

Evaluación sismorresistente del Área Metropolitana de Granada

con datos geospaciales y
análisis estático no lineal

Trabajo Fin de Grado, julio 2020

Presentado por: Manuel Pérez Docampo

Tutor: Dr. Leandro Morillas Romero



Evaluación sismorresistente del Área Metropolitana de Granada

con datos geoespaciales y análisis estático no lineal

Trabajo Fin de Grado

Grado de Estudios de Arquitectura

de

Manuel Pérez Docampo

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Universidad de Granada

Tutor

Dr. Leandro Morillas Romero

Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica

Universidad de Granada

Convocatoria

Julio de 2020



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**



**Escuela Técnica Superior de
Arquitectura de Granada**

Palabras clave: Evaluación sismorresistente, vulnerabilidad, Sistemas de información geográfica, análisis pushover

Email: manuel.p.docampo@gmail.com

Lectura: 23 de Julio de 2020.

Índice general

Resumen	vii
1 Introducción	1
1.1 Características del parque inmobiliario del Área metropolitana de Granada	3
1.2 Análisis comparativo de códigos sismorresistentes en España . .	7
1.2.1 Evolución del mapa de peligrosidad.	8
1.2.2 Evolución del espectro de cálculo	9
1.2.3 Evolución de disposiciones constructivas permitidas	10
2 Objeto	13
3 Estado del arte	15
3.1 Metodologías de evaluación existentes	16
3.2 Aplicaciones recientes para estimación de vulnerabilidad.	19
3.3 Aplicaciones GIS	21
4 Metodología	23
4.1 Caracterización de la acción sísmica.	23
4.2 Tratamiento de los datos geospaciales	24
4.3 Caracterización del comportamiento lateral de la estructura. . . .	25
4.4 Determinación del desplazamiento objetivo	27
4.5 Evaluación de los estados de daño	29
5 Resultados	31
5.1 Distribución de tipos estructurales.	32
5.2 Estados de daño	36
6 Conclusiones	43
Bibliografía	45
Bibliografía	45

Anexos	49
Plano 01: Usos	50
Plano 02: Altura representativa	51
Plano 03: Tipología estructural	52
Plano 04: Estado de daño representativo	53
Planos 05-08: Probabilidad DS_0 , DS_1 , DS_2 , DS_3	54

Resumen

El sur de España es una de las zonas con mayor actividad sísmica de la península, siendo esta actividad especialmente peligrosa en zonas densamente pobladas. En este trabajo se ofrece una evaluación de las prestaciones sismorresistentes de los edificios residenciales de la zona metropolitana de Granada a partir de datos geoespaciales y aplicando métodos estáticos no lineales, consistentes en la caracterización del comportamiento estructural por medio de una curva de capacidad y la caracterización de la acción sísmica con una curva de demanda. A partir de estas dos curvas se puede estimar el comportamiento de la estructura y los daños esperables. Las curvas de capacidad se calculan a partir del proceso de datos catastrales, aplicando métodos estadísticos para tener en cuenta las incertidumbres en el comportamiento real, mientras que para la determinación de la acción sísmica se escoge un terremoto con probabilidad de excederse del 10 % en 50 años.

Los resultados, obtenidos gracias al empleo de Sistemas de Información Geográfica y herramientas de gestión de bases de datos, destacan la mejora de las propiedades sismorresistentes de los edificios del Área Metropolitana de Granada con el paso del tiempo. Esta mejora está claramente ligada a la promulgación de las diversas normativas sismorresistentes españolas, con especial incidencia en los cambios de criterio de proyecto que suponen la PGS-1 y la NCSE-94, con las que la probabilidad de daño moderado en las edificaciones se reduce de valores cercanos al 80 % a valores que rondan el 60 % y del 60 % al 25 % respectivamente.

1

Introducción

El sur de España es una zona de actividad sísmica moderada debido al choque de las placas continentales de África y Eurasia, que libera la energía sísmica predominantemente en forma de pequeños terremotos y genera, de forma poco frecuente, eventos sísmicos de magnitud moderada [1]. Dentro de España es la zona con mayor sismicidad y gran parte de los terremotos de mayor magnitud que han afectado a España se han registrado en esta región, entre los que se destacan de los últimos 500 años: Arenas del Rey, 25 de diciembre 1884 ($I_{msk}=IX-X$) y Golfo de Almería, 22 de septiembre de 1522 ($I_{msk}=IX$) o más recientemente los siguientes, que superan en todo caso la magnitud $M_w=5$: Ayamonte (Huelva), 12 de diciembre de 1989; Berja (Almería), 23 de diciembre de 1993; Adra (Almería), 4 de enero de 1994; Gérgal (Almería); 4 de febrero de 2002; y Lorca (Murcia), 11 de mayo de 2011. La figura 1.1 sitúa, además de estos terremotos, todos los que se hayan registrado desde 1380 con una intensidad $I_{ems}=VI$ o superior, y se puede observar la alta concentración de eventos sísmicos en esta zona.

La alta actividad sísmica deriva en una peligrosidad sísmica elevada. Los análisis probabilistas del riesgo sísmico estiman que en gran parte de Andalucía la aceleración máxima esperada del suelo es de 100cm/s^2 , alcanzando un 50% más en Málaga, Granada y Almería, y llegando, en ciertas zonas de la depresión de Granada, a 200cm/s^2 [2]. Con la inclusión de los efectos locales, es decir, la amplificación de las ondas que produce en la geología superficial, el valor máximo de aceleración del suelo aumentaría en términos generales, llegando a alcanzar en Granada valores en

el rango de 300cm/s^2 , el máximo de Andalucía, como se puede observar en la figura 1.2.

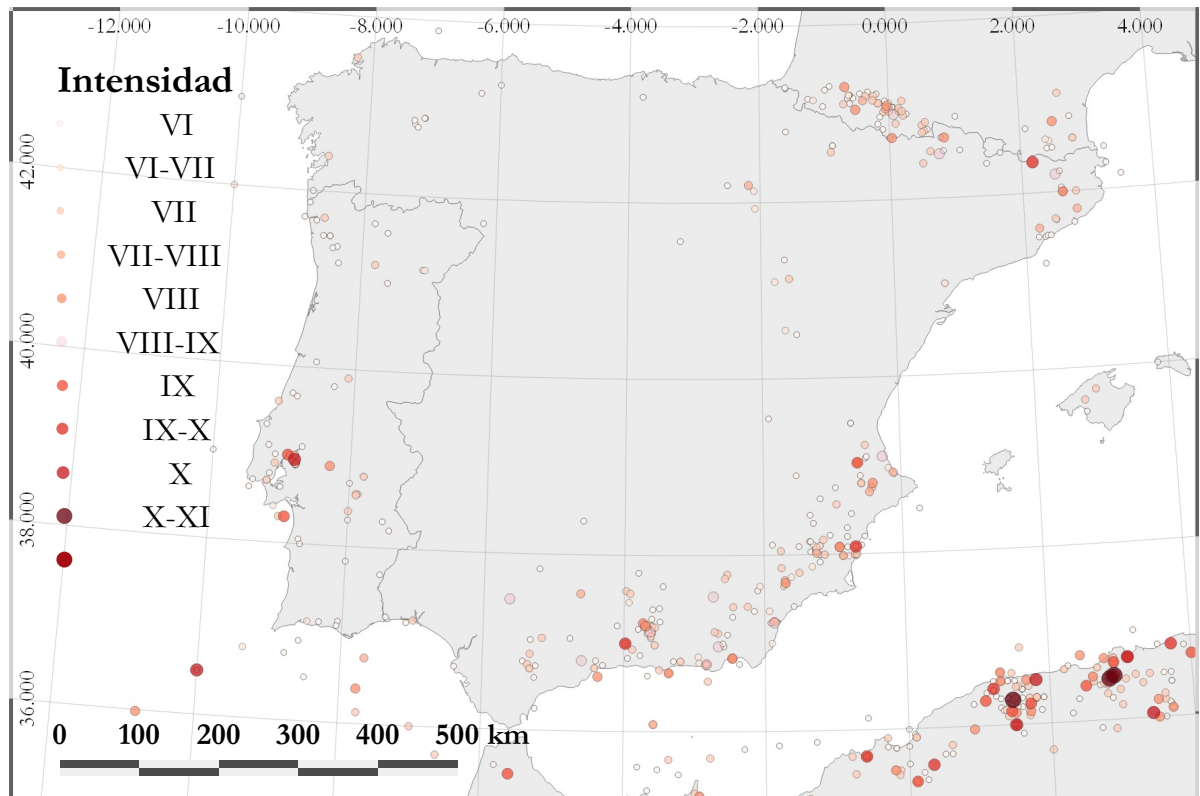


Figura 1.1: Mapa de sismos con $I_{EMS} > VI$ registrados entre 1380 y 2019. [3]

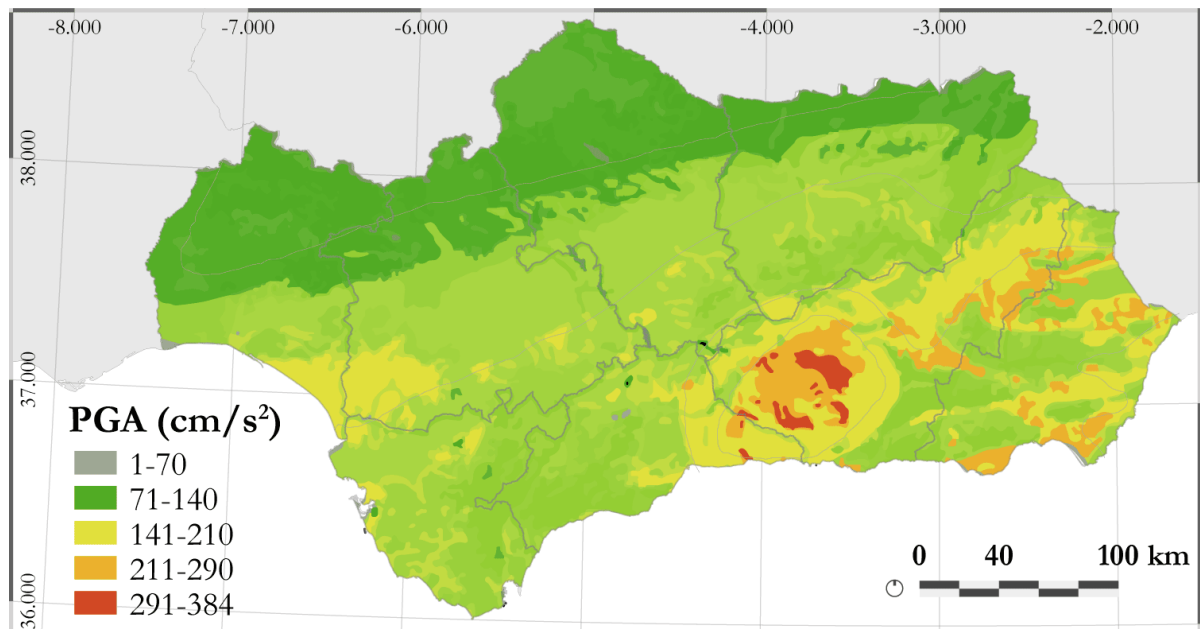


Figura 1.2: Aceleración máxima del suelo, incluyendo efectos locales. [2]

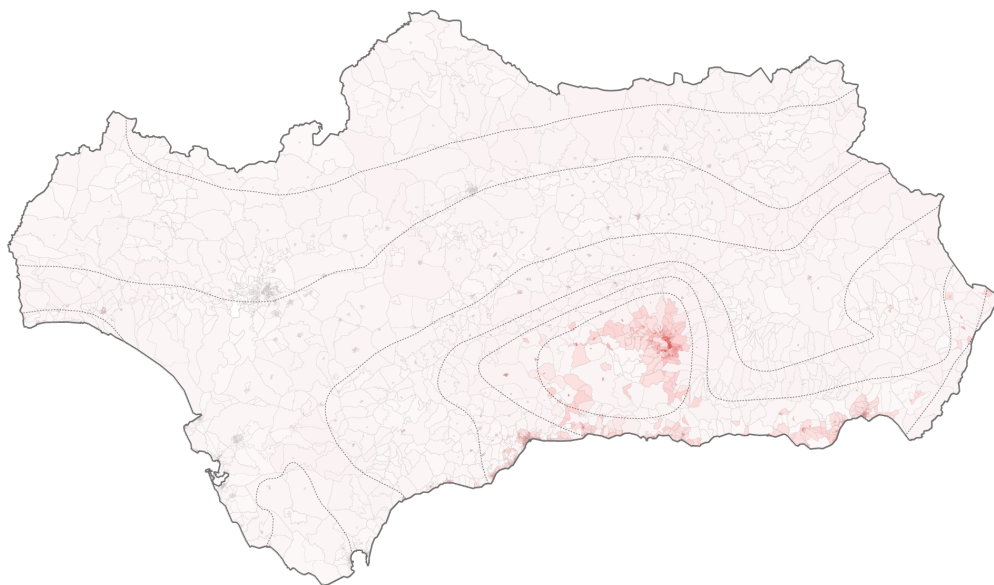


Figura 1.3: Mapa de densidad de población por secciones censales de Andalucía cruzado con aceleración sísmica básica propuesta por NCSE-02

Atendiendo a la densidad de población por distritos censales de toda Andalucía cruzada con la aceleración sísmica básica propuesta en el 2012, figura 1.3, se distinguen tres zonas en las que el riesgo sísmico asociado es elevado: Málaga, Área metropolitana de Granada y Almería y sus alrededores. La cantidad de habitantes de cada uno de esos territorios hace que en caso de terremoto las pérdidas humanas y materiales sean especialmente significativas.

