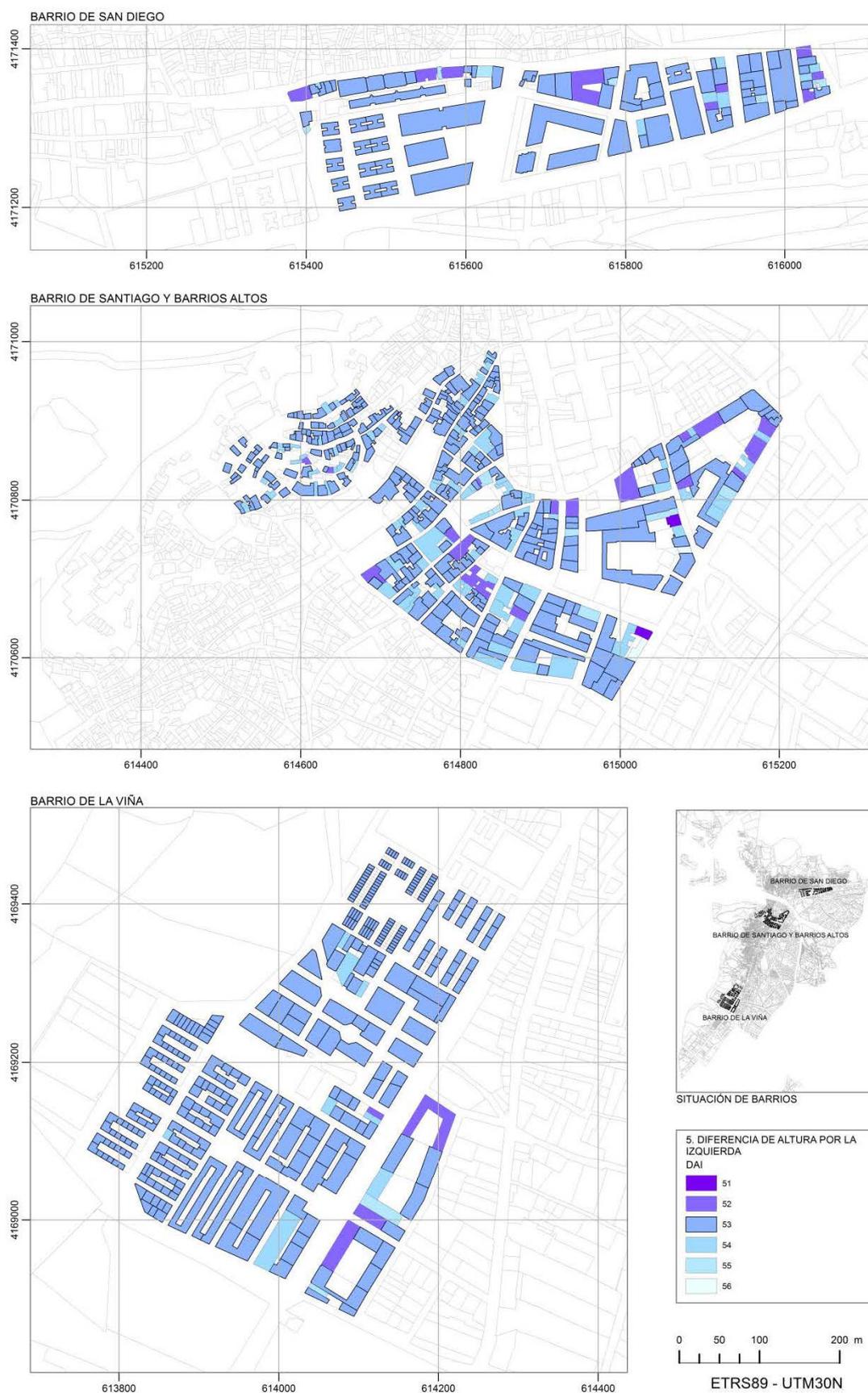


FIGURA 6



FIGURA 7

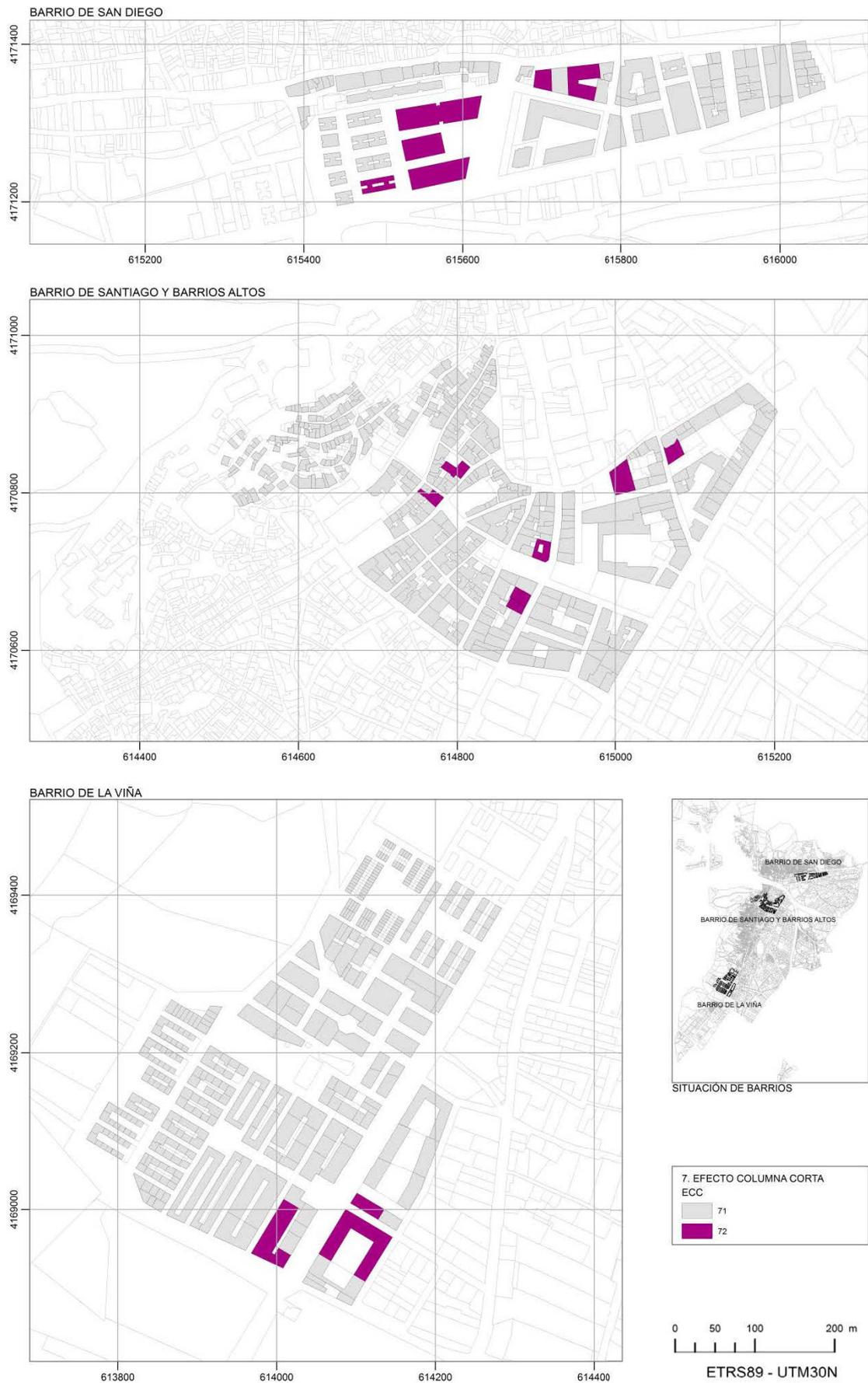


FIGURA 8



FIGURA 9

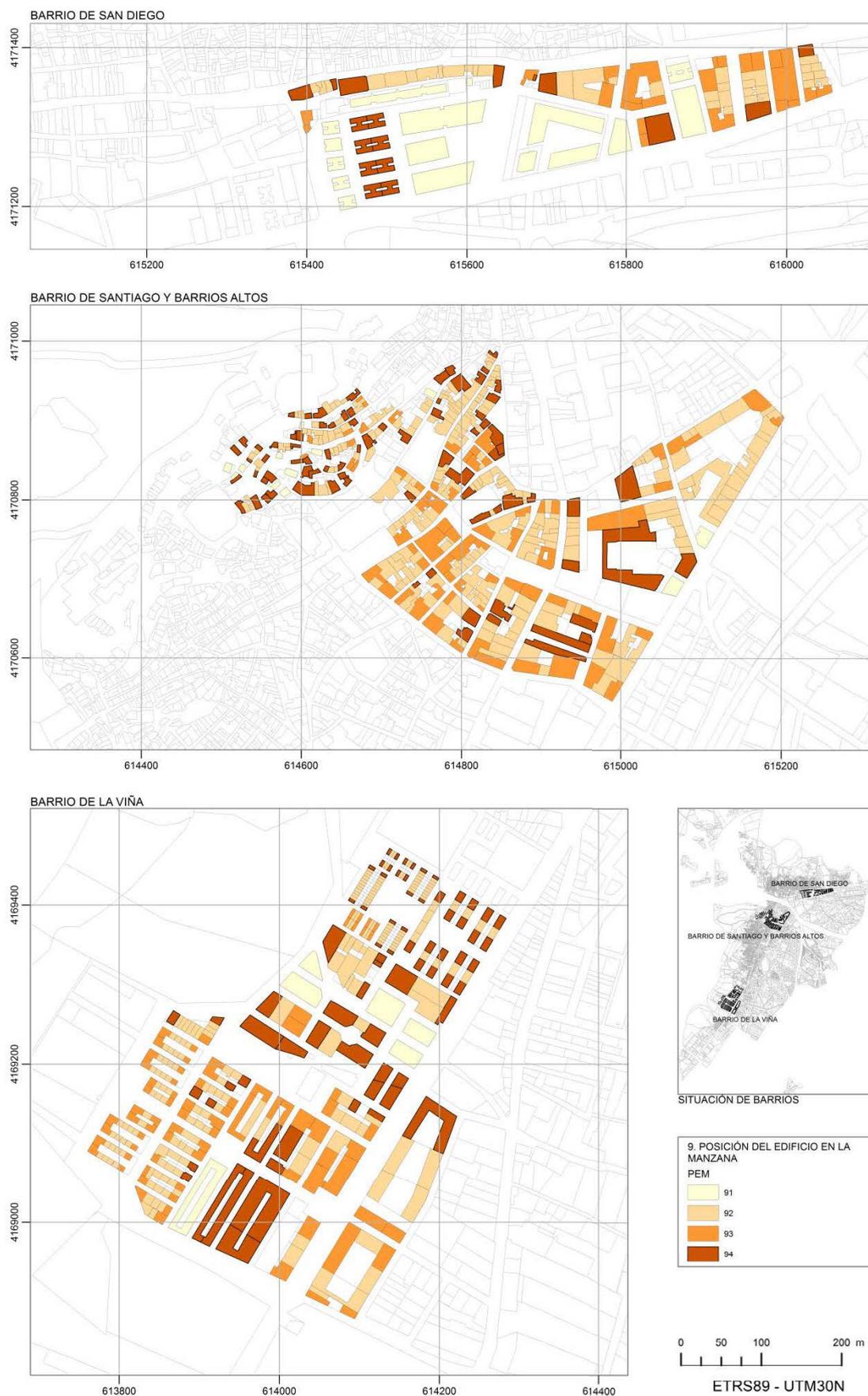


FIGURA 10

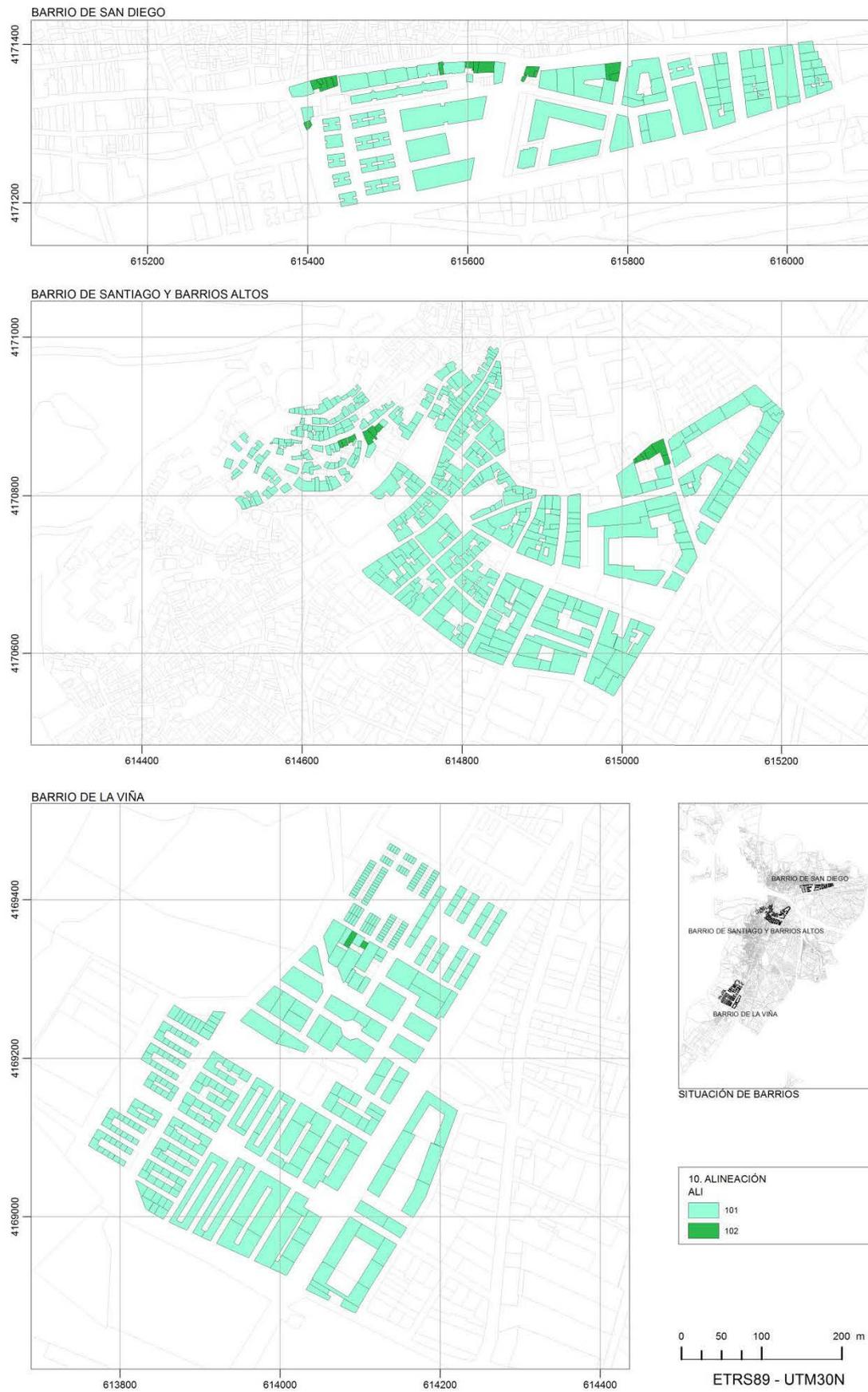


FIGURA 11