1.1. Características del parque inmobiliario del Área metropolitana de Granada

El área metropolitana de Granada está compuesta por 32 municipios (Albolote, Alfacar, Alhendín, Armilla, Atarfe, Cájar, Cenes de la Vega, Chauchina, Churriana de la Vega, Cijuela, Colomera, Cúllar Vega, Dílar, Fuente Vaqueros, Las Gabias, Gójar, Granada, Güevejar, Huétor Vega, Jun, Láchar, Maracena, Monachil, Ogíjares, Peligros, Pinos Genil, Pinos Puente, Pulianas, Santa Fe, Valderrubio, Vegas del Genil, Villa de Otura, Víznar y La Zubia) y tiene una población total de 538.080 habitantes [4], distribuidos en 287.503 viviendas que suman un total de 47 millones de metros cuadrados construidos, de acuerdo a la base de datos del Catastro [5]. Como se observa en la figura 1.4, estos 47 millones de metros cuadrados representan el 71.7% del parque inmobiliario de Granada. En el plano 01 (anexo, página 51) y su extracto centrado en Granada (figura 1.5) se puede observar la geolocalización de los usos en el área metropolitana. La mayor parte del suelo está destinado a uso residencial y la industria está en su mayoría concentrada en polígonos destinados a ese uso únicamente. La mayoría de servicios públicos se sitúan en la ciudad de Granada.

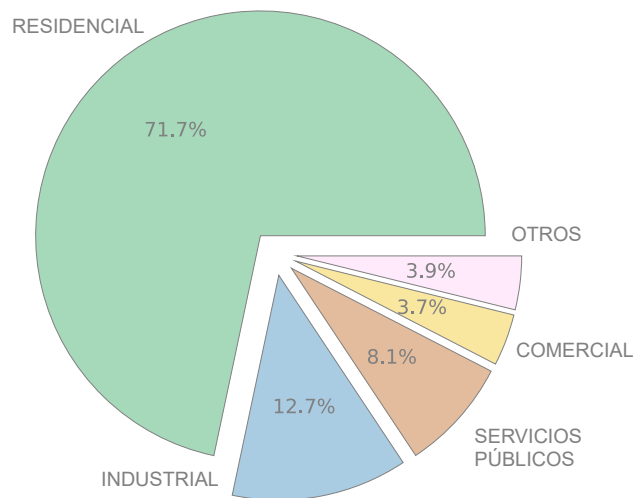


Figura 1.4: Distribución de superficie construida agrupada por usos el Área metropolitana

De la figura 1.6, donde se puede observar el total acumulado de metros cuadrados construidos a lo largo del tiempo con uso actualmente residencial, se puede extraer que en el Área metropolitana de Granada ha habido un crecimiento lineal del parque viviendas. Destaca especialmente la época de los años 60, cuando el hormigón empieza a consolidarse como material de construcción y crece el área urbana con edificios de mayor densidad.

Respecto a los criterios de proyecto vigentes en el año de construcción, en la figura 1.6 aparecen también señaladas las fechas de promulgación de todas las normativas sismorresistentes españolas. Con anterioridad a que se promulgasen normativas de resistencia sísmica se han construido un total de 28.298 edificios residenciales, que representan el 26.6 % del total. Dentro de estos, se pueden establecer dos grupos: los edificios que son patrimonio cultural o que forman parte del centro histórico y Albayzín, y aquellos pertenecientes a la época de autarquía (década 1940).

El primer grupo se compone de edificios de baja altura construidos con fábrica y forjados de madera en la mayor parte de ocasiones, y su estudio concreto escapa al propósito de estudio de este trabajo, pues es difícilmente evaluable su resistencia sin tener en cuenta sus modificaciones a lo largo del tiempo ni cómo eso ha afectado a su capacidad resistente. Además, muchos ya gozan de protección por su antigüedad. En cuanto al segundo grupo, viviendas construidas sobre todo durante la fase autárquica del franquismo, se compone de edificios de fábrica de altura baja o media (de 5 plantas en el caso más extremo) con forjados de hormigón, que actúan como diafragmas. Sin embargo, presentan el comportamiento característico de los edificios de fábrica y tienen problemas derivados de la escasez de materiales durante ese periodo: normalmente utilizan un hormigón muy pobre, con bajas cuantías geométricas y

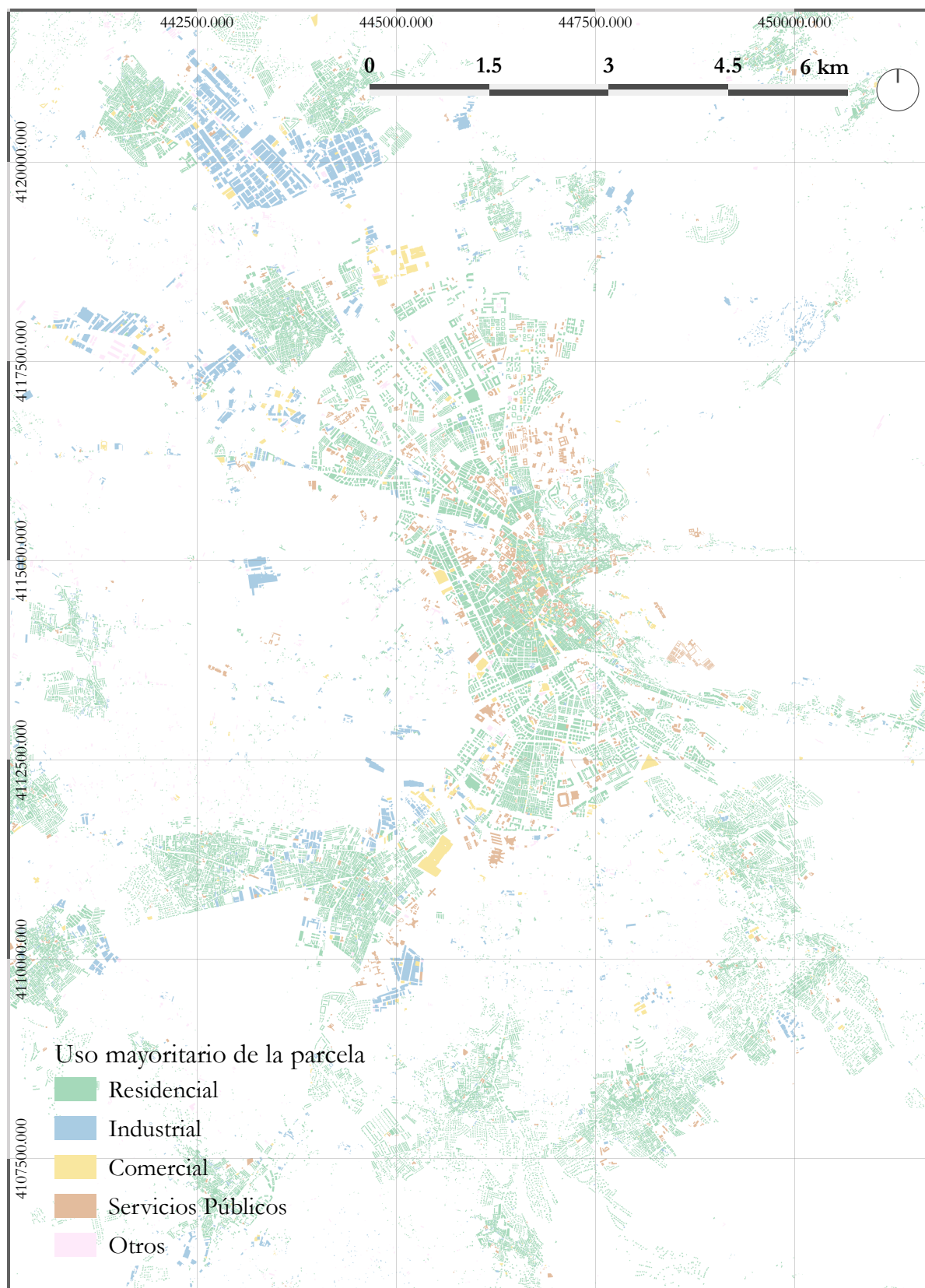


Figura 1.5: Fragmento plano 01: Usos en el Área metropolitana

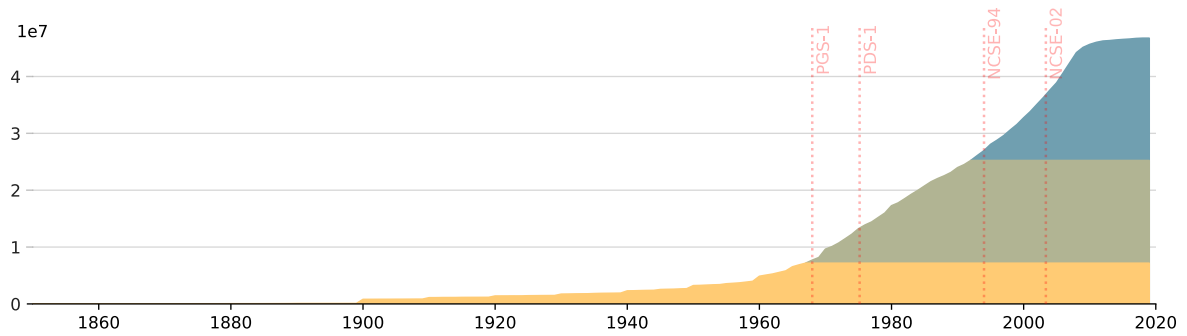


Figura 1.6: Evolución de la superficie construida total en el Área metropolitana de Granada

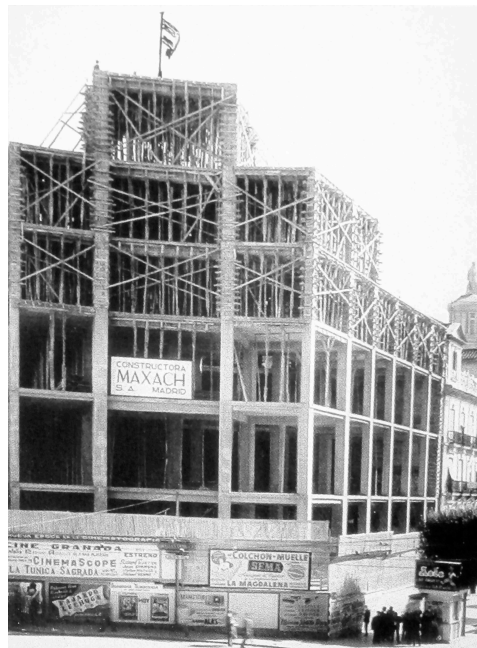


Figura 1.7: Fase de construcción del edificio de Correos de Puerta Real. [6]

armaduras lisas, además de capas de compresión pequeñas, lo que genera problemas de durabilidad.

En 1963 se promulga en España la primera norma que incluye la valoración del riesgo sísmico, la MV-101 [7], pero a finales de la década de 1950 ya se habían introducido en Granada las primeras estructuras porticadas de hormigón, como la del pionero ejemplo del "Edificio de Correos" situado en Puerta Real, que se puede observar en la figura 1.7. El uso de este tipo estructural se generaliza para las construcciones residenciales en los años sesenta, con gran variabilidad en función de las restricciones de la normativa de aplicación y las características de cada edificio (vigas planas, descolgadas, forjados reticulares...)[6]. Durante la década de 1970 y por la influencia de la PGS-1 (1968) [8], la estructura porticada de hormigón armado se convierte en la tipología más representativa de las construcciones residenciales, debido a la reco-

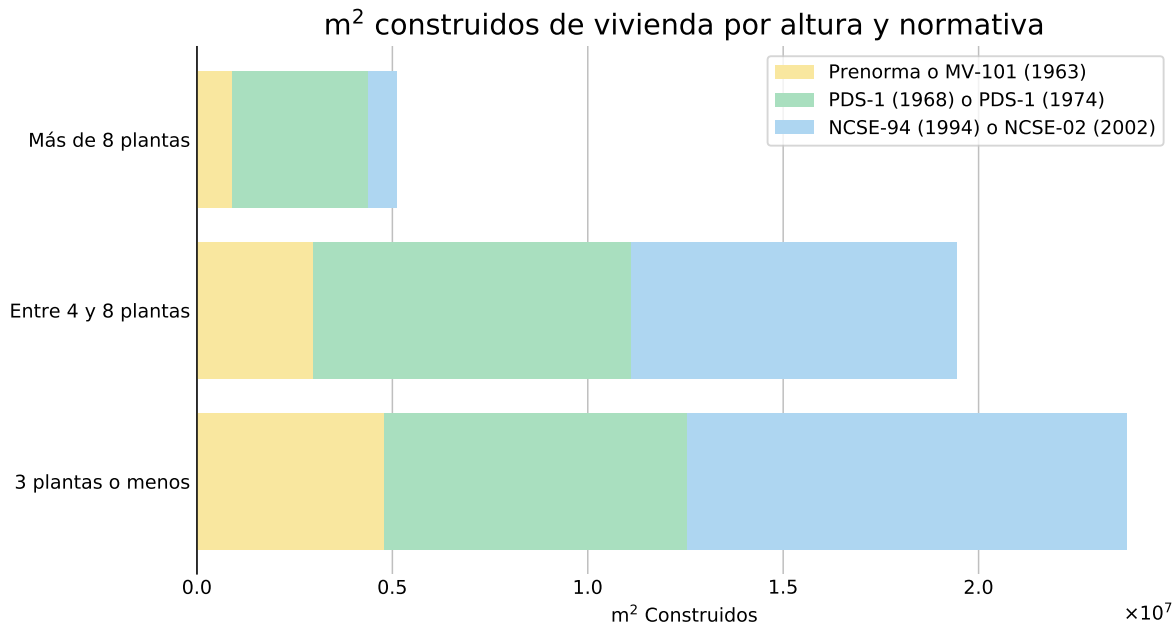


Figura 1.8: Área construida en cada normativa, agrupada por altura máxima del edificio.

mendación de no construir edificios de fábrica en zonas de riesgo sísmico así como por la resistencia que ejerce al empuje lateral esta tipología estructural.

En la figura 1.8 se puede observar la cantidad de metros cuadrados construidos con cada una de las normativas, entendiendo como asimilables la PGS-1 (1968) [8] y PDS-1 (1974) [9] así como la NCSE-94 (1994) y NCSE-02 (2002) [10]. Se observa que las construcciones anteriores a 1968 son, en su mayoría, edificios de baja altura, y que constituyen una parte importante del total de edificios de estas características. Los edificios construidos durante la vigencia de la norma PDS-1 o PGS-1 tienen una mayor altura media, coincidiendo con la expansión urbana que tuvo lugar durante este periodo. En los últimos años, con la norma NCSE-94 o NCSE-02 en vigor, gran parte de la superficie construida se corresponde a edificios de poca altura, como los crecimientos de zonas residenciales con viviendas unifamiliares que se han realizado en las afueras de la ciudad de Granada, en los diferentes pueblos del área metropolitana.

1.2. Análisis comparativo de códigos sismorresistentes en España

Han existido en España 5 normativas sismorresistentes: MV-101 (1963), PGS-1 (1968), PDS-1 (1974), NCSE-94 (1994) y NCSE-02 (2002). Por motivos de simplicidad, en este estudio se han diferenciado en tres grupos, ya que solo algunas introducen cambios significativos con respecto a la anterior: (i) la MV-101 y los años anteriores a su promulgación se han entendido como precódigo, (ii) las normativas PGS-1 y PDS-1, (iii) las normativas NCSE-94 y NCSE-02. Todas estas normas proponen el cálculo

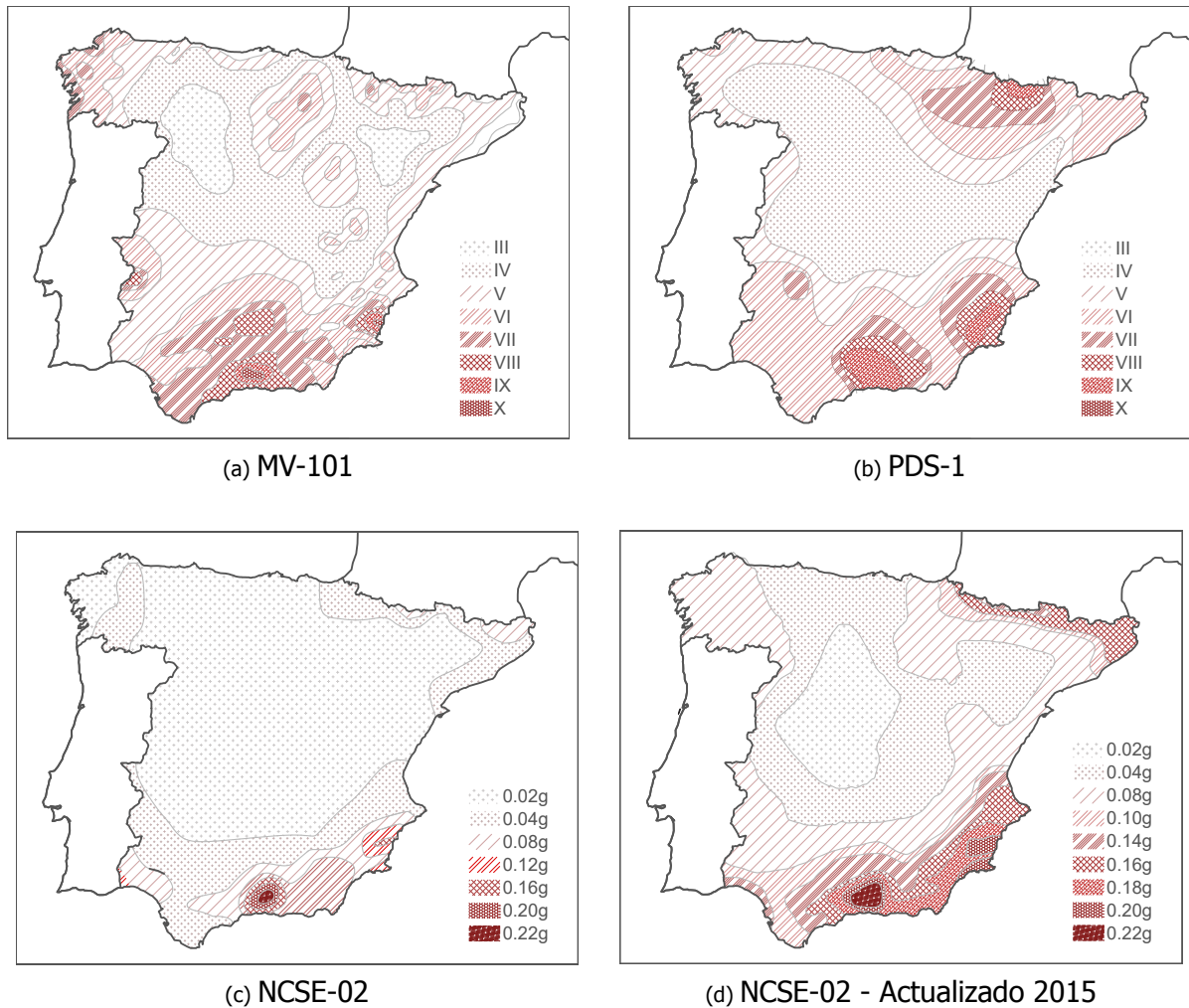


Figura 1.9: Comparación de los diferentes mapas de peligrosidad sísmica en España.

de la acción sísmica como una fuerza lateral equivalente a una fracción del peso del edificio, es decir, a través de un coeficiente de cortante basal. En todas ellas se propone la zonificación del territorio por su peligrosidad sísmica asociada y el cálculo del coeficiente de cortante basal en función de esa peligrosidad entre otros factores.

1.2.1. Evolución del mapa de peligrosidad

El mapa de peligrosidad se ha ido modificando con el tiempo: las primeras normativas (figura 1.9a y 1.9b) cuantificaban la peligrosidad estableciendo zonas según el grado de intensidad del terremoto en la escala MSK. A partir de la NCSE-02 (figura 1.9c) la peligrosidad se expresa como la máxima aceleración esperable de un suelo con un terremoto esperado con periodo de retorno de 500 años en la zona, reproduciendo el cambio se produce en el cambio de enfoque determinista a probabilista en el cálculo de la misma.

La MV-101 (1963) establece la primera zonificación del territorio en función del grado de intensidad del terremoto esperable, situándose Granada en la zona de grado sísmico X, que lleva asociado un coeficiente de cortante basal uniforme de 0.1 como se verá más adelante. Con la PGS-1 (1968) se modifica el grado sísmico de toda España, agrupando en tres zonas: sismicidad baja o primera ($I_{msk} < VI$), sismicidad media o segunda ($VI < I_{msk} < VIII$) y sismicidad acusada o tercera ($I_{msk} > VIII$). Se establece el grado mínimo en IV y se reconsidera para gran parte de la meseta. Además, se estima el grado de intensidad de ciertas zonas de los Pirineos con un valor superior. En la zona de estudio se disminuye a grado IX aunque el coeficiente cortante basal asociado será superior, ya que se introducen cambios en el criterio de cálculo.

El mapa de aceleración sísmica básica del NCSE-94 (1994) y NCSE-02 (2002) cambia el criterio y empieza a utilizar la aceleración básica como índice de peligrosidad. Tras el sismo de Lorca en 2011 se ha publicado una actualización [11] que se puede observar en la figura 1.9d, en la que se revisan los valores asociados a cada territorio, estableciendo un valor más alto para la mayor parte del mismo. Esta evolución se traduce en que los nuevos edificios de algunas zonas tendrán que ser calculados teniendo en cuenta la fuerza sísmica, ya que el valor de aceleración básica de su zona pasa de 0.16g: por ejemplo la zona pirenaica o todo el Este de Andalucía y la región de Murcia.

1.2.2. Evolución del espectro de cálculo

El espectro de cálculo propuesto por cada normativa para la zona de estudio se puede observar en la figura 1.10, donde se muestra el incremento del valor del espectro elástico de respuesta que se tomará para el cálculo de la fuerza lateral que afectará al edificio en caso de sismo con cada normativa.

- En la *MV-101* (1963) se propone una aceleración espectral (S_a) de $0.1m^2/s$ constante para la zona de estudio.
- En las normativas *PGS-1* (1968) y *PDS-1* (1974) se introduce el periodo (T) como factor determinante para el cálculo del S_a . Se propone un valor uniforme para las construcciones que tengan un periodo inferior a 0.5s, y una forma de cálculo simplificada para aquellas que tengan un periodo superior; en cualquier caso depende del tipo de terreno sobre el que esté la construcción y el tipo de cimentación escogido, así como del periodo de vida útil del edificio. Además, estas normativas tienen en cuenta el factor de distribución para las diferentes plantas.