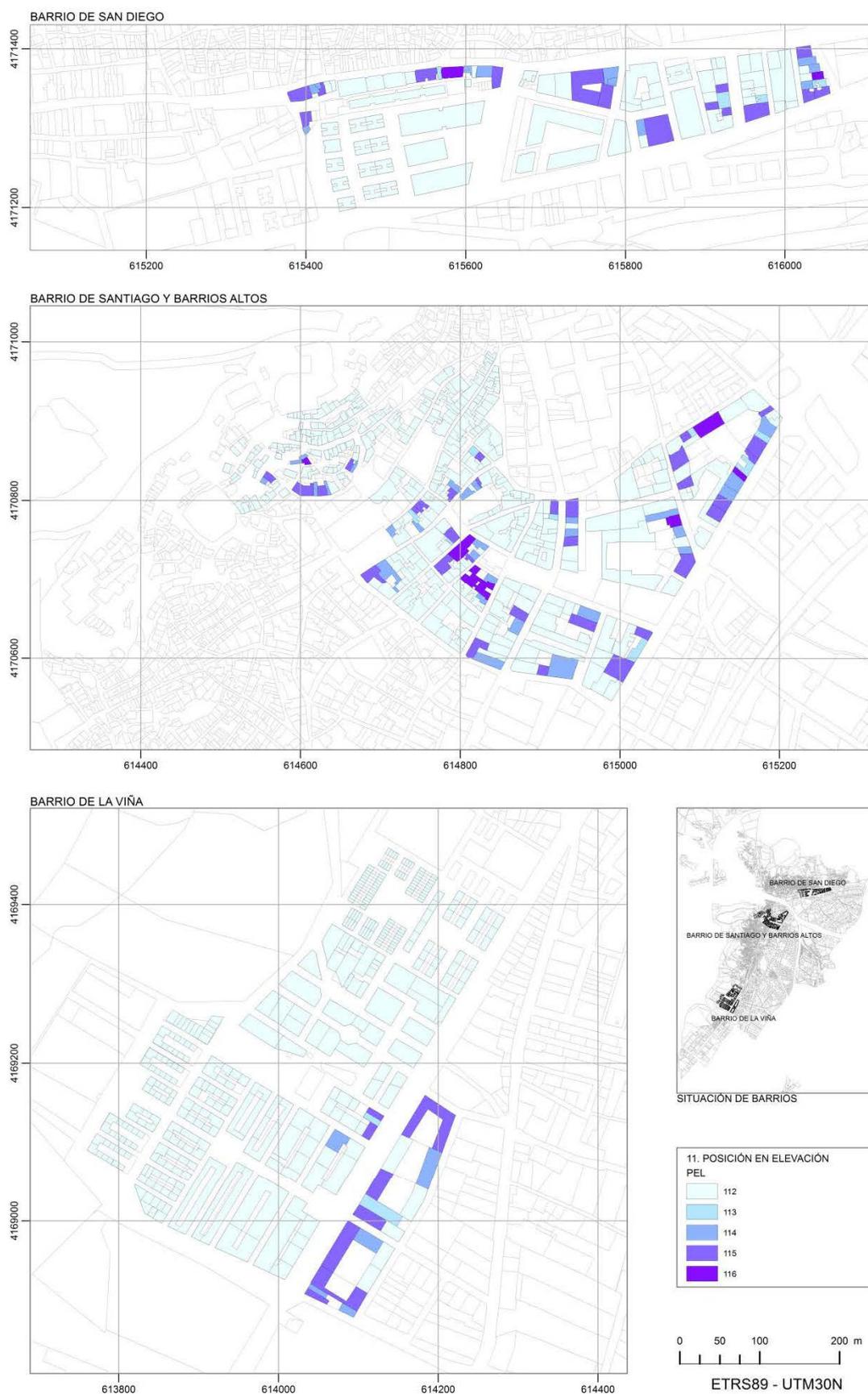


FIGURA 12

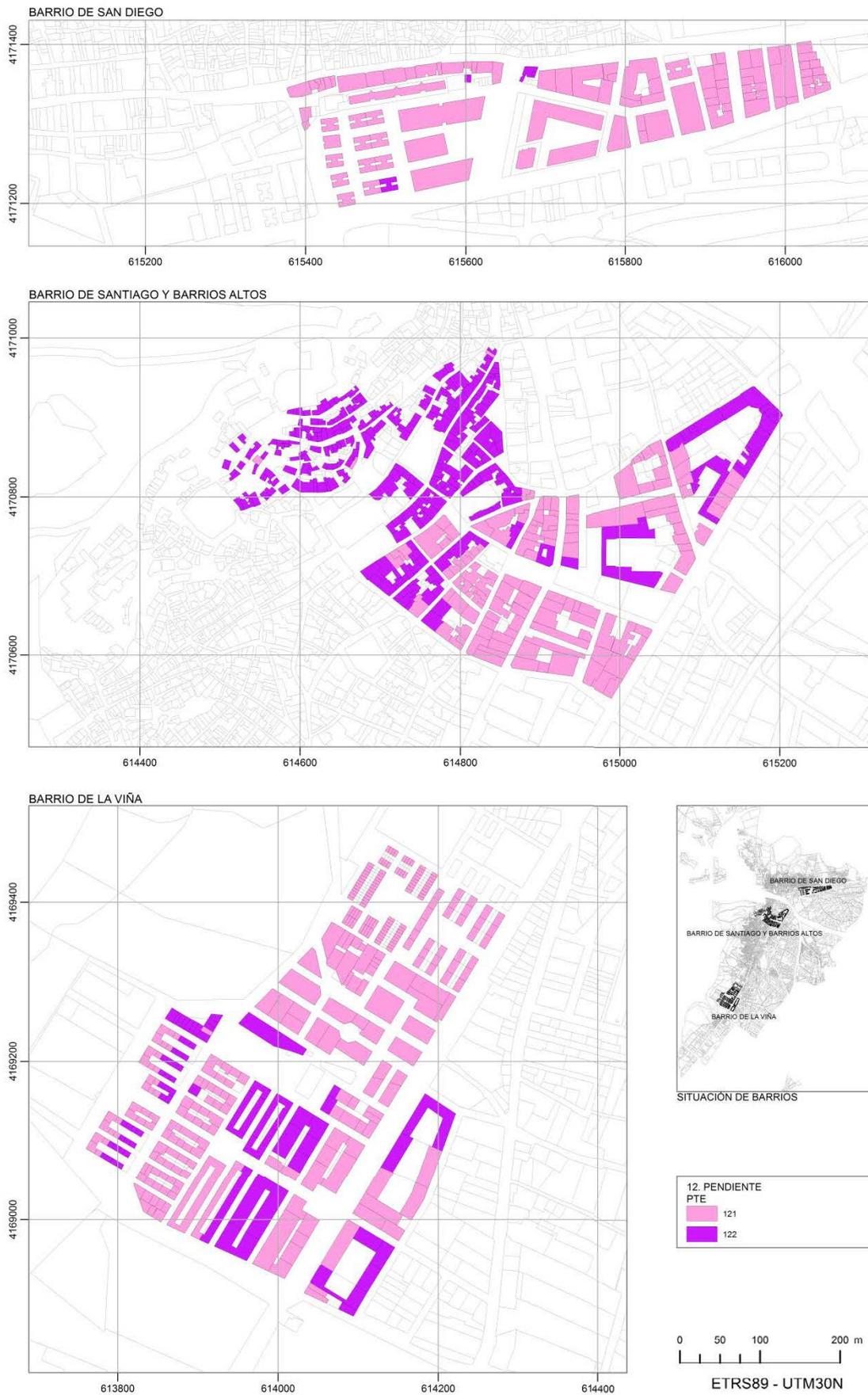


FIGURA 13



ANEXO IV

Cartografía de la distribución espacial de los niveles de los parámetros urbanísticos objeto del estudio estadístico