En la figura 1.10 se muestran los espectros de respuesta para el tipo de terreno terreno de la zona de estudio con cimientos superficiales aislados. Además, se puede apreciar la reducción significativa del espectro que se realiza para edificios residenciales (periodo de vida de 50 años).

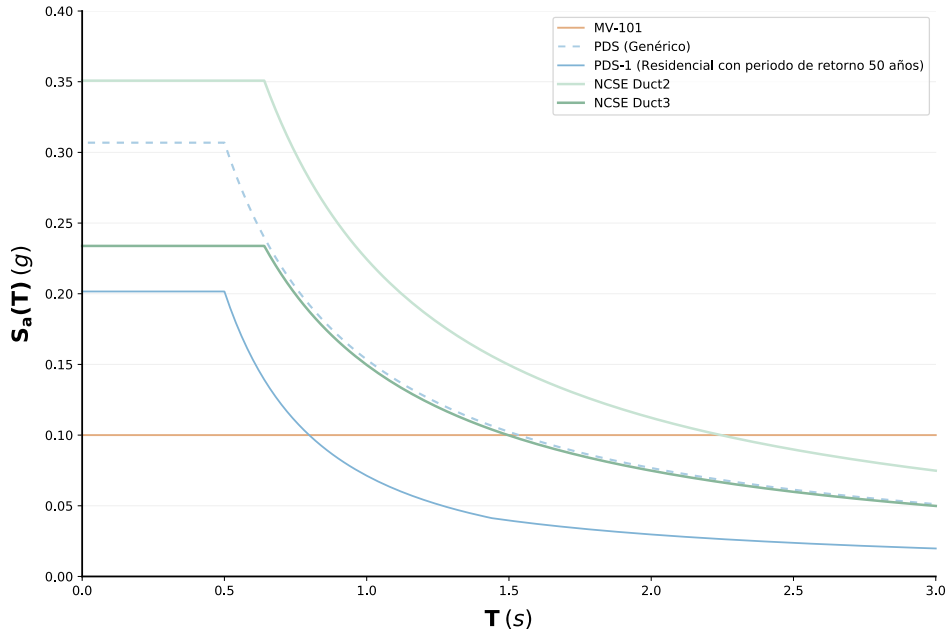


Figura 1.10: Comparativa de los espectros de cálculo resultantes para la zona de estudio según las diferentes normativas

- La normativas *NCSE-94* (1994) y *NCSE-02* (2002) proponen un espectro de cálculo que simplifica el espectro elástico de respuesta del terreno a dos segmentos. El primer segmento toma un valor constante (con amplificación 2.5) y un segundo segmento que depende inversamente del periodo del edificio. La separación entre estos dos segmentos viene dada por el periodo T_b que marca el inicio de las estructuras de periodo largo.

La novedad de estas normativas es que el espectro de cálculo sufre modificaciones en función de la ductilidad (μ) asociada al edificio, así como de su amortiguamiento. Se ha representado en la figura 1.10 el espectro asociado a viviendas con amortiguamiento del 5 % y con diferentes ductilidades, típicas en las viviendas de la zona de estudio.

1.2.3. Evolución de disposiciones constructivas permitidas

- Con la MV-101 (1963) se permiten todas las tipologías constructivas, si bien deben adaptarse a los valores de resistencia lateral especificados en la norma.
- Con la PGS-1 (1968) y la PDS-1 (1974) se prohíben, en las zonas de mayor actividad sísmica, las construcciones de muros de carga que no sean de hormigón armado (ladrillo, hormigón en masa, sillarejo...) así como las de entramados de madera en edificios que tengan una posibilidad de ocasionar víctimas. Se incluyen además recomendaciones de disposiciones geométricas de regularidad tanto en planta como en alzado, y otras disposiciones para forjados de vigue-

tas, que deberán tener una capa de compresión no inferior a 3cm para poder funcionar adecuadamente como diafragmas

- Con la NCSE-94 (1994) y NCSE-02 (2002) se introduce el coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas por ductilidad y se prescriben disposiciones constructivas para valor del coeficiente (baja, alta o muy alta). En caso de escogerse el máximo, obliga a emplear tipologías estructurales con mayor capacidad de disipar energía (vigas de canto, diagonales excéntricas, pantallas, etc). En caso de construcciones con ductilidad baja se permiten las vigas planas y forjados reticulares, así como pórticos arriostrados diagonalmente en solo una dirección. Se podrán emplear muros de carga, aunque se desaconseja, siempre que se estime el coeficiente de ductilidad como 1 (proyecto elástico) y la altura de la construcción no supere las dos plantas.

En cuanto a estructuras de hormigón, para evitar modos de fallo frágiles se introduce el concepto del proyecto por capacidad, la condición de que las vigas plastifiquen antes que el soporte, y disposiciones geométricas y de armado (armado mínimo en las rótulas plásticas, comprobaciones de bielas comprimidas en nudos, dimensiones de soportes no inferiores a 25cm, etc). Además, en zonas de mayor sismicidad como Granada ($a_b > 0,16g$), existen indicaciones específicas como el atado de los cimientos en dos direcciones mediante vigas de hormigón.

2

Objeto

El objeto de este trabajo es la evaluación del comportamiento sísmico del parque de viviendas de la zona metropolitana de Granada. La metodología se basa en la aplicación del análisis estático no lineal propuesto por el Eurocódigo-8. Para ello, se caracteriza la acción sísmica con el espectro propuesto en el Eurocódigo-8 y el comportamiento lateral de las estructuras se define con una serie probabilista de modelos idealizados, obtenidos de procesar la base de datos geoespacial del Catastro y usando el método de Monte Carlo. El resultado de la metodología es una estimación estadística del desplazamiento objetivo en cada edificio, que se traduce en estados de daño y su probabilidad de ocurrencia.

3

Estado del arte

Actualmente coexisten dos metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las construcciones: el método del índice de vulnerabilidad (VIM) y el método basado en el espectro de capacidad (MEC) [12].

- El VIM consiste en realizar una revisión visual (*rapid screening*) de los edificios de la zona a analizar para asignarles un índice básico de vulnerabilidad en función de su tipología estructural. Este índice podrá ser modificado en función de diferentes factores (geometría del edificio, cimentación, adecuación a criterios sismorresistentes, etc.) calibrados mediante los daños provocados por terremotos anteriores en terrenos y construcciones similares [13]. El daño medio significativo de cada edificación se calcula teniendo en cuenta este índice y la intensidad del terremoto escenario que se quiere evaluar, a través de una fórmula obtenida de forma empírica. Además, con este método se puede obtener la matriz de probabilidad de daños de cada edificio, asumiendo una distribución beta para la misma [14]. Esta metodología requiere una inspección detallada de los edificios a evaluar, por lo que normalmente se aplica sobre zonas concretas de una ciudad.
- El MEC consiste en obtener el punto de desempeño o desplamiento objetivo (*performance point*) de cada edificio, caracterizando su comportamiento mediante curvas de capacidad y simulando la interacción de las mismas con el espectro de demanda de un sismo escenario. Para ello es necesario realizar

modelos numéricos del edificio (que incluyen parámetros geométricos y mecánicos como su altura, peso, resistencia) y del terremoto (aceleración espectral asociada). Generalmente en la obtención del desplazamiento objetivo se utiliza un procedimiento iterativo en el que se tiene en cuenta la ductilidad del edificio, reduciendo el espectro de demanda en cada iteración [15]. En este método se utilizan curvas de fragilidad para estimar la probabilidad de un estado de daños con el desplazamiento objetivo calculado. Para ello, se fija el desplazamiento asociado a cada estado de daños y se asume la probabilidad de cada estado de daños asume una distribución binomial (o beta equivalente).

Con los datos de probabilidad de cada estado de daños, tanto en metodología VIM como como en MEC, se puede realizar la evaluación del daño medio (DS_m). Para ello, se utiliza la ec. 3.1, donde i es el número asociado al estado de daños y $P[DS_i]$ es la probabilidad de ese estado de daños.

$$DS_m = \sum_{i=0}^N i P[DS_i] \quad (3.1)$$

Ambas metodologías siguen procedimientos en cascada que implican que, tras la evaluación de la respuesta o de la vulnerabilidad, se realice una estimación del impacto que van a tener los daños. Tras la definición de comportamiento del edificio y su posterior evaluación de daños, se estima un número de víctimas y se calcula el coste económico que puede tener el terremoto. Para el cálculo de víctimas, gran cantidad de estudios utilizan el modelo de Coburn y Space [16] o Vacarenau [17], que tienen en cuenta los edificios colapsados o severamente dañados durante el terremoto así como su ocupación. Estas predicciones evidentemente están sujetas a una gran variabilidad, pues es difícilmente estimable la ocupación en el momento exacto de ocurrencia del terremoto. Para la estimación de costes asociados al terremoto, generalmente se estima un coste de reparación por metro cuadrado según tipo de edificio y estado de daños considerado, obviando el valor del edificio en el mercado de la vivienda.

3.1. Metodologías de evaluación existentes

Para el análisis de riesgos de catástrofe el FEMA (Agencia Federal para la Gestión de Emergencias) de EE.UU. ha desarrollado *HAZUS-MH*, una herramienta GIS destinada a evaluar el peligro de fenómenos naturales como huracanes, tsunamis, o terremotos. El propósito principal de este programa es establecer una metodología para hacer una correcta evaluación de las pérdidas, y realizar una mitigación de daños acorde. El módulo de terremotos, *HAZUS-Earthquake* [18], propone la metodología especificada en la figura 3.1, en la que se parte de la elección de un terremoto escenario y se caracterizan los edificios que van a ser objeto de estudio en función de su utilidad

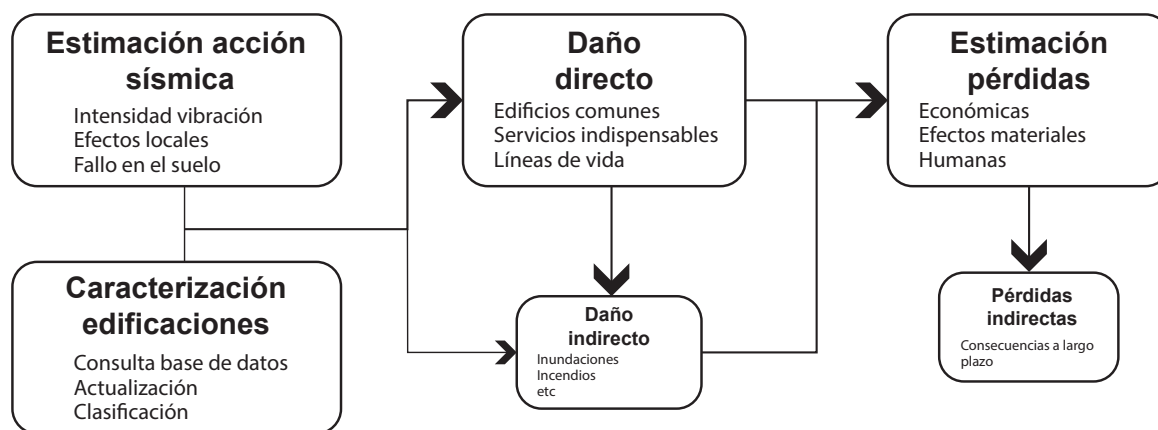


Figura 3.1: Módulos y funcionamiento de HAZUS-MH [19].

en caso de catástrofe y posteriormente por sus tipologías estructurales para acabar definiendo el impacto de ese terremoto. Tanto sismo como edificaciones se pueden introducir de forma automática consultando la base de datos del propio programa o actualizando manualmente las características tanto del terremoto como de las construcciones. HAZUS-Earthquake permite, tras la introducción de estos datos, el cálculo del daño directo e indirecto asociado al sismo, así como las pérdidas económicas que se derivan de ellos [19].

Para la estimación del daño se utiliza un método MEC con el que se estudian las curvas de capacidad asociadas a cada una de las 36 tipologías de edificio que HAZUS establece, que agrupan construcciones de similares características, distinguiéndose entre ellas por su material, sistema constructivo y altura. HAZUS-Earthquake utiliza curvas de fragilidad para estimar la probabilidad de daño tanto en componentes estructurales como no estructurales, lo que da como resultado una probabilidad de entrar en cada uno de los cuatro estados de daño que se establecen. Con la probabilidad de cada uno de ellos, se puede hacer una estimación del coste económico asociando a cada estado de daños un coste de reposición en porcentaje sobre el valor total del edificio construido.

En la misma línea que HAZUS-Earthquake, *RiskUE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European town* es una iniciativa europea presentada en 1999 con un presupuesto de 2,45 millones de euros que analiza el impacto que tendrían diferentes situaciones de sismo en 7 ciudades europeas participantes del proyecto (Niza, Catania, Tessalonika, Bitola, Sofía, Bucarest y Barcelona). El impacto se estima en costes y pérdidas derivados del mismo en términos económicos y humanos. RiskUE propone una metodología con 7 paquetes de trabajo (WP) que podrían ser posteriormente aplicados a diferentes ciudades. Estos WP estructuran las labores a realizar en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica [20]: WP01: características distintivas europeas, inventario GIS, base de datos y tipologías

de edificios; *WP02*: Evaluación del riesgo sísmico (nivel regional y nivel local), *WP03*: Análisis del sistema urbano, diferenciando los puntos débiles bajo condiciones normales y en caso de sismo, *WP04*: Evaluación de la vulnerabilidad en edificios; *WP05*: Evaluación de la vulnerabilidad en el centro histórico y monumentos; *WP06*: Vulnerabilidad de las infraestructuras indispensables; *WP07*: Escenarios de riesgo sísmico; *WP08 – 13*: Aplicación a las diferentes ciudades. Estos paquetes de trabajo podrían ser aplicados a otras ciudades posteriormente.

La propuesta es similar a la hecha por HAZUS-Earthquake: agrupación de edificaciones según su importancia en caso de sismo, evaluación de daños de cada uno de estos grupos y realización posterior de una estimación de costes derivados del sismo. Esta metodología parte de la clasificación de la estructura y material de cada edificación en uno de los 23 tipos estructurales presentes en la matriz de tipologías edificatorias (BTM) propuesta, que recoge las más representativas en toda Europa. Para la evaluación de daños en edificios comunes se proponen dos acercamientos diferentes en su *WP04*: *LM1* y *LM2* [21].

- El método *LM1* utiliza el procedimiento de VIM para acabar asignando cinco niveles de daño, correspondientes con los de la escala EMS-98 [22]. Los índices de vulnerabilidad (I_v), que toman valores de 0 a 1 en este caso, representan la probabilidad de pertenecer a una clase de vulnerabilidad de la escala EMS-98, por lo que representan también la probabilidad de sufrir daños del propio edificio. A cada tipo de la BTM se le asigna un índice de vulnerabilidad más probable así como el rango de valores que podría tomar. A través de funciones de vulnerabilidad semiempíricas medias se transforman los índices de vulnerabilidad en daño medio significativo.

Durante el análisis de la base de datos de edificios disponible, se fija para cada edificio, en función de su pertenencia a tipologías de la BTM, su índice de vulnerabilidad básico correspondiente y los límites de rango del mismo. Estos índices de vulnerabilidad se alteran con el *modificador regional* (ΔV_R), que pondera en función de la normativa seguida para su diseño, y los *modificadores de comportamiento* (ΔV_m), que pondera en función estado de conservación, geometría, cimentación, características estructurales propias, etc. Si bien se proponen valores para los modificadores en el propio *WP04*, estos pueden alterar su valor para adaptarse a diferentes circunstancias: en *Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS (capítulo 6)* [23] se puede observar una ampliación detallada de los modificadores con estimación de los mismos para la ciudad de Barcelona.

- El método *LM2* utiliza en el cálculo de daños el método basado en el espectro de capacidad y los modelos de fragilidad asociados, que predicen las probabilidades de entrar en un cierto estado de daños para un determinado valor de

aceleración espectral del suelo. Este proceso consta de cinco fases: (i) seleccionar para el edificio una tipología de la BTM que se ajuste a sus características, (ii) definir su espectro de capacidad, (iii) definir el espectro de demanda, es decir, el terremoto escenario y sus consecuencias sobre el edificio, (iv) calcular el *performance point*, (v) estimar desde el modelo de fragilidad las probabilidades de que el edificio sufra un determinado estado de daños.

3.2. Aplicaciones recientes para estimación de vulnerabilidad

Recientemente se han realizado esfuerzos en la aplicación de estas metodologías, dando como resultado estudios detallados de diversas ciudades. Entre los estudios que aplican la metodología VIM se pueden destacar el de Guardiola et al. [24], que aplica el método LM1 del RiskUE en el centro histórico de la ciudad de Valencia. Para ello, se delimitan los diferentes barrios y con los datos de catastro se caracterizan las edificaciones, completando manualmente mediante fichas los datos desconocidos (estado de conservación, posición en la manzana, rigidez, tipo de suelo...). Se fija para cada edificio el tipo más adecuado previsto en la BTM del RiskUE y se le asigna el índice de vulnerabilidad básico propio. Este valor se pondera con el modificador regional, que lo rectifica en función de las tipologías constructivas más utilizadas según época y su resistencia sísmica según diseño. Se añade también el modificador de comportamiento, que tiene en cuenta los datos añadidos sobre conservación, posición en la manzana, etc. A partir de los índices de vulnerabilidad y con una función de vulnerabilidad semiempírica, estableciendo dos terremotos escenario (probabilístico y determinístico), se calcula el daño medio para cada edificación. Asumiendo una distribución beta-equivalente a la binomial que representa la probabilidad de cada estado de daños, se calcula la matriz de probabilidad de daños. El daño medio de cada edificación se calcula de acuerdo a la ec. 3.1, representado en la figura 3.2a. Finalmente se estiman las pérdidas tanto en lo humanitario y en lo económico a partir de la matriz probabilidad de daños: un terremoto de intensidad VII–VIII podría llegar a causar 76 muertos y 2262 personas a realojar, que representan el 2.79‰ y el 83‰ de la población actual de este Centro histórico; y tendría un coste económico de 158 millones de euros, sin tener en cuenta la pérdida de patrimonio que supondría.

Otro de los estudios que utiliza el índice de vulnerabilidad es el estudio de Feriche sobre la vulnerabilidad en Granada [1]. En este trabajo se estima el fenómeno sísmico en la ciudad desde el punto de vista probabilístico y determinístico, y se estudian detalladamente los efectos locales que ocurren por zonas geológicas superficiales en distintos puntos de la ciudad. Partiendo de estudios anteriores, se entiende que esta amplificación es un fenómeno a tener en cuenta pues gran parte del suelo de Granada es terreno sedimentario blando, que generalmente amplifica la respuesta. Realizando

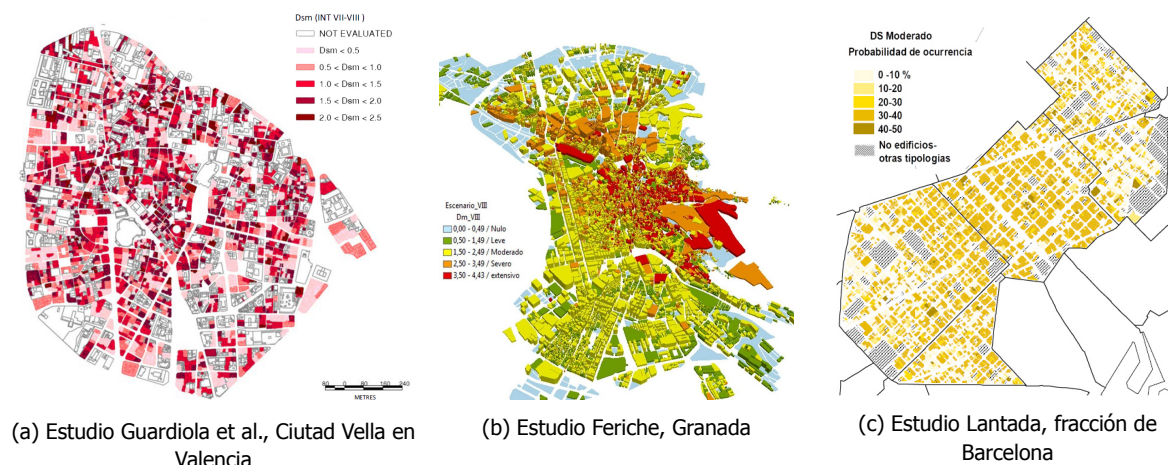


Figura 3.2: Resultados de los estudios llevados a cabo recientemente.

varios trabajos de investigación, se establecen cuatro zonas geológicas en la ciudad y se fija la aceleración máxima esperable en el suelo de cada una. La caracterización de edificios se lleva a cabo de manera similar a la detallada anteriormente: a partir de datos catastrales se asignan las tipologías de RiskUE a los edificios, que llevan asociadas índices de vulnerabilidad básicos. Añadiendo los modificadores se obtiene el índice de vulnerabilidad final y se evalúa en cada edificio el daño medio (Fig. 3.2b) a través de una función de vulnerabilidad que tiene en cuenta la intensidad de sismo amplificada por fenómenos locales.

El método del espectro de capacidad también está siendo ampliamente utilizado: se han desarrollado variantes como el capacity spectrum method avanzado [25], el método N2 [26] o el procedimiento del EC8-anexo B (EC8). Una interesante aplicación de este método se ha realizado para la ciudad de Barcelona [23]. En este extenso estudio se realiza la evaluación de vulnerabilidad por ambos métodos, aunque se resume a continuación únicamente la utilización del MEC. Tras la asignación a cada uno de los edificios de la ciudad de una categoría de las descritas en la matriz BTM del RiskUE, se estudia el comportamiento sísmico de las categorías más representativas (edificios de mampostería y de hormigón armado de altura baja, media y alta). Este comportamiento se describe mediante la interacción del espectro de capacidad representativo de cada categoría con el espectro de demanda de un escenario de terremoto determinístico y otro probabilístico, obteniendo finalmente un punto de desempeño para cada categoría en ambos escenarios. El cálculo de las curvas de capacidad se realizó con el programa Tremuri para los edificios de mampostería y con RUAUMOKO2-D para los edificios de hormigón.

Se establecen cinco estados de daño: sano (*None*), leve (*Slight*), moderado (*Moderate*), severo (*Extensive*), y completo (*Complete*). Para la estimación de estos se utilizan curvas de fragilidad, caracterizadas por los valores de umbral de daño (valor de desplazamiento para el que la probabilidad de entrada en estado de daño en concreto supera el 50 %) definidas en el Risk-UE WP-04 [21]. La probabilidad de daño mode-

rado se representa en la figura 3.2c. Finalmente, se han obtenido los desplazamiento espectrales medios asociados a cada estado de daños con su desviación típica.

Finalmente, para la transformación de estos daños en impacto (víctimas y coste económico) se han utilizado los procedimientos descritos anteriormente. Se concluye tras el estudio que los edificios de Barcelona tienen baja resistencia sísmica, cuestión conocida previamente pues la ciudad no está situada en una zona de gran sismicidad, aunque esta circunstancia puede ocasionar problemas en caso de un eventual sismo de magnitud moderada. El impacto económico de los diferentes escenarios se estima entre 6000 y 16000 millones de euros con variaciones según se utilice el método VIM o MEC, aunque los valores obtenidos para el MEC no son precisos porque se limitan a las seis clases descritas anteriormente, que no representan de forma lo suficientemente aproximada la variedad tipológica existente en Barcelona.

3.3. Aplicaciones GIS

Es fundamental el papel que los SIG (Sistemas de Información Geográfica) han tenido en el desarrollo de estudios de sismorresistencia y vulnerabilidad sísmica a escalas urbanas y regionales. Estos programas permiten el manejo y la representación de bases de datos geolocalizadas, por lo que facilitan el trabajo con la gran cantidad de datos que se gestionan durante un estudio de este tipo: tipos de terreno, sismicidad asociada, propiedades de los edificios, etc. El ámbito de aplicación de los SIG no se limita a las fases de estudio, su utilidad se extiende hasta la representación de resultados, especialmente en los casos en los que los estudios están dirigidos a la prevención y gestión de catástrofes y las conclusiones deben ser comprendidas por personal no especializado en estos temas (técnicos de Protección Civil, administraciones públicas, etc) [27].