FIGURA 1

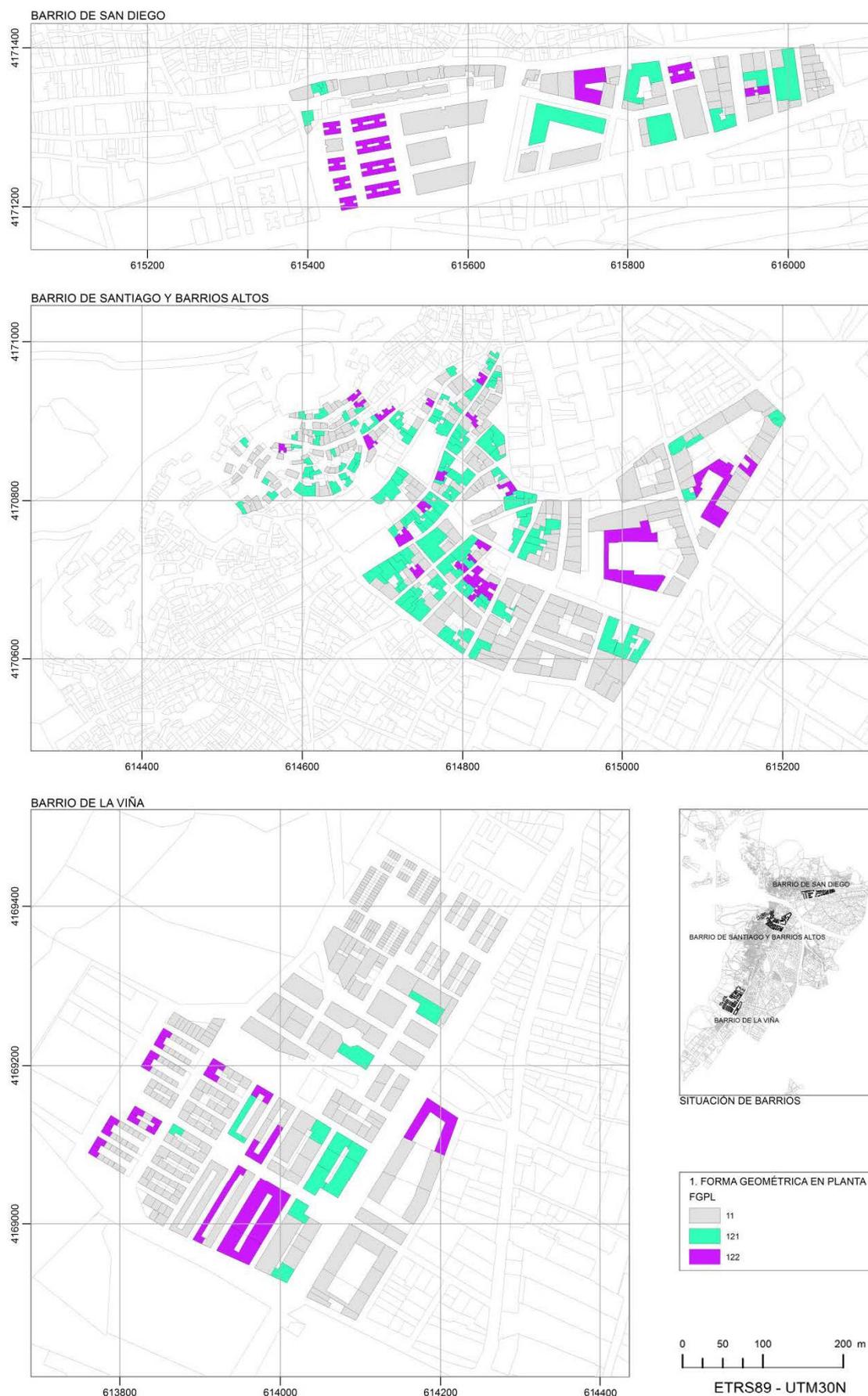


FIGURA 2



FIGURA 3



FIGURA 4



FIGURA 5

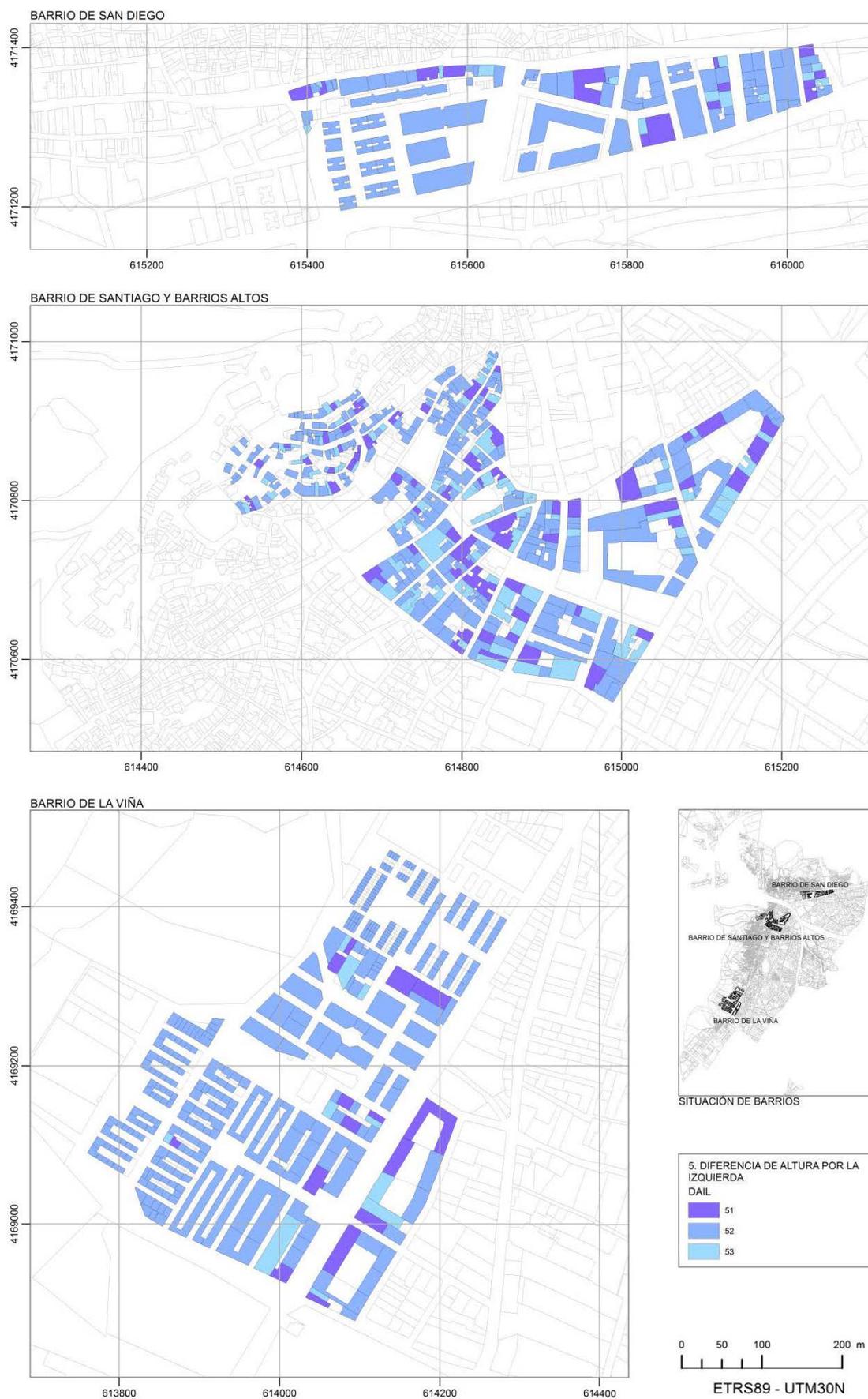


FIGURA 6



FIGURA 7

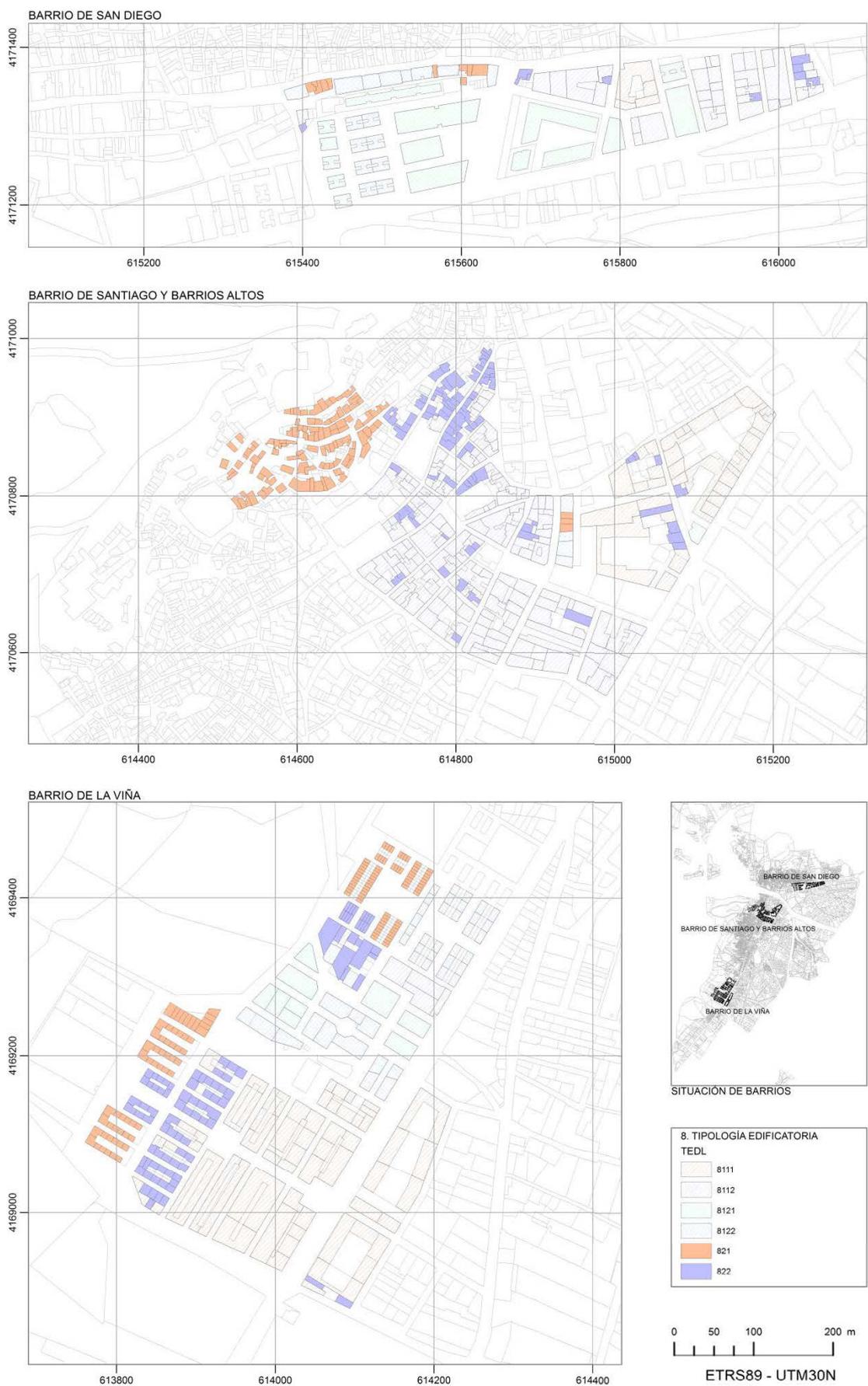
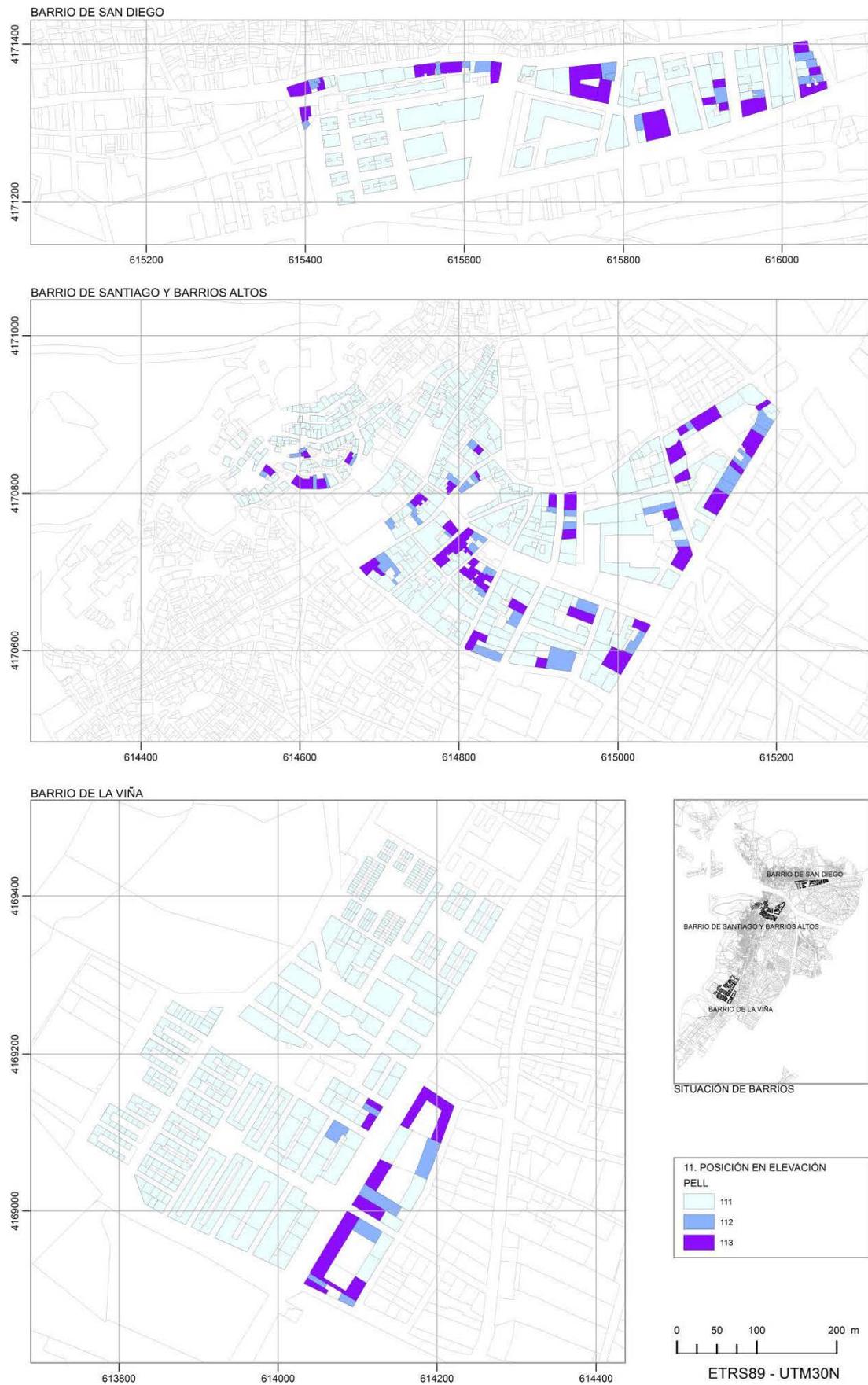


FIGURA 8



ANEXO V

Tabla con índice de discriminación y probabilidad de los niveles de los parámetros urbanísticos objeto de estudio con los distintos tipos de daño (blanco, verde, amarillo, rojo y negro). Tipo de suelo B.