En todos los estudios citados se han utilizado herramientas SIG durante el proceso de evaluación así como en la representación de resultados, con mapas de estados de daños predominantes o impacto económico por zonas. La metodología HAZUS tiene su propia herramienta SIG, y en Europa se ha intentado la implementación de herramientas similares como SEISMOCARE [28], aunque la mayoría de estudios siguen utilizando programas no especializados como ArcGis o qGIS, con los que la introducción de cada capa de datos es manual.

4

Metodología

La metodología empleada para este trabajo se divide en cinco fases, que se pueden observar en la figura 4.1: (i) caracterización de la acción sísmica esperada, (ii) tratamiento de los datos disponibles, (iii) estimación de las curvas de capacidad de los edificios, (iv) determinación del desplazamiento asociado a cada edificio con la acción sísmica y (v) estimación de la probabilidad de daño.

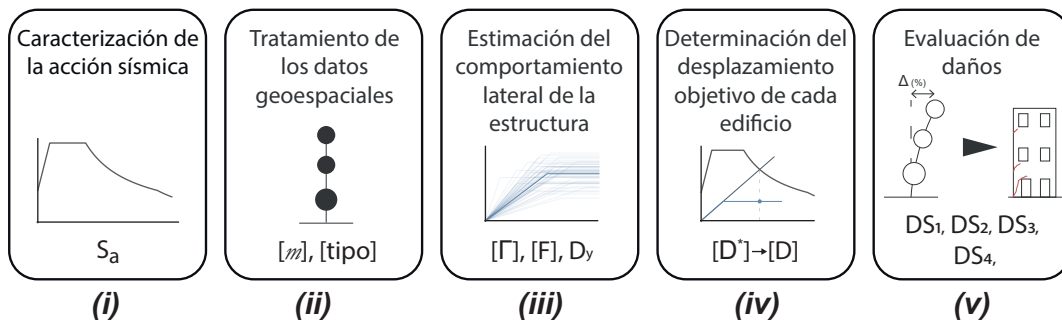


Figura 4.1: Metodología propuesta

4.1. Caracterización de la acción sísmica

Para la determinar la acción sísmica esperable se ha utilizado el espectro elástico de respuesta propuesto por el Eurocódigo-8 [29], que estima la acción sísmica como un terremoto con una probabilidad del 10 % de excedencia de 50 años, lo que

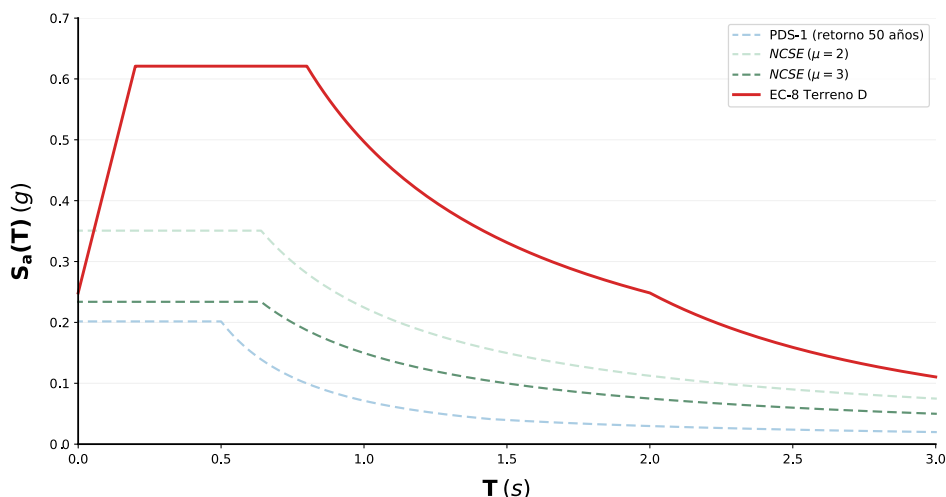


Figura 4.2: Espectro de respuesta elástica del terreno propuesto por EC-8 para la zona de estudio en comparación con los propuestos por normativa.

equivale a un período de retorno de 475 años. Para el espectro de respuesta elástico correspondiente al área metropolitana de Granada (figura 4.2) se han utilizado los parámetros del Eurocódigo 8 (EC-8), considerando el tipo de terreno adecuado. El espectro queda definido con los periodos $T_b=0.32s$ y $T_c=0.82s$, y una aceleración espectral máxima de $0.62g$.

4.2. Tratamiento de los datos geoespaciales

Para la obtención de datos de las construcciones del área se ha utilizado la base de datos geoespacial proporcionada por la Sede electrónica del Catastro, adecuada a la normativa europea Inspire y que contiene información de cada parcela catastral (planta de cubiertas, año de construcción, uso mayoritario de la parcela y superficie construida), así como una desagregación de los edificios por número de plantas del volumen construido. En el tratamiento esta base de datos se ha utilizado qGIS para la verificación de la información geoespacial y el módulo Pandas de Python para el manejo de la información.

Tras la exploración de la base de datos y su filtrado para la obtención únicamente de los edificios residenciales, se realiza una purga de *outliers* mediante la eliminación los edificios con valores de área o de altura superiores al percentil 99.99 %. Tras este ajuste con el que se pretende eliminar los errores de la base de datos, la base de datos contiene 106.134 edificios. A cada uno de ellos se le asigna un vector de masa sísmica $[m]$ que especifica la masa sísmica concentrada de cada planta, estimándose la masa superficial como 800kg/m^2 de forjado, que es lo habitual en edificios residenciales.

Además, se asigna el tipo estructural con una nomenclatura que contiene 3 datos categóricos sobre cada edificio: normativa, material y altura, en el formato *NORMATIVA . MATERIAL . ALTURA*, siendo coherente esta asignación con la evolución de los

Tipo estructural	Sistema estructural	Año de construcción	Número de plantas	γ_1	γ_2
PCODE.MA.L	Fábrica de ladrillo de baja altura no acorde a normativa	Anterior a 1956	[1,2]	1.5	3
PCODE.MA.M	Fábrica de ladrillo de altura media no acorde a normativa	Anterior a 1956	[3, 5]	1.25	3
PCODE.MA.H	Fábrica de ladrillo de gran altura no acorde a normativa	Anterior a 1956	[6, 9]	1.1	3
PCODE.RC.M	Pórticos de hormigón de altura media no acorde a normativa	[1956, 1968]	[3,7]	1.25	2
PCODE.RC.H	Pórticos de hormigón de gran altura no acorde a normativa	[1956,1968]	[7, 12]	1.1	2
MCODE.RC.L	Pórticos de hormigón de baja altura proyectados con PGS-1 o PDS-1	[1969, 1994]	[1, 3]	1.5	1.3
MCODE.RC.M	Pórticos de hormigón de media altura calculados proyectados con PGS-1 o PDS-1	[1969, 1994]	[4, 7]	1.25	1.3
MCODE.RC.H	Pórticos de hormigón de gran altura proyectados con PGS-1 o PDS-1	[1969, 1994]	[8, 13]	1.1	1.3
HCODE.RC.L	Pórticos de hormigón de baja altura proyectados con NCSE-94 o NCSE-02	[1995, 2019]	[1, 3]	1.25	1.3
HCODE.RC.M	Pórticos de hormigón de media altura proyectados con con NCSE-94 o NCSE-02	[1995, 2019]	[4, 7]	1.25	1.3
HCODE.RC.H	Pórticos de hormigón de gran altura proyectados con con NCSE-94 o NCSE-02	[1995, 2019]	[8, 12]	1.1	1.3

Cuadro 4.1: Tipos estructurales en el Área metropolitana de Granada

sistemas constructivos en Granada. Se pueden consultar los tipos estructurales con detalle en la tabla 4.1. El valor de *NORMATIVA* será *PCODE* si fueron proyectados antes de la promulgación de cualquier normativa o con la MV-101, *MCODE* si fueron proyectados durante el periodo de vigencia de la PGS-1 o la PDS-1, o *HCODE* si fueron proyectados de acuerdo a la NCSE-94 o NCSE-02. En cuanto al material, se agrupan en edificios con estructura de fábrica (*MA*) o hormigón armado (*RC*). La altura del edificio podrá entrar en la categoría gran altura (*H*), media altura (*M*) o baja altura (*L*). A cada tipo estructural se le asignan coeficientes de sobrerresistencia establecidos en HAZUS [18] para edificios clasificados de tipo estructural similar.

4.3. Caracterización del comportamiento lateral de la estructura

El comportamiento frente a fuerzas laterales de cada edificio se representa con una curva de capacidad, que relaciona el desplazamiento del punto de control (normalmente en cubierta) con el cortante basal ante la acción de una distribución de fuerzas laterales monótonamente creciente, como se puede observar en la figura 4.3. Los puntos significativos de una curva de capacidad son los asociados a la resistencia de cálculo F_d (la resistencia para la que se proyecta el edificio), a la resistencia de fluencia F_y (la resistencia a la que el comportamiento deja de ser elástico) y a la resistencia última F . Cada una de estas ordenadas se corresponde con un desplazamiento o desplome lateral.

En este estudio se ha simplificado la curva de capacidad a una aproximación bilineal elástica-perfectamente plástica, punteada en la 4.3b. Esta aproximación bilineal viene caracterizada por el desplazamiento de fluencia D_y y la capacidad última F . El cálculo de esta para cada edificio se realiza en función de su tipo estructural y sus características geométricas, teniendo en cuenta las disposiciones normativas de su año de construcción. La resistencia de cálculo F_d se obtiene del producto de la masa efectiva en el primer modo de vibración $M_{eff,1}$ y el coeficiente cortante basal α , como muestra la ec. 4.1. El coeficiente cortante basal de proyecto α se obtiene aplican-

do el método modal espectral específico de cada normativa MV-101, PGS-1, PDS-1, NCSE-94, o NCSE-02 en función del año de construcción.

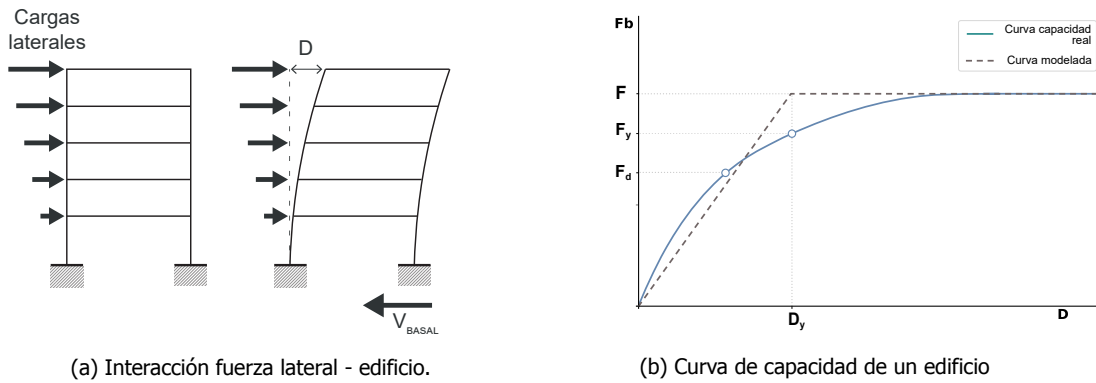


Figura 4.3: Análisis pushover

Para obtener las propiedades modales en el primer modo de vibración $M_{eff,1}$ (masa efectiva), M_1 (masa modal), L_1 (factor de excitación modal) y Γ_1 (factor de participación modal), se aproxima la forma del primer modo de vibración $[\phi_1]$ como una función seno entre 0 a $\frac{\pi}{2}$.

$$F_d = \alpha * M_{eff,1} \quad (4.1)$$

$$M_{eff,1} = \Gamma_1^2 M_1 \quad (4.2)$$

$$\Gamma_1 = \frac{L_1}{M_1} \quad (4.3)$$

$$L_1 = [\phi_1][m][1] \quad (4.4)$$

$$M_1 = [\phi_1][m][\phi_1] \quad (4.5)$$

Para el cálculo de F , se le aplican al F_d de cada edificio los dos coeficientes de sobrerresistencia (γ_1 y γ_2) propuestos por HAZUS [18] en función de su tipología, de acuerdo a la ec. 4.6. Estos coeficientes pueden consultarse en la tabla 4.1. Están obtenidos a partir del juicio técnico y datos experimentales y describen las relaciones típicas entre F_d , F_y y F . Finalmente, el desplazamiento de fluencia D_y se estima como el 0.5% de la altura del edificio para tipos estructurales de hormigón armado y 0.25% para edificios de fábrica.

$$F = \gamma_1 \gamma_2 F_d \quad (4.6)$$

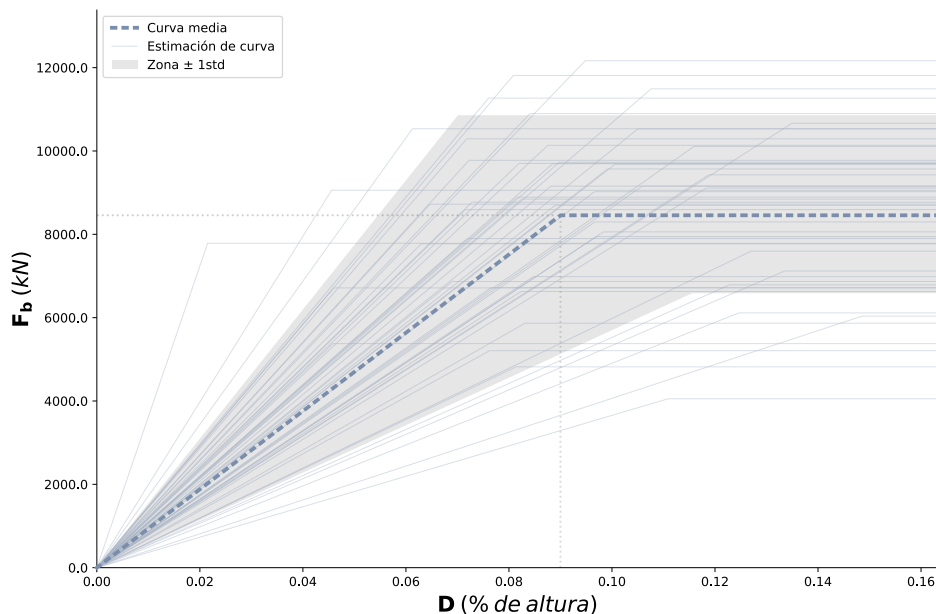


Figura 4.4: Curva de capacidad de edificio tipo MCODE.RC.M

Con ánimo de conservar la incertidumbre asociada a la determinación de las curvas de capacidad con los datos disponibles, se emplea el método Monte Carlo, implementando un generador de números aleatorios con parámetros de variabilidad adecuados. Para cada edificio se generan 50 curvas de capacidad, con los valores de F y D_y organizados en vectores, que se llevarán al siguiente paso de la metodología. De acuerdo a las recomendaciones de HAZUS [18], la variabilidad de la resistencia lateral y del desplazamiento lateral de fluencia se pueden estimar como el 20 % de dichos valores medios para edificios construidos de acuerdo a normativas sismorresistentes, y 30 % para edificios prenormativos. Se puede observar un ejemplo de curva de capacidad probabilista en la figura 4.4, que corresponde a un edificio de hormigón armado de altura media construido con la normativa PDS-1 (1974).

4.4. Determinación del desplazamiento objetivo

El desplazamiento objetivo D es el desplazamiento lateral al que se vería sometido el nudo de control (normalmente en cubierta) como resultado de la acción sísmica considerada. Este desplazamiento objetivo se calcula en cada edificio para la serie de 50 valores de F y D_y obtenidos en el paso anterior.

Para ello, se utiliza el procedimiento de cálculo estático no lineal del anexo B del Eurocódigo-8, que consiste en determinar el punto de desempeño de un sistema equivalente de un grado de libertad, es decir, el punto de intersección entre la capacidad de ese sistema y el espectro reducido de demanda, ambos en formato ADRS (espectro de respuesta aceleración-desplazamiento). Para modelar el edificio como un sistema de un grado de libertad se utiliza el factor de participación modal Γ_1 , definido

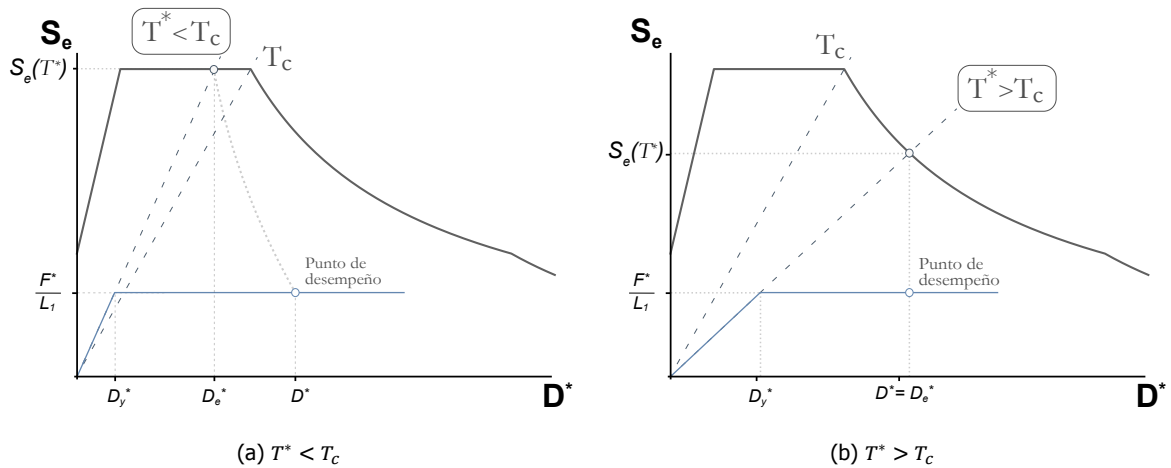


Figura 4.5: Diagrama del procedimiento estático no lineal del EC8-Anexo B.

en la ec. 4.3. La curva de capacidad bilineal en formato ADRS (espectro de respuesta aceleración-desplazamiento) se obtiene con el punto de fuerza última equivalente F^* y el desplazamiento de fluencia equivalente D_y^* , definidos por las ec. 4.7 y 4.8.

$$F^* = \frac{F}{\Gamma_1} \quad (4.7)$$

$$D_y^* = \frac{D}{\Gamma_1} \quad (4.8)$$

Para evaluar el desplazamiento asociado al punto de desempeño del sistema equivalente (D^*) es necesario estimar el periodo del sistema equivalente (T^*) con la ec. 4.9. Dependiendo de si T^* está en el rango de periodos cortos $T^* < T_c$, o medio/largo $T^* > T_c$ del espectro, se utilizan diferentes procedimientos para la determinación de D^* . Ambos procedimientos se reflejan en la figura 4.5, donde se representa el espectro elástico de respuesta en línea sólida negra y las curvas de capacidad en línea sólida azul, ambos en formato ADRS. El periodo límite entre el rango de periodo corto y el de periodo medio es T_c representado con línea de guiones en la fig 4.5.

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{L_1 * D_y^*}{F^*}} \quad (4.9)$$

- En caso de sistemas con periodo medio/largo ($T^* > T_c$), se estima que el desplazamiento objetivo equivalente es igual al desplazamiento que tendría el sistema con comportamiento elástico ilimitado (D_e^*), calculado de acuerdo a la ec. 4.10, suponiendo una estimación como la de la figura 4.5b.

$$D^* = D_e^* = S_e(T^*) \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \quad (4.10)$$

- En caso de sistemas con periodo corto ($T^* < T_c$), se evalúa la aceleración espectral ($S_e(T^*)$) que actúa sobre el sistema, definida mediante la curva roja de la figura 4.2. En caso de que sea menor que la que el sistema es capaz de resistir ($S_e(T^*) < \frac{F^*}{L_1}$), el comportamiento del sistema se estima como elástico, recurriendo a la ec. 4.10. Si la aceleración espectral a la que está sometido el sistema es superior a la que es capaz de resistir ($S_e(T^*) > \frac{F^*}{L_1}$), se evalúa el comportamiento, que deja de ser lineal, teniendo en cuenta la ductilidad, como se aprecia en la figura 4.5a. La ductilidad se estima con la ec. 4.11, y su desplazamiento objetivo equivalente está definido por la ec 4.12.

$$q_u = \frac{S_e(T^*) * L_1}{F^*} \quad (4.11)$$

$$D^* = \frac{D_e^*}{q_u} \left(1 + (q_u - 1) \frac{T_c}{T^*} \right) \geq D_e^* \quad (4.12)$$

Conocido el desplazamiento objetivo del sistema D^* , se reconvierte al modelo de múltiples grados de libertad mediante el mismo factor de participación modal ($D = D^* \Gamma_1$), generando una serie de 50 desplazamientos probables del nudo de control en correspondencia con las 50 curvas de capacidad probables de la estructura.

4.5. Evaluación de los estados de daño

Se establecen cinco estados de daño según los daños que generen los desplazamientos en el edificio: sano (DS_0), leve (DS_1), moderado (DS_2), extenso (DS_3) y completo (DS_4), correspondientes a niveles crecientes de daño. En términos generales, el DS_0 significa que la edificación no presenta consecuencias para el sismo estudiado y DS_4 significa que el riesgo de colapso es real. Estos estados de daño son similares a los establecidos por HAZUS, y los problemas asociados a cada uno se describen en las tablas 4.2 y 4.3 para edificios de muros de fábrica y pórticos de hormigón respectivamente.

Para la evaluación, se transforma directamente la lista de desplazamientos objetivos de cada edificio, obtenida por el procedimiento del anexo B del EC-8, en una lista estados de daño asociados. Esta transformación se realiza mediante la comparación del desplome relativo asociado al desplazamiento objetivo con los valores de límite de desplazamiento relativo de cada estado de daños en cada tipo estructural propuestos por el HAZUS [18], que se pueden consultar en la tabla 4.4. Los desplomes relativos asociados a cada estado de daños varían permitiéndose valores más elevados en estructuras más bajas y más recientes.

Estructuras de muros de fábrica

DS ₁	Rupturas diagonales en la superficie del muro, más profundas cuando rodean los huecos y pequeñas separaciones del diafragma en caso de falta de unión.
DS ₂	Rupturas diagonales en el muro, más profundas en caso de muros que hayan alcanzado el límite elástico. Empuje de los tejados a los muros que provoca desplome.
DS ₃	Muros que alcanzan su capacidad última, reconocible por grandes fisuras y desconchamientos de su propia estructura. En caso de anclajes pobres en cubierta, posible colapso de la misma.
DS ₄	Riesgo real de colapso por fallo del muro

Cuadro 4.2: Características estado de daños en estructuras de muros de fábrica

Estructuras de pórticos de hormigón armado

DS ₁	Pequeñas hendiduras cercanas a los nudos (o en los mismos), con fracturas debidas a la flexión y al cortante
DS ₂	La mayor parte de pilares y vigas presentan grietas finas. En las estructuras dúctiles se llega a la capacidad de fluencia y en las no dúctiles se presentan fracturas por cortantes, además de desconchamientos.
DS ₃	Las estructuras dúctiles alcanzan su capacidad última y aparecen grandes grietas de flexión, desconchamientos y otras patologías derivadas del pandeo de las armaduras. Las estructuras no dúctiles presentan grandes problemas de cortante llegando incluso a colapso parcial por problemas en los solapes y por el pandeo de las armaduras
DS ₄	Riesgo real de colapso por agotamiento de la estructura o fallo de estabilidad.