PARÁMETROS	DAÑO							
	BLANCO		VERDE		AMARILLO		ROJO	
	i	p	i	p	i	p	i	p
PARÁMETROS URBANÍSTICOS								
1. FORMA GEOMÉTRICA EN PLANTA								
FGP_1 11. REGULAR	0.100	55%	-0,006	50%	-0,182	41%	0,045	52%
FGP_2 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores.	-0.058	47%	0,019	51%	0,117	56%	-0,063	47%
FGP_3 122. IRREGULAR. Entrantes interiores.	-0.038	48%	-0,009	50%	0,056	53%	0,022	51%
2. FORMA GEOMÉTRICA EN ALZADO								
FGA_1 21. REGULAR.	0.410	71%	-0,388	31%	-0,351	32%	-0,210	40%
FGA_2 22100. IRREGULAR. Voladizos cerrados.	-0.043	48%	0,165	58%	0,001	50%	-0,031	48%
FGA_3 22200. IRREGULAR. Voladizos abiertos.	0.001	50%	-0,052	47%	0,050	53%	-0,046	48%
FGA_4 22300. IRREGULAR. Entrantes y salientes	-0.362	32%	0,282	64%	0,280	64%	0,295	65%
3. EFECTO GOLPETEO								
EFG_1 31. NO PRESENTA	0.105	55%	-0,072	46%	-0,025	49%	-0,237	38%
EFG_2 3210. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos un lado	-0.068	47%	0,006	50%	0,017	51%	0,189	59%
EFG_3 3230. PRESENTA. Diferentes alturas entrepisos dos lados	-0.038	48%	0,066	53%	0,008	50%	0,048	52%
4. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA IZQUIERDA								
DAD_1 4.2 Diferencia de altura $x \leq -1$	-0.038	48%	0,127	56%	0,019	51%	-0,041	48%
DAD_2 4.3 Misma altura por la derecha	0.018	51%	-0,131	43%	0,046	52%	-0,025	49%
DAD_3 4.5 Diferencia de altura $X \geq +1$	0.020	51%	0,004	50%	-0,065	47%	0,066	53%
5. DIFERENCIA DE ALTURA POR LA DERECHA								
DAI_1 5.2 Diferencia de altura $x \leq -1$	-0.097	45%	0,089	54%	0,051	53%	0,123	56%
DAI_2 5.3 Misma altura por la izquierda	0.074	54%	-0,048	48%	-0,013	49%	-0,172	41%
DAI_3 5.5 Diferencia de altura $X \geq +1$	0.022	51%	-0,040	48%	-0,038	48%	0,049	52%
6. PISO BLANDO/DÉBIL								
PBD_1 61. NO PRESENTA	0.426	71%	-0,483	26%	-0,379	31%	-0,124	44%
PBD_2 621. PRESENTA. Sin cerramientos	-0.027	49%	0,065	53%	0,007	50%	0,009	50%

PBD_3 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado	-0.398	30%	0,418	71%	0,373	69%	0,115	56%
7. EFECTO COLUMNA CORTA								
EFG_1 71. NO PRESENTA	0.042	52%	0,022	51%	-0,019	49%	-0,094	45%
EFG_2 72. PRESENTA	-0.042	48%	-0,022	49%	0,019	51%	0,094	55%
9. TIPOLOGÍA EDIFICATORIA								
TED_1 9111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada con patio central	-0.245	38%	0,002	50%	0,248	62%	0,266	63%
TED_2 9112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	-0.079	46%	0,225	61%	-0,043	48%	0,118	56%
TED_3 9121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto exento	-0.028	49%	0,031	52%	0,043	52%	0,026	51%
TED_4 9123. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto agrupado	-0.167	42%	0,298	65%	0,151	58%	-0,069	47%
TED_5 923. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hilera	0.460	73%	-0,372	31%	-0,346	33%	-0,398	30%
TED_6 924. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	0.057	53%	-0,181	41%	-0,051	47%	0,111	56%
10. POSICIÓN DEL EDIFICIO EN LA MANZANA								
PEM_1 101. Aislado	-0.013	49%	-0,009	50%	0,044	52%	-0,038	48%
PEM_2 102. Intermedio	0.186	59%	-0,113	44%	-0,197	40%	-0,071	46%
PEM_3 103. Esquina	-0.041	48%	0,048	52%	-0,011	49%	0,083	54%
PEM_4 104. Terminal	-0.120	44%	0,079	54%	0,155	58%	0,001	50%
11. ALINEACIONES								
ALI_1 111. Alineada	-0.042	48%	0,017	51%	-0,036	48%	0,046	52%
ALI_2 112. No Alineada	0.042	52%	-0,017	49%	0,036	52%	-0,046	48%
12. POSICIÓN EN ELEVACIÓN								
PEL_1 122. Edificios adyacentes misma altura	0.086	54%	-0,109	45%	-0,056	47%	-0,057	47%
PEL_2 123. Algún edificio adyacente más alto	-0.026	49%	-0,005	50%	0,018	51%	0,055	53%
PEL_3 125. Algún edificio adyacente más bajo	-0.060	47%	0,114	56%	0,038	52%	0,002	50%
13. MORFOLOGÍA DEL TERRENO								
131. Pendiente < 10%	-0.121	44%	-0,030	48%	0,209	60%	-0,018	49%
132. Pendiente > 10%	0.121	56%	0,030	52%	-0,209	40%	0,018	51%

14. ALTURA DE LA EDIFICACIÓN								
Altura ≤ 2 plantas	0.548	77%	-0,448	28%	-0,496	25%	-0,297	35%
Altura > 2 plantas	-0.548	23%	0,448	72%	0,496	75%	0,297	65%

Donde:

La primera columna: se encuentra los factores urbanísticos dicotomizados.

i: índice discriminadorio.

p: probabilidades del daño de los factores urbanísticos.

ANEXO VI

Tabla de definición y operacionalización de variables dicotomizadas

DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES		
VARIABLE DEPENDIENTE	CATEGORÍAS	TIPO DE VARIABLE
Daño Caracterización del daño producido en las edificación después un sismo.	1. Sin Daño y Sin daño Estructural (blanco y verde) 2. Daño estructural y colapso (amarillo, rojo y negro)	Ordinal Dicotómica
VARIABLES INDEPENDIENTES O FACTORES DE VULNERABILIDAD SÍSMICA URBANA	CATEGORÍAS	TIPO DE VARIABLE
Forma geométrica en planta Dimensiones y proporciones irregulares en planta de las edificaciones que afectan a la vulnerabilidad sísmica		
FGP_1 11. REGULAR	1. -11. REGULAR 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
FGP_2 121. IRREGULAR. Entrantes exteriores.	1. -121. IRREGULAR entrantes exteriores. 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
FGP_3 122. IRREGULAR. Entrantes interiores.	1. 122. IRREGULAR entrantes interiores. 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
Forma geométrica en alzado Retranqueos en las fachadas de los edificios que afectan a la vulnerabilidad sísmica		
FGA_1 21. REGULAR.	1.-21. REGULAR 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
FGA_2 22100. IRREGULAR. Voladizos cerrados.	1. -22100. IRREGULAR voladizos cerrados 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
FGA_3 22200. IRREGULAR. Voladizos abiertos.	1.-22200. IRREGULAR voladizos abiertos 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
FGA_4 22300. IRREGULAR. Entrantes y salientes	1. 22300. IRREGULAR entrantes y salientes 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
Efecto golpeteo Efecto de golpeteo que se produce entre los entresijos de las edificaciones colindantes		
EFG_1 31. NO PRESENTA	1.-31 NO PRESENTA 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
EFG_2 3210. PRESENTA. Diferentes alturas entresijos un lado	1. -3210 PRESENTA diferentes alturas entresijos un lado 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
EFG_3 3230. PRESENTA. Diferentes alturas entresijos dos lados	1. -3230 PRESENTA diferentes alturas entresijos dos lados 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
Diferencia de altura por la derecha Diferencia de pisos por la derecha		

DAD_1 4.2 Diferencia de altura $x \leq -1$	1. -4.2 Diferencia de altura $x \leq -1$ 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
DAD_2 4.3 Misma altura por la derecha	1. -4.3 Misma altura por la derecha 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
DAD_3 4.5 Diferencia de altura $X \geq +1$	1. -4.5 Diferencia de altura $x \geq +1$ 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
Diferencia de altura por la derecha		
Diferencia de pisos por la izquierda		
DAI_1 5.2 Diferencia de altura $x \leq -1$	1. -5.1 Diferencia de altura $x \leq -1$ 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
DAI_2 5.3 Misma altura por la izquierda	1. -5.2 Misma altura por la izquierda 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
DAI_3 5.5 Diferencia de altura $X \geq +1$	1. -5.5 Diferencia de altura $x \geq +1$ 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
Piso Blando		
Existencia de un nivel o piso de edificio que presenta una rigidez significativa menor que el resto de los pisos de la edificación. Normalmente esto se produce por un uso diferente de la planta, una altura diferente o una distribución diferente		
PBD_1 61. NO PRESENTA	1. -6.1 NO PRESENTA 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
PBD_2 621. PRESENTA. Sin cerramientos	1. -621 PRESENTA sin cerramientos 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
PBD_3 622. PRESENTA. Parcialmente cerrado	1. -622 PRESENTA parcialmente cerrado 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
Efecto columna corta		
El efecto de columna corta se produce debido a una modificación accidental en la configuración estructural original de las columnas de un pórtico. Las columnas cortas propiamente dichas tienen una altura significativamente menor que la mayoría de las columnas del mismo piso de los pisos siguientes.		
Efecto Columna Corta	1. -71 NO PRESENTA 2. -72 PRESENTA	Nominal Dicotómica
Tipología Edificatoria		
Tipología urbana edificatoria de los edificios residenciales multifamiliares y unifamiliares		
TED_1 9111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada	1. -9111. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada	Nominal Dicotómica

con patio central	con patio central	
TED_2 9112. RESIDENCIAL COLECTIVA. Manzana cerrada densa	2. Los demás tipos 1. -9112 RESIDENCIAL COLECTIVA Manzana cerrada densa	Nominal Dicotómica
TED_3 9121. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto exento	2. Los demás tipos 1. -9121 RESIDENCIAL COLECTIVA Bloque abierto exento	Nominal Dicotómica
TED_4 9123. RESIDENCIAL COLECTIVA. Bloque abierto agrupado	2. Los demás tipos 1. -9123. RESIDENCIAL COLECTIVA .Bloque abierto agrupado	Nominal Dicotómica
TED_5 923. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en Hilera	2. Los demás tipos 1. -923. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR agrupada en hilera	Nominal Dicotómica
TED_6 924. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR. Agrupada en manzana cerrada	2. Los demás tipos 1. -924. RESIDENCIAL UNIFAMILIAR agrupada en manzana cerrada	Nominal Dicotómica
Posición del edificio en la manzana		
Posición del edificio dentro de la manzana urbana		
PEM_1 101. Aislado	2. Los demás tipos 1. -101. Aislado	Nominal Dicotómica
PEM_2 102. Intermedio	2. Los demás tipos 1. -102. Intermedio	Nominal Dicotómica
PEM_3 103. Esquina	2. Los demás tipos 1. -103. Esquina	Nominal Dicotómica
PEM_4 104. Terminal	2. Los demás tipos 1. -104. Terminal	Nominal Dicotómica
Alineaciones		
Situación del edificio respecto a su alineación oficial		
Alineación	2. -112 No Alineada 1. -111 Alineado	Nominal Dicotómica
Posición en elevación		
Altura del edificio respecto a sus edificios colindantes		
PEL_1 122. Edificios adyacentes misma altura	2. Los demás tipos 1. -182 Edificios adyacentes misma altura	Nominal Dicotómica
PEL_2 123. Algún edificio adyacente más alto	2. Los demás tipos 1. -183 Algún edificio adyacente más alto	Nominal Dicotómica
PEL_3 125. Algún edificio adyacente más bajo	2. Los demás tipos 1. -185 Algún edificio adyacente más bajo	Nominal Dicotómica

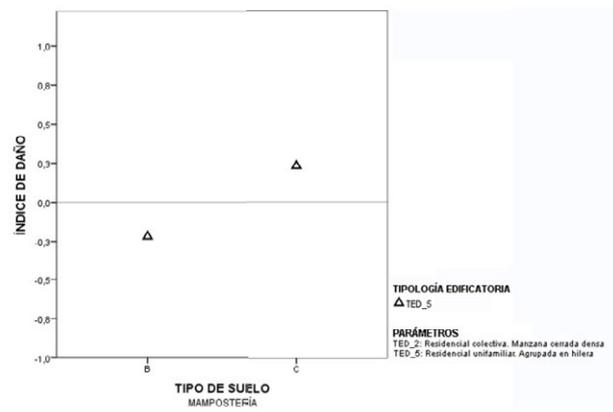
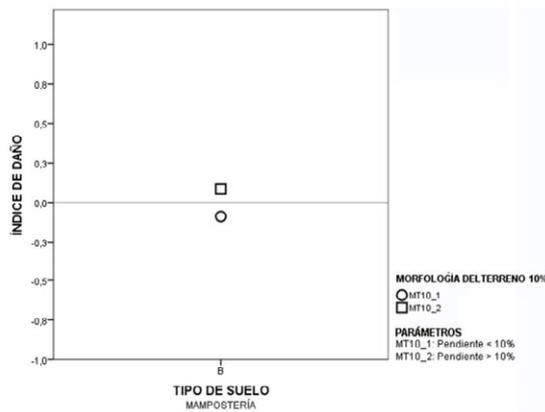
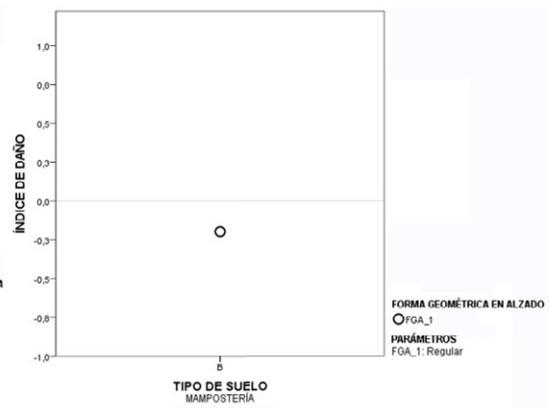
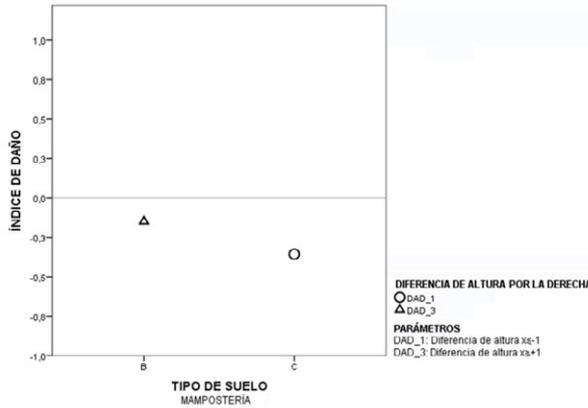
Morfología del terreno		
Pendiente del terreno sobre el que se única el edificio		
Pendiente	1. -201. Pendiente (<10%) 2. -202. Pendiente (>10%)	Nominal Dicotómica
Altura		
Número de pisos que tienen los edificios		
ALT_1 Altura \leq 2	1. -14.1 Altura \leq 2 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
ALT_2 14.2 Altura > 2 pisos y \leq 4 pisos	1. -14.2 Altura > 2 y \leq 4 pisos 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica
ALT_3 Altura >4 plantas	1. -14.3 Altura >4 plantas 2. Los demás tipos	Nominal Dicotómica

ANEXO VII

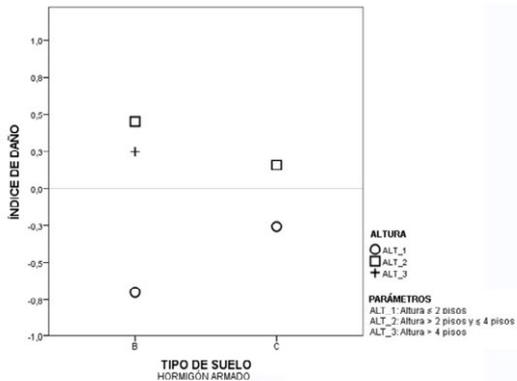
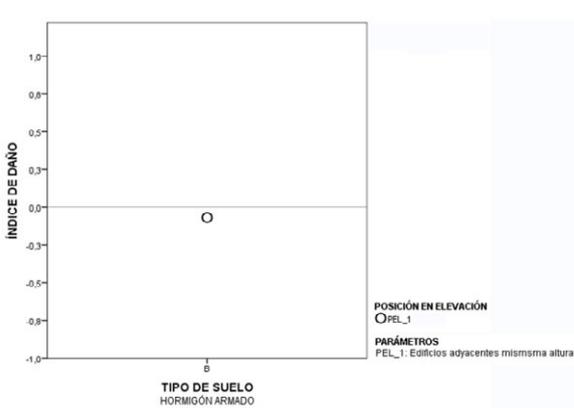
Gráficas de tendencia de cada nivel de los parámetros urbanísticos objeto de estudio según su tipología constructiva y tipo de suelo

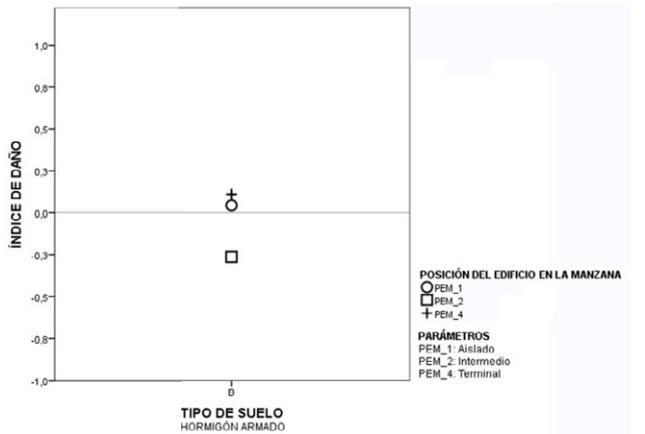
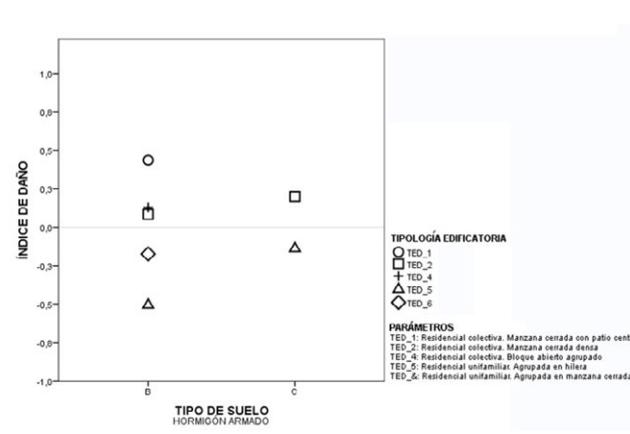
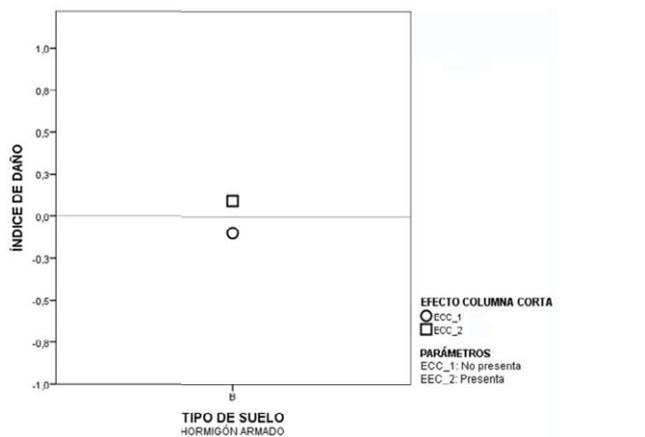
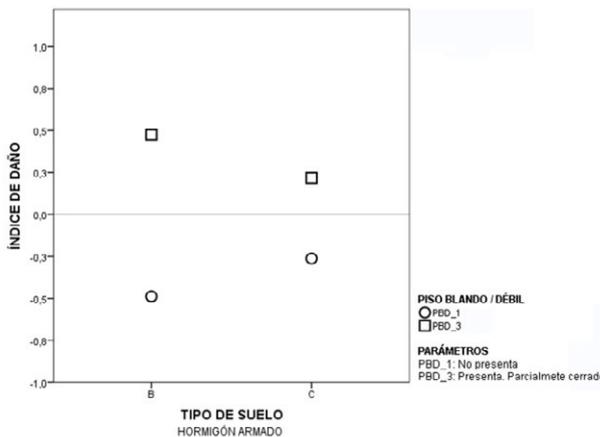
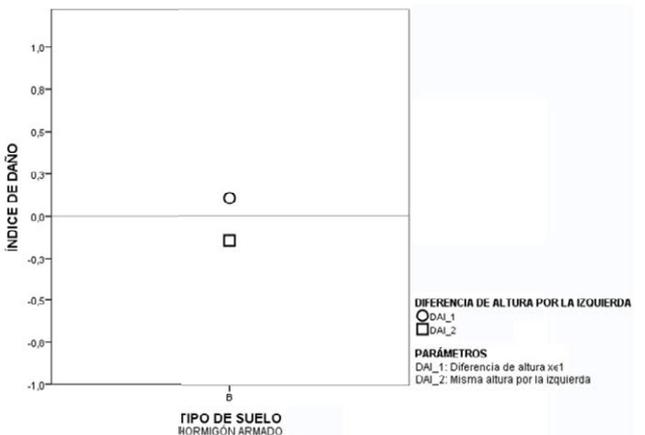
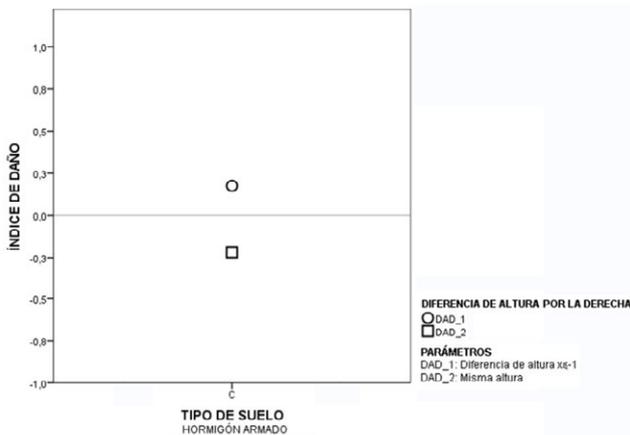
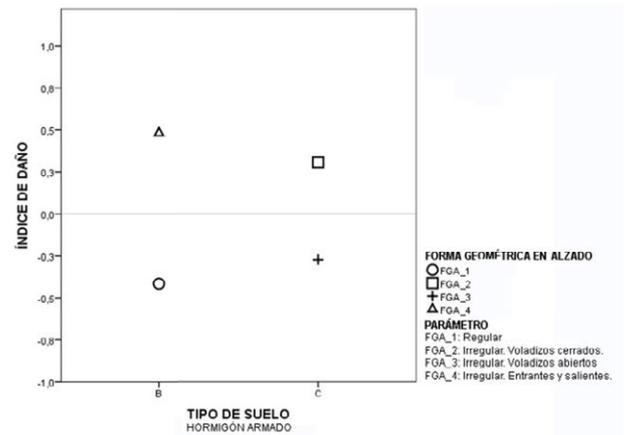
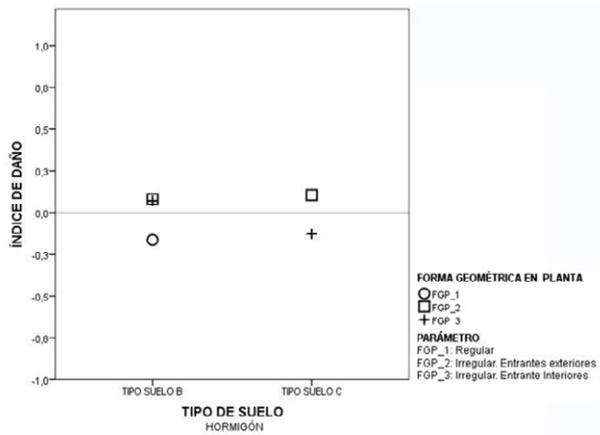
• SEGÚN SU TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVAS

MAMPOSTERÍA



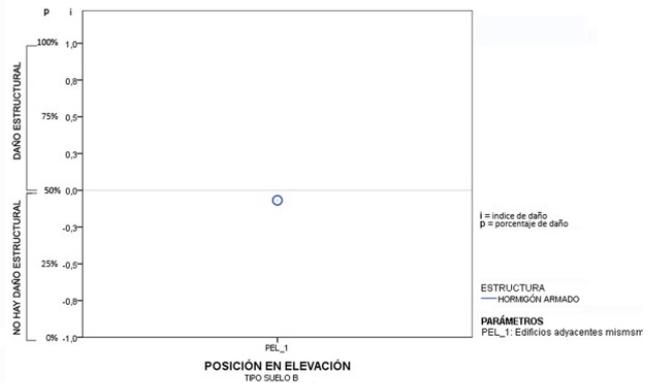
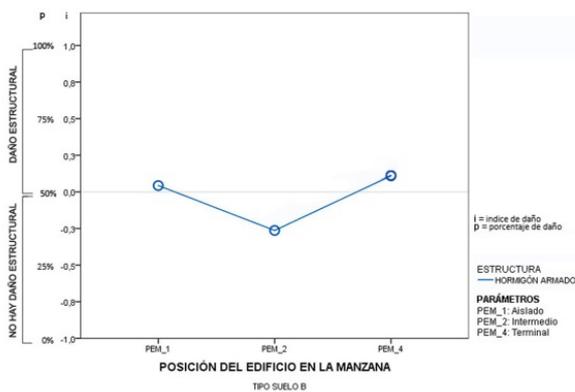
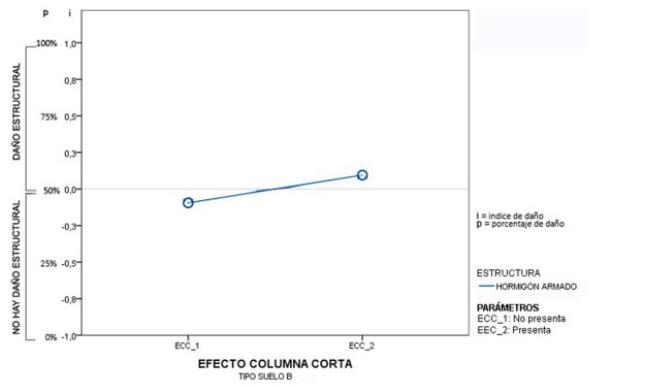
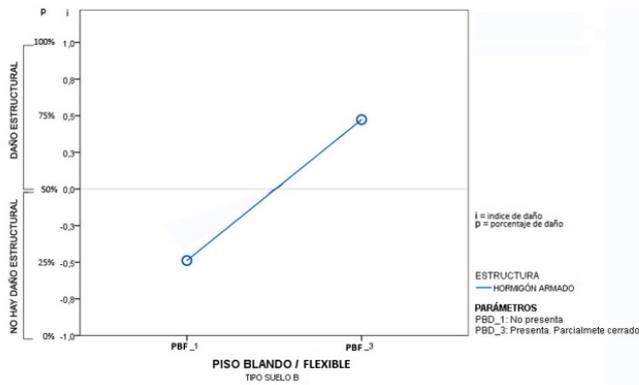
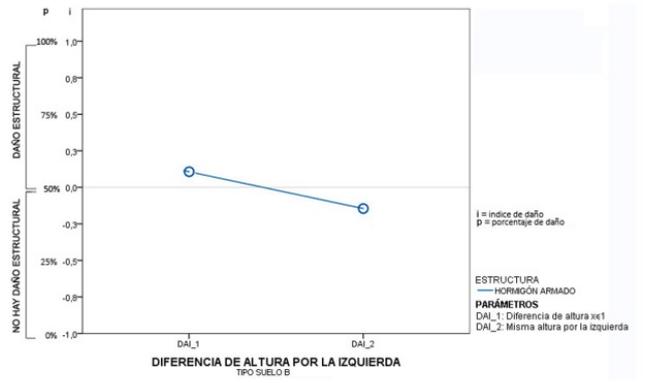
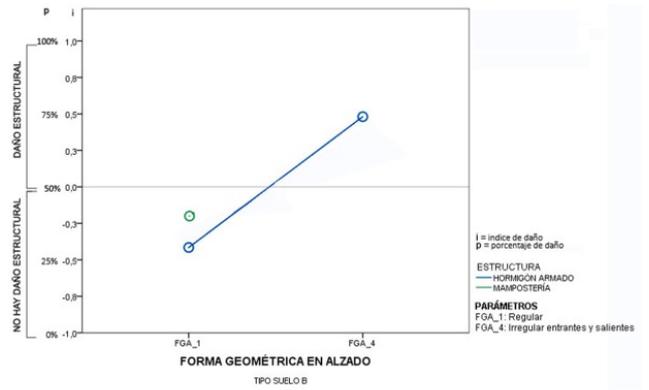
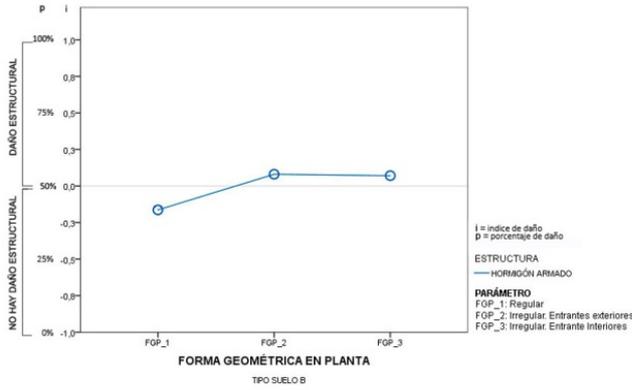
HORMIGÓN ARMADO

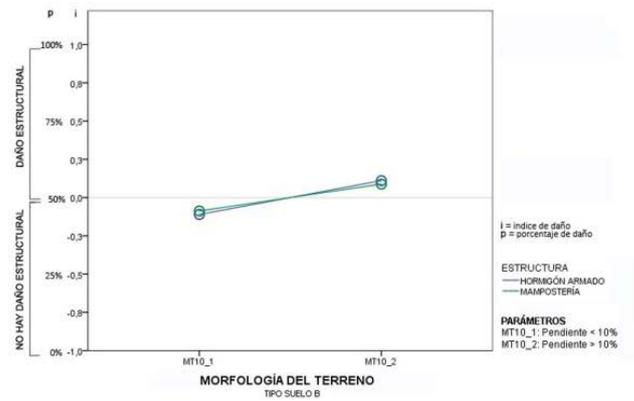
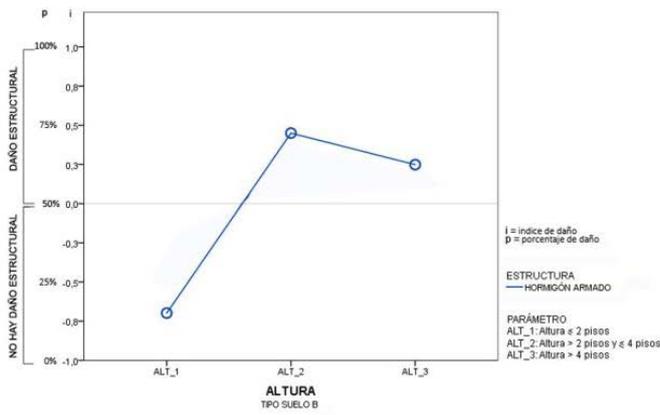




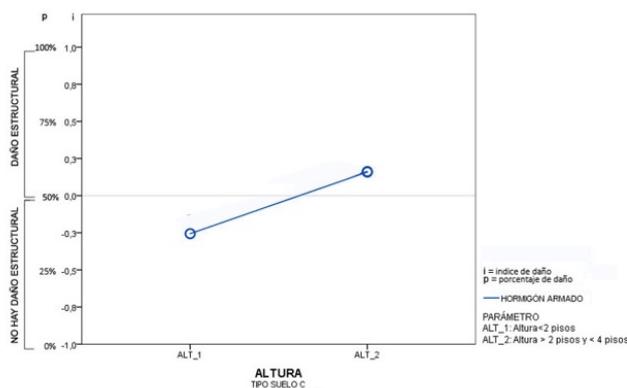
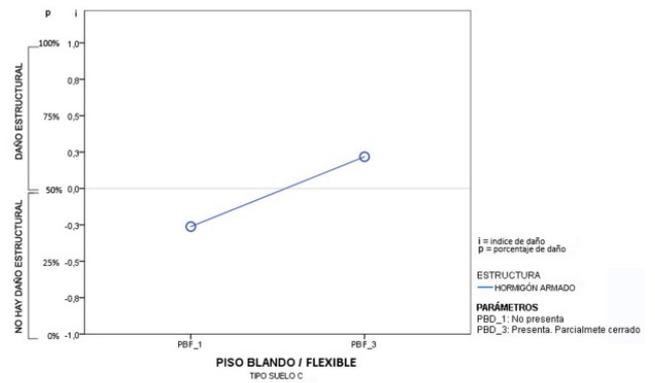
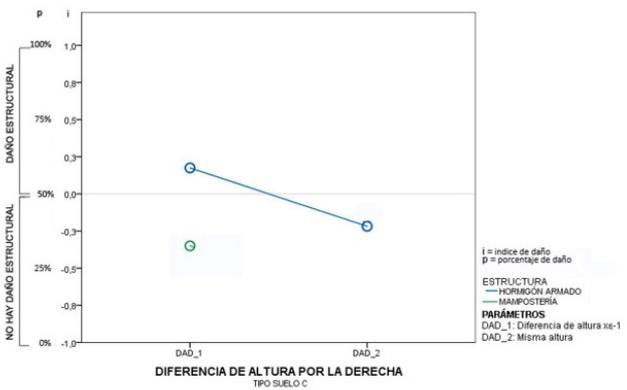
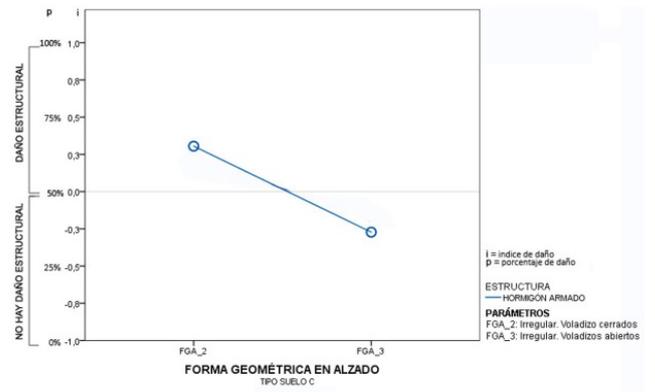
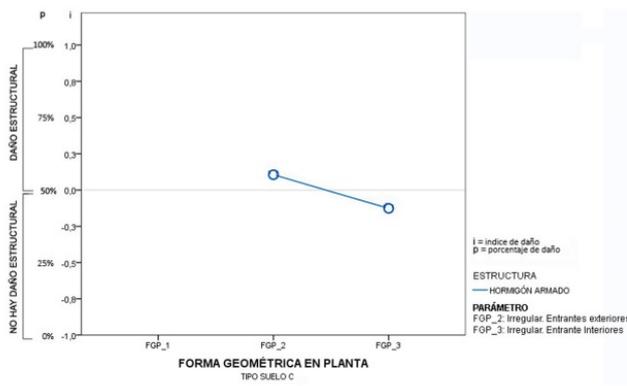
• **SEGÚN EL TIPO DE SUELO**

TIPO DE SUELO B





TIPO DE SUELO C



REFERENCIAS

- Aboelata, M., Bowles, D. S. and McClelland, D. M. (2002).** "GIS Model for Estimating Dam Failure Life Loss". Proceedings of the Tenth Conference risk-based decision making in water resources X, Santa Barbara, CA, United States, American Society of Civil Engineers, 126-145.
- Abrahamczyk, L., Schwarz, J., Langhammer, T., Cemal Genes, C., Bikce, M., Kacin, S. and Gülkan, P. (2013).** "Seismic Risk Assessment and Mitigation in the Antakya-Maras Region (SERAMAR): Empirical Studies on the Basis of EMS-98". Earthquake spectra 29 (3), 683-704pp.
- Alfaro, P., González, M., Brusi, D., López Martín, Juan A., Martínez-Díaz, J.J., García Mayordomo, J., Benito, B., Murphy, P., Najera, A., Villalba, R. and Jódar, F. (2012).** "Lecciones aprendidas del terremoto de Lorca 2011". Enseñanzas de la Tierra (19.3)-245: 123-132pp
- Álvarez Cabal, R., Díaz-Pavón Cuaresma, E. and Rodríguez Escribano, R. (2013).** "El terremoto de Lorca. Efecto en los edificios". Editado por el Consorcio de compensación de seguros. Madrid.
- Angeletti, P., Bellina, A., Guagenti, E., Moretti, A. and Petrini, V. (1988).** "Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results." Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo- Kyoto, Japan, 181- 186.
- ATC-13 (1985).** Earthquake damage evaluation data for California, ATC-13. Applied Technology Council. Redwood City, California. 492 pp.
- ATC-25 (1991).** Seismic Vulnerability and impact of disruption on lifelines in the coterminous United States. Applied Technology Council. Redwood City, California.
- ATC-40 (1996).** Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. 2 vols, Applied Technology Council. Redwood City, California.
- Ayala, D. F., Spence, R. J. S., Olivera, C. S. and Silva, P. (1996).** "Vulnerability of buildings in historic town centres: a limit-state approach." Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco (México), Elsevier Science Ltd, 8.
- Barbat, A. H. (1998).** "El riesgo sísmico en el diseño de edificios". Cuadernos técnicos 3. Calidad Siderúrgica, Madrid. 248 pp.
- Barbat, A. H., Yépez, F. and Canas, J. A. (1996).** "Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones". Earthquake spectra 12 (3): 371-394.
- Barbat, A.H. and Pujades, L. (2004).** "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona." Sísmica 2004, 6º Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Sísmica, Guimarães, Portugal, 14-16 de Abril de 2004.
- Benedetti, D. and Petrini, V. (1984).** "Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione." L'industria delle Costruzioni 149: 66-78 (en italiano).
- Bernardini, A., Lagomarsino, S. and Giovinazzi, S. (2007).** "The vulnerability assessment of current buildings by a macroseismic approach derived by the EMS-98 scale." Memorias del 3º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Girona (España), CIMNE.
- Blais, N. C., Seligson, H. A. and Petrow, A. J. (1996).** "Use of rapid damage assessment and geographic information systems for emergency response in the Northridge earthquake." Proceedings of the eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco (Mexico), Elsevier Science Ltd, 8.
- BOE: Boletín Oficial del Estado (1995).** Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico. 15294-15304 pp.
- Bonett, R., Barbat, A. H., Pujades, L. G., Lagomarsino, S. and Penna, A. (2004).** "Performance assessment for unreinforced masonry buildings in low seismic hazard areas." Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá), CD-ROM, Paper No. 409.
- Bonett, R. L. (2003).** "Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada." Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 474 pp.
- Bozzo, L.M. and Barbat, A.H. (2000).** "Diseño Sismorresistente de edificios". Editorial Reverte, S.A. Barcelona. I.S.B.N: 84-291-2011-4. 384pp.
- Braga, F., Dolce, M. and Liberatore, D. (1982).** "Southern Italy November 23, 1980 earthquake: a statistical study on damage building and an ensuing review of the MSK-76 scale." Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering. Athens, Greece.

- Braga, F., Dolce, M. and Liberatore, D. (1985).** "Assessment of the relationships between macroseismic intensity, type of building and damage, based on the recent Italy earthquake data." Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Bazan and Meli (2002).** "Diseño Sísmico de edificios". Editorial Limusa, S.A. Mexico. I.S.B.N: 968-18-5349-0. 317pp.
- Brookshire, D. S., Chang, S. E., Cochrane, H., Olson, R. A., Rose, A. and Steenson, J. (1997).** "Direct and indirect economic losses from earthquake damage". *Earthquake Spectra* 13 (4): 683-702.
- Bruzewicz, A. J.(2000).** Emergency management. Mexican Delegation. U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, New Hampshire.
- Caicedo, C., Barbat, A.H. and Canas, J.A. (1994).** "Vulnerabilidad sísmica de edificios". Editor A.H. Barbat. Monografía CIMNE IS-6, ISBN 84-87867-43-X, 100pp.
- Caicedo, C. (1993).** "Vulnerabilidad sísmica en zonas urbanas. Aplicación a un sector del Eixample de Barcelona." Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 165pp.
- Canavos, G. C. (2001).** "Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos." McGraw-Hill, Madrid. 652pp.
- D. G. d. Catastro,** «Sede Electrónica del Catastro.» DGC: <http://www.sedecatastro.gob.es/>
- Cardona, O.D. and Barbat, A.H. (2000).** "El riesgo sísmico y su prevención". Cuadernos Técnicos 5. Editorial Calidad Siderurgica, S.R.L. Madrid. I.S.B.N: 54-9306622-1-4. 190pp.
- Cardona, O. D. (2001).** "Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos." Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 322 pp.
- Carreño, M.L., Cardona O. D. y Barbat A. H. (2004a).** "System for post-earthquake building habitability and reparability evaluation", *Sísmica 2004*, 6º Congreso Nacional de Sismología e Engenharia Sísmica, Guimarães, Portugal, 14-16 de Abril de 2004.
- Carreño, M. L. (2006).** "Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones ex ante y ex post." Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 278 pp.
- Carreño, M.L., Cardona, O.M., Suárez, D.C. and Barbat, A.H. (2009).** "Holistic evaluation of Risk in the framework of the urban sustainability". II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la sostenibilidad, CIMNE. Barcelona. 10 pp.
- Casciati, F., Giorgi, F. and Pagani, M. (1996).** "GIS aided image comparison for seismic damage detection." Workshop on Geographic Information Systems and Major Hazards, Walferdange (Gran Duchy of Luxemburg).
- CEN (2004).** Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation, Brussels. 219 pp.
- Coburn, A. and Spence, R. (2002).** "Earthquake Protection (2nd edition)." John Wiley & Sons, Chichester, England. 420 pp.
- Domenech Massons JM (2004).** Relación entre dos variables categóricas: pruebas de ji cuadrado. En: Domenech Massons JM. (ed.) Fundamentos de diseño y estadística. Unidad Didáctica 10, Barcelona: Signo.
- Dominik H. Lang (2012).** "Earthquake damage and loss assessment – Predicting the unpredictable." Tesis doctoral.. University of Bergen. Bergen, Norway. 332 pp.
- El terremoto de Lorca del 11 de Mayo de 2011 (2011).** Instituto Geológico de Cataluña, Universidad Politécnica de Cataluña, Asociación Española de Ingeniería Sísmica y Generalitat de Catalunya. 85pp.
- Ferliche Fernández-Castanys, M. (2012).** "Elaboración de escenarios de daños sísmicos en la ciudad de Granada." Tesis Doctoral. Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos. Universidad de Granada. 287 pp
- Ferliche, M., Vidal, F., Alguacil, G. and Navarro, M. (2012).** "Daños causados en construcciones de Lorca por la serie sísmica de 2011". Homenaje a la profesora Maria Dolores Romacho Romero. Editorial Universidad de Almería. 99-117pp.
- Fajfar, P. (2002).** "Structural analysis in earthquake engineering - A breakthrough of simplified non-linear methods." Proceedings of

the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London.

Fajfar, P. and Gaspersic, P. (1996). "The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings ". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **25**: 23-67.

FEMA (1992). Handbook for the seismic evaluation of the existing buildings. FEMA 178. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.

FEMA (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA-273, US Federal Emergency Management Agency.

FEMA (2000). HAZUS 99 Estimated annualised earthquake losses for the United States. Washington, USA.

FEMA (2002). Rapid visual screening of buildings for potencial seismic hazards: A handbook. FEMA 158. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA.

Ferrán M. (2003). SPSS para Windows Análisis estadísticos. McGraw-Hill

Ferreira, T.M., Romeu, V., Mendes da Silva, J.A.R., Varum, H. y Costa, A. (2013) "Seismic Vulnerability assessment of historical urban centres: case study of the old city centre in Seixal, Portugal" *Bulletin of Earthquake Engineering* DOI 10.1007/s10518-013-9447-2

Fleiss JL, Levin B, Paik MC(2003). Statistical methods for rates and proportions. 3rd ed. N.York: J.Wiley

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, S. (2002). WP04: Guidelines for the implementation of the I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings. Genoa, Italy.

Giovinazzi, S. and Lagomarsino, S. (2003). Comunicación personal, Genoa, Italy.

Graham Gibbs (autor), Tomás del Amo Martín (traductor), Carmen Blanco Castellano (traductor) (2012). El análisis de datos

cualitativos en Investigación Cualitativa. Ed. MORATA. Madrid

Green, N.B. (1980). "Edificación, diseño y construcción sismorresistente". Editorial Gustavo Gili, S.A. I.S.B.N: 84-252-1009-7. Barcelona. 155 pp.

Gribich, Carol (2013). Qualitative Data Analysis. An Introduction. SAGE Publications

Guisande C., at all (2006). Tratamiento de datos. Universidad de Vigo. Diaz Santos

Guevara, L.T. (2000). "Planificación urbana y riesgo sísmico". Memorias del Seminario Internacional de Riesgo Sísmico. Sociedad de Ingenieros de Quindío y Universidad de Quindío, Armenia, Colombia.

Guevara, L. T. y García, L.E. (2001). "La columna corta o la columna cautiva". *Revista Tecnología y Construcción*, N° 17 – 1, 2001, enero-abril 2001. Instituto de desarrollo experimental de la construcción, Universidad de Venezuela e Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Zulia. Caracas.

Guevara, L. T. (2003). "La planificación urbana en zonas sísmicas: la normativa de zonificación y la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones". Proyecto V&G. Venezuela. 26pp.

Guevara, L. T. (2009). "Arquitectura moderna en zonas sísmicas". Editorial Gustavo Gili, SL, Barcelona. 207pp.

Guevara, L. T. (2012). "Configuraciones urbanas contemporáneas en zonas sísmicas." Editorial Sidetur. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Marzo 2012 374pp.

Guía para la definición de una estrategia antisísmica en el proyecto de edificios de nueva planta (2012). Consejería de obras públicas y ordenación del territorio. Comunidad Autónoma de Murcia. ISBN: 978-84-87138-67-6. 36 pp.

Guía para la restitución de la capacidad frente al sismo de elementos estructurales, tabiques, cerramientos, petos y escaleras de edificios dañados en el sismo de Lorca (2012). Consejería de obras públicas y ordenación del territorio. Comunidad Autónoma de Murcia. ISBN: 978-84-87138-71-3. 68pp.

- Guía de inspección y evaluación en situación de emergencia de daños debidos al sismo en edificios (2012).** Consejería de obras públicas y ordenación del territorio. Comunidad Autónoma de Murcia. ISBN: 978-84-87138-71-3. 46 pp.
- Grunthal, G. (1998).** European Macroseismic Scale 1998. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxemburg.
- Chávez, J. (1998).** "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña." Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 323 pp.
- Gülkan, P. and Sucuoglu, H. (1992).** "Earthquake vulnerability, loss and risk assessment in Turkey." Proceedings of the X World Conference on Earthquake Engineering, Madrid (España), 539-543.
- Howden, A. Group Limited (1995).** "Megacities: reducing vulnerability to natural disasters." The Institution of Civil Engineers. 170 pp.
- IGN, «Instituto Geográfico Nacional. Centro Nacional de Información Geográfica»:**
http://www.ign.es/espmmap/mapas/relieve_bach/Relieve_Mapa_06.htm.
- Informe del sismo de Lorca del 11 de mayo de 2011 (2011)** Instituto Geográfico Nacional, Universidad Complutense de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Instituto Geológico y Minero de España y Asociación Española de Ingeniería Sísmica 129 pp.
- Informe sobre estudio y desarrollo de metodologías para la estimación de la vulnerabilidad de construcciones frente a solicitaciones sísmicas y de inspección de edificaciones afectadas por terremotos (2005).** Ministerio del Interior de España. Dirección General de Protección Civil. Madrid. CEDEX 13-403-7-003.
- Iwai, S. and Kameda, H. (2000).** "Post-event data collection using mobile GIS/GPS and development of seismic evaluation technique for damage." 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, CD-ROM, Paper No. 2056.
- Lagomarsino, S. (2007).** "Mechanical models for the vulnerability assessment of current buildings." Memorias del 3r Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Girona (España), CIMNE.
- Lagomarsino, S., Galasco, A. and Penna, A. (2002).** "Pushover and dynamic analysis of URM buildings by means of a non-linear macro-element model." International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction. Technical presentation. Risk- UE project., Bucharest Meeting.
- Lagomarsino, S. and Giovinazzi, S. (2006).** "Macroseismic and mechanical models for the vulnerability assessment of current buildings". Bulletin of Earthquake Engineering. Special Issue "The Risk-UE Project" 4 (4): 415-443.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Podestà, S. and Resemini, S. (2002).** WP4-Vulnerability assesment of current buildings: I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings and guidelines for the implementation. RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk escenarios with application to different European towns. 28 pp.
- Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., Podestà, S. and Resemini, S. (2003).** WP05. Vulnerability assessment of historical and monumental buildings. Handbook. RISK-UE project: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. 90 pp.
- Lang, D.H.; Molina, S.,Lindholm,C.D. (2008)** "Towards near-real-time damage estimation using a CSM-based tool for seismic risk assessment", Journal of Earthquake Engineering, 12, 199-210.
- Lantada, N. (2007).** "Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona." Tesis Doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.325 pp.
- Lantada, N., Irizarry, I., Barbat, A.H., Goula, X., Roca, A., Susagna, T. and Pujades, L.G. (2010).** "Seismic Hazard and Risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE Vulnerability index method." Bulletin of Earthquake Engineering. 8:201-229.
- Lavell, A.** "Sobre la gestión del riesgo: Apuntes hacia una definición." Disponible en: http://www.crid.or.cr/crid/CD_Inversion/pdf/spa/doc15036/doc15036-contenido.pdf. Consultado: 20/01/2014
- Lomax R.G., Hahs-Vaughn D.L.(2012)** An Introduction to Statistical Concepts (third edition). Routledge: Taylor & Francis Group 711 Third Avenue New York, NY 10017.

- Martínez, A. (2013).** SPSS. Técnicas descriptivas de análisis de datos.
- Martínez-Díaz, J.J. (2011)** "Lorca: El terremoto del 11 de mayo de 2011". Enseñanzas de la Tierra (19.3)-361: 362-364pp.
- Martínez-Díaz, J.J., Álvarez-Gómez, J.A., García-Mayordomo, J, Insua-Arévalo, J.M., Martín-González, F. and Rodríguez-Peces, M.J. (2012).** "Interpretación tectónica de la fuente del terremoto de Lorca 2011 (Mw 5,2) y sus efectos superficiales." Boletín Geológico y Minero, 123 (4):441-458pp.
- Martínez-Díaz, J.J.,** Bejar-Pizarro, M., **Álvarez-Gómez, J.A., De Lis Mancilla, F., Stich, D., Herrera, G. and Morales, J. (2012).** "Tectonic and seismic implications of an intersegment rupture. The damaging May 11th 2011 Mw 5.2 Lorca, Spain, earthquake." Tectonophysics 546-547: 28-97pp.
- McCormack, T. C. and Rad, F. N. (1997).** "Earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21". Earthquake Spectra 13 (4): 605-621.
- Mena, U. (2002).** "Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas". Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Milutinovic, Z. and Petrovsky, J. (1985).** "Earthquake vulnerability and loss assessment for physical and urban planning." Proceedings of the International Conference on Reconstruction, Restoration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas, IZiIS. Skopje, Yugoslavia.
- 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. Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZiIS), Skopje. 109 pp.
- Milutinovic, Z. V. and Trendafiloski, G. S. (2001).** WP01, Objective 2: Prevalent building typology in the city of Bitola.
- Molina, S.; Lang D.H., Lindholm C.D. (2010).** "SELENA - An open-source-tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure". Computers & Geosciences, 36, 257-269
- Morris H. DeGroot (1975).** Probability and Statistics. Addison-Wesley Pub.
- Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B. L., Depinois, S., Masure, P. and Risk-UEteam (2004).** "The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios." Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá), CD-ROM, Paper No. 3329.
- Moya González, L., Candela, C., Ezquiaga, J.M., López de Lucio, R., Suarez Carreño, L and Trapero, J.J. (1999).** "La práctica del planeamiento urbanístico". Editorial Síntesis, S.A. Madrid. I.S.B.N: 84-7738-248-4. 278pp.
- Muñiz, Agustín y De Vicente, Luis Manuel (1996).** "Manual de planeamiento urbanístico" Edita el Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias. ISBN 84-505-3580-8. 104pp.
- Navarro, M., García-Pérez, A., Alcalá, F.J., Vidal, F., Enomoto, T. and Aranda, C. (2012).** "Una visión General de los efectos locales y daños observados en la ciudad de Lorca debido a los terremotos de mayo de 2011". Homenaje a la profesora María Dolores Romacho Romero. Editorial Universidad de Almería. 183-201pp.
- NCSE-02 (2002).** Norma de Construcción Sismorresistente Española. Parte General y de Edificación, Comisión Permanente de Normas Sismorresistente, Real Decreto 997/2002 del 27 de septiembre de 2002, Boletín Oficial del Estado nº 244, 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.
- Omar Dario Cardona A. (2001).** "La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión". Work.Conference on Vulnerability disaster theory and practice, 29 y 30 de junio de 2001, Disaster Studies of Wageningen University and Research Centre, Wageningen, Holanda.
- Orsini, G. (1999).** "A model for buildings' vulnerability assessment using the parameterless scale of seismic intensity (PSI)". Earthquake Spectra 15 (3): 463-483.
- Ozmen, H.B. (2013)** "Relation between the rapid evaluation method scores and the damages

states of buildings". *Natural Hazard Earth System Sciences*, 13: 763-770.

Pardo A., Ruiz M.A. (2005). Análisis de datos con SPSS13 Base. McGraw-Hill

PDS-1 (1974). Norma Sismorresistente P.D.S.-1. Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno, Decreto de 30 de agosto de 1974, BOE, 279, 21 de noviembre de 1974. 3723-3740 pp.

Peña, D. (2001) Fundamentos de Estadística. Alianza Editorial, Madrid.

Pérez, C. (2001). Técnicas estadísticas con SPSS. Prentice Hall

Pérez, C. (2005). Técnicas estadísticas con SPSS 12. Aplicaciones al análisis de datos. Prentice Hall

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.

Plan General de Ordenación Urbana de Lorca (2003). Aprobado definitivamente por la Comunidad Autónoma de Murcia el 18 de abril de 2003 publicándose la normativa de dicho proyecto en el suplemento n.º 8 del Boletín Oficial de la Región de Murcia n.º 139, correspondiente al día 19 de junio de 2003.

PLATEMUR (2002). P. C. Murcia, Plan Territorial de Protección Civil de la Región de Murcia.

Porter, K.A., Farokhnia, K., Cho, I.H., Rossetto, T., Ioannou, I., Grant, D., Jaiswal, K., Wald, D., D'Ayala, D., Meslem, A., So, E., Kiremidjian, A.S. and Noh, H.Y (2012). "Global Vulnerability Estimation Methods for the Global Earthquake Model" Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa.

Quintín Martín, M^a T. Cabero, Y. del R. de Paz (2007) Tratamiento estadístico de datos con SPSS. Thomson. Madrid

Ramón Álvarez Cabal, Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma y Raúl Rodríguez Escribano (2013). "El terremoto de Lorca. Efectos en los edificios". Consorcio de compensación de seguros, 233 pp.

Risk-UE (2003). An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to

different European towns. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage.

RISMUR (2006). IGN, Riesgo Sísmico de la Región de Murcia.

Roldán Ruiz, J., Carrillo Martínez, S., Granados Gonzalez, J., Ruiz López, D., Romera Sastres, J. and Romera Casado, M. (2012). "Experiencias para un protocolo técnico de actuación tras un terremoto". Edición: Fundación Universitaria San Antonio. I.S.B.N: 978-84-92986-42-2. 91pp.

Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M. and Reinoso, E. (2006). "A Simplified Method for Vulnerability Assessment of Dwelling Buildings and Estimation of Damage Scenarios in Catalonia, Spain". *Bulletin of Earthquake Engineering* 4 (2): 141-158.

Romao, X. et al. (2013). "Field observations and interpretation of the structural performance of constructions after the 11 May Lorca earthquake". *Eng Fail Anal.* [Http:// dx.doi.org / 10.1016 / j.engfailanal.2013.01.040](http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.040)

Romero, M., Fernanda, F., Caballero, M. and Videla, F. (2005). "Ciudad y Riesgo Sísmico. Metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica". *Revista Iberoamericana de Urbanismo* nº6 Dossier. 55-63pp.

Rui Chen, David M. Branum and Chris J. Wills (2013) "Annualized and scenario earthquake loss estimations for California" *Earthquake Spectra* 29 (4): 1183-1207.

Safina, S. (2002). "Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo." Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. 272 pp.

SEAOC (1980). Recommended lateral force requirements and Commentary. Seismology Committee, Structural Engineering Association of California, San Francisco, California.

SERGISAI (1998) Seismic Risk evaluation through integrated use of Geographical Information Systems and Artificial Intelligence techniques. Commission of the European Communities Directorate General XII for Science, Research and Development.

SES2002 (2002). Simulación de escenarios sísmicos, SES 2002. Manual técnico. Ministerio del Interior. Dirección General de Protección Civil e Instituto Geográfico Nacional, Madrid. 47 pp.

SISMIMUR (2006) P. C. Murcia, Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico en la Región de Murcia.

Tukey, John (1977). Explory Data Analysys. Addison-Wesley

Ufuk Hancilar, Fabio Taucer and Christina Corbane (2013). "Empirical Fragility Functions based on remote sensing and field data after the 12 January 2010 Haiti Earthquake ". Earthquake Spectra 29 (4): 1275-1310.

UNDRO (1979). Natural disasters and vulnerability analysis. Report of Expert Group Meeting. Geneve.

Visauta, B. (1998) Análisis estadístico con SPSS para Windows. Estadística básica. McGraw-Hill, Madrid

Walpole, R.F., Myers, Sharon R. Myers L. (1999). Probabilidad y estadística para ingenieros. Ed Prentice Hall

Whitman, R. W. (1973). "Damage probability matrices for prototype buildings." Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil

Engineering Research. Report R73-57, Cambridge. Massachusetts, USA.

Yépez, F. (1994). "Vulnerabilidad Sísmica de Edificios de Mampostería para Estudios de Riesgo Sísmico." Tesis de Master. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Yépez, F. (1996). "Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras aplicando técnicas de simulación." Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (Spain). 215 pp.

Yépez, F., Barbat, A. H. and Canas, J. A. (1995). "Simulación de escenarios de daño para estudios de riesgo sísmico." Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Barcelona, monografía IS-14. 103 pp.

Yepez, F., Barbat, A.H. and Canas, J.A. (1995). "Riesgo, Peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería". Editor A.H. Barbat. Monografía CIMNE IS-12. ISBN: 84-87867-50-2, 104 pp.