Cuadro 4.3: Características estado de daños en estructuras de hormigón armado

	Leve (DS ₁)	Moderado (DS ₂)	Extenso (DS ₃)	Completo (DS ₄)
HCODE.RC.H	0.0025	0.005	0.015	0.04
HCODE.RC.M	0.0033	0.0067	0.02	0.0533
HCODE.RC.L	0.005	0.01	0.03	0.08
MCODE.RC.H	0.0025	0.0043	0.0117	0.03
MCODE.RC.M	0.0033	0.0058	0.0156	0.04
MCODE.RC.L	0.005	0.0087	0.0233	0.06
PCODE.MA.H	0.0016	0.0026	0.0064	0.0175
PCODE.MA.M	0.0021	0.0034	0.0086	0.0233
PCODE.MA.L	0.0032	0.0051	0.0128	0.035
PCODE.RC.H	0.002	0.0032	0.008	0.02
PCODE.RC.M	0.0027	0.0043	0.0107	0.0267

Cuadro 4.4: Desplome relativo (% de la altura) asociado a cada estado de daño.

5

Resultados

Esencialmente, la metodología asigna a cada edificio una serie de 50 valores probables de estado de daño, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas al comportamiento real de la estructura. Para la valoración de los resultados deben identificarse los tipos estructurales presentes en todo el Área Metropolitana. El estado de daños representativo para cada edificio se toma como la moda de la serie de estados de daños obtenida. El estado de daños más repetido es, en edificios prenormativos y proyectados con la MV-101 así en edificios diseñados con la PGS-1 o PDS-1, el estado de daños moderado. El estado de daño más frecuente para los edificios recientes es el estado de daños leve. Los estados de daño tienden a ser más leves a lo largo de los años, como se puede ver en la figura 5.1. Para los edificios prenormativos, los daños moderados afectan un amplio 92.7% de los edificios, mientras que solo afectan a un 10.9% de los edificios proyectados con la normativa vigente. Un 2.8% de edificios construidos recientemente quedan sanos tras la acción sísmica planteada y cabe resaltar que tras la misma un 7.3% de los edificios prenormativos presentan como representativo un estado de daños extenso.

Para una evaluación más detallada, se calcula la probabilidad de incurrir en cada estado de daños que tienen las construcciones, resultando finalmente una probabilidad de aparecer daños ligeros $P(DS_1)$, una probabilidad de tener daños moderados $P(DS_2)$, extensos $P(DS_3)$ y por último la probabilidad de daños completos $P(DS_4)$ para cada edificio con la acción sísmica anteriormente definida. La probabilidad de un estado de daños se expresa de forma acumulativa, de forma que los edificios con



Figura 5.1: Distribución de los estados de daños representativos en con las diferentes normativas.

5

daños completos están incluidos igualmente en el resto de estados de daño que han excedido.

$$DS_4 \subset DS_3 \subset DS_2 \subset DS_1$$

5.1. Distribución de tipos estructurales

La distribución de los tipos estructurales que se han definido para el estudio en todo el Área Metropolitana de Granada se puede observar en la figura 5.2, donde se representa el porcentaje de tipos estructurales, tanto de viviendas como de metros cuadrados construidos. De la figura 5.2a se desprende que la tipología más repetida es la estructura porticada de hormigón armado (HCODE.RC.L, seguida de MCODE.RC.L y de PCODE.MA.L) con unos porcentajes de 34.4%, 31.6% y 22.7% respectivamente, lo que indica un porcentaje elevado de viviendas de baja altura sobre el total de viviendas.

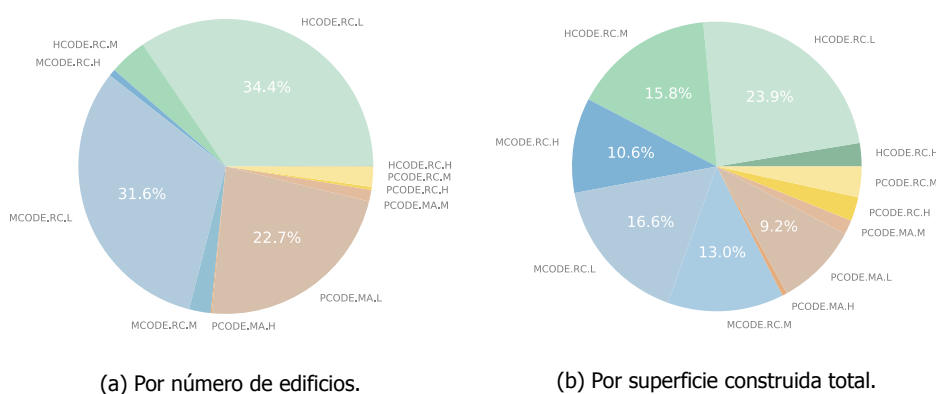


Figura 5.2: Distribución de los tipos estructurales en el Área metropolitana de Granada.

Para el estudio de los daños y sus consecuencias, se representan los metros cuadrados construidos con cada categoría en la figura 5.2b. Sobre el total de metros cua-

drados de vivienda construidos, un 42.3 % fueron proyectados con la norma NCSE-94 o siguientes, un 40.2 % se adaptan a la normativa PGS-1 o a la PDS-1 y en el 17.5 % restante no se tuvo en cuenta ninguna normativa sísmica de proyecto. De la misma figura, desagregando los datos, se deduce que el tipo con más metros cuadrados construidos es el HCODE.RC.L (23.9 %), seguido de MCODE.RC.L (16.5 %), HCODE.RC.M (15.8 %), MCODE.RC.M (13.0 %), MCODE.RC.H (10.6 %), PCODE.MA.L (9.2 %), siendo el resto de categorías inferiores al 5 %, incluida HCODE.RC.H.

La localización espacial de todos los tipos estructurales en Área Metropolitana de Granada se puede consultar en el Plano 03 (anexo, página 53). En la figura 5.4 se puede observar un fragmento del mismo centrado en la ciudad de Granada, donde se detecta que gran parte de la zona de expansión de la ciudad (zonas de mayor densidad de población y con edificios de más altura) está construida sin arreglo a normativa alguna (*PCODE*), siendo altamente probable que sus edificios entren en estado de daños moderado o extenso, de acuerdo a la figura 5.1. En la figura 5.5 se puede consultar la distribución de tipologías en Las Gabias y Cúllar Vega, y se observa de forma mucho más directa el crecimiento del municipio con las diferentes normativas, ya que los centros de los mismos conservan gran cantidad de sus edificios prenormativos. De esto se deduce que gran parte del parque edificado de estos municipios se construye estando ya vigente la NCSE-94 o NCSE-2002, con viviendas unifamiliares de altura no superior a 7,5m. De acuerdo a los datos que se presentarán más adelante, estos edificios no forman parte de las tipologías más vulnerables.

Se presenta en la figura 5.3 la evolución de la altura media de las tipologías en el Área Metropolitana. En los tipos estructurales de altura baja no se producen variaciones significativas, ya que estos grupos mantienen sus límites constantes, compensándose los resultados. Sin embargo, en los grupos de altura media y gran altura se puede observar como sube la media por año en la época de vigencia de la PGS-1 o PDS-1, vinculada al crecimiento de la ciudad y la construcción de bloques de viviendas en parcelas con una alta edificabilidad.

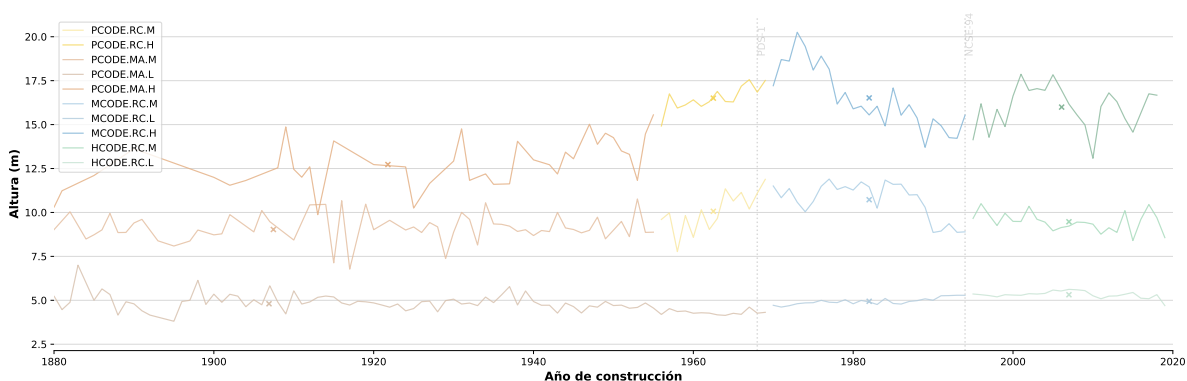


Figura 5.3: Altura media por tipo y año

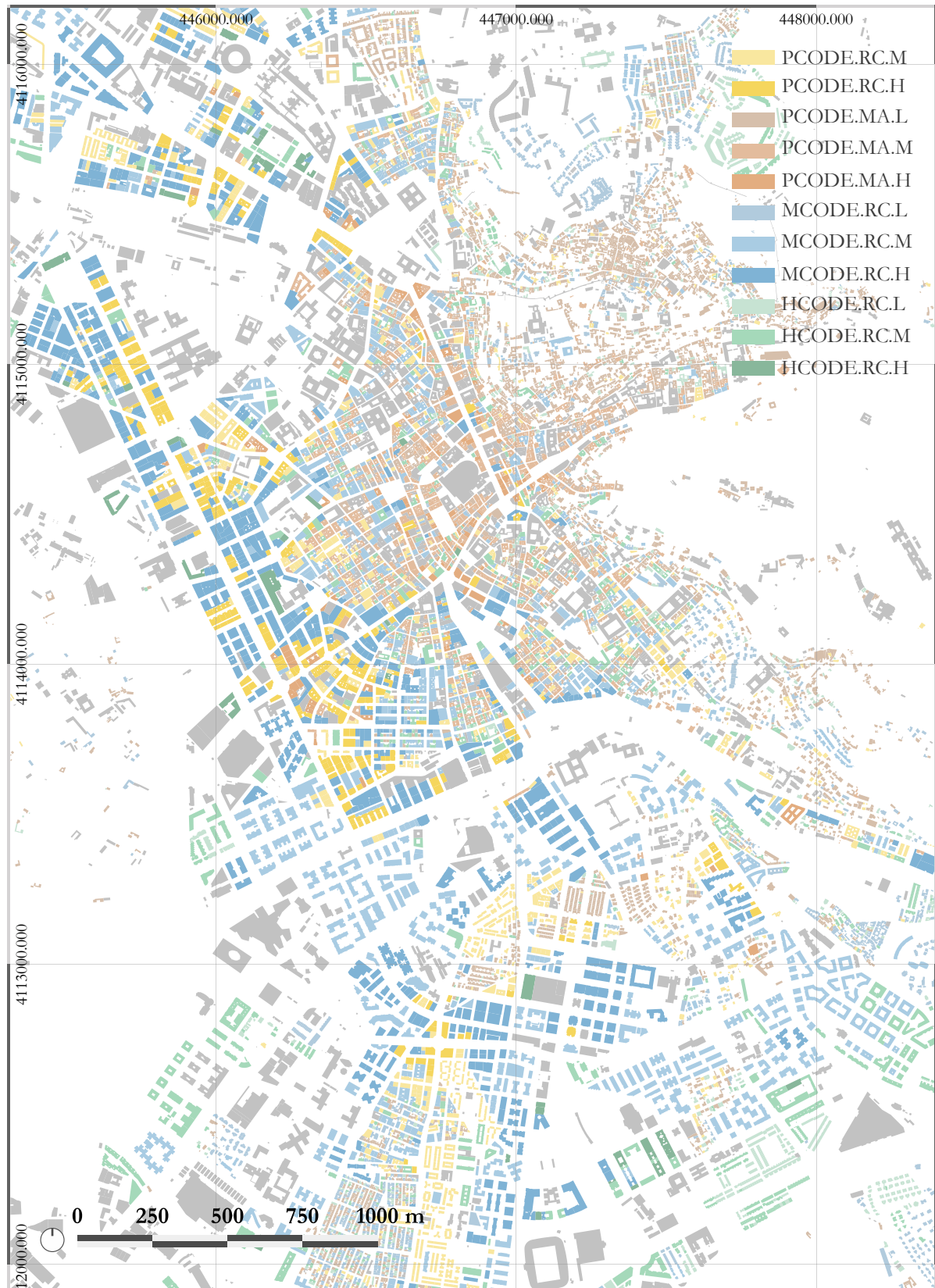


Figura 5.4: Fragmento de plano 03: tipos estructurales (Granada)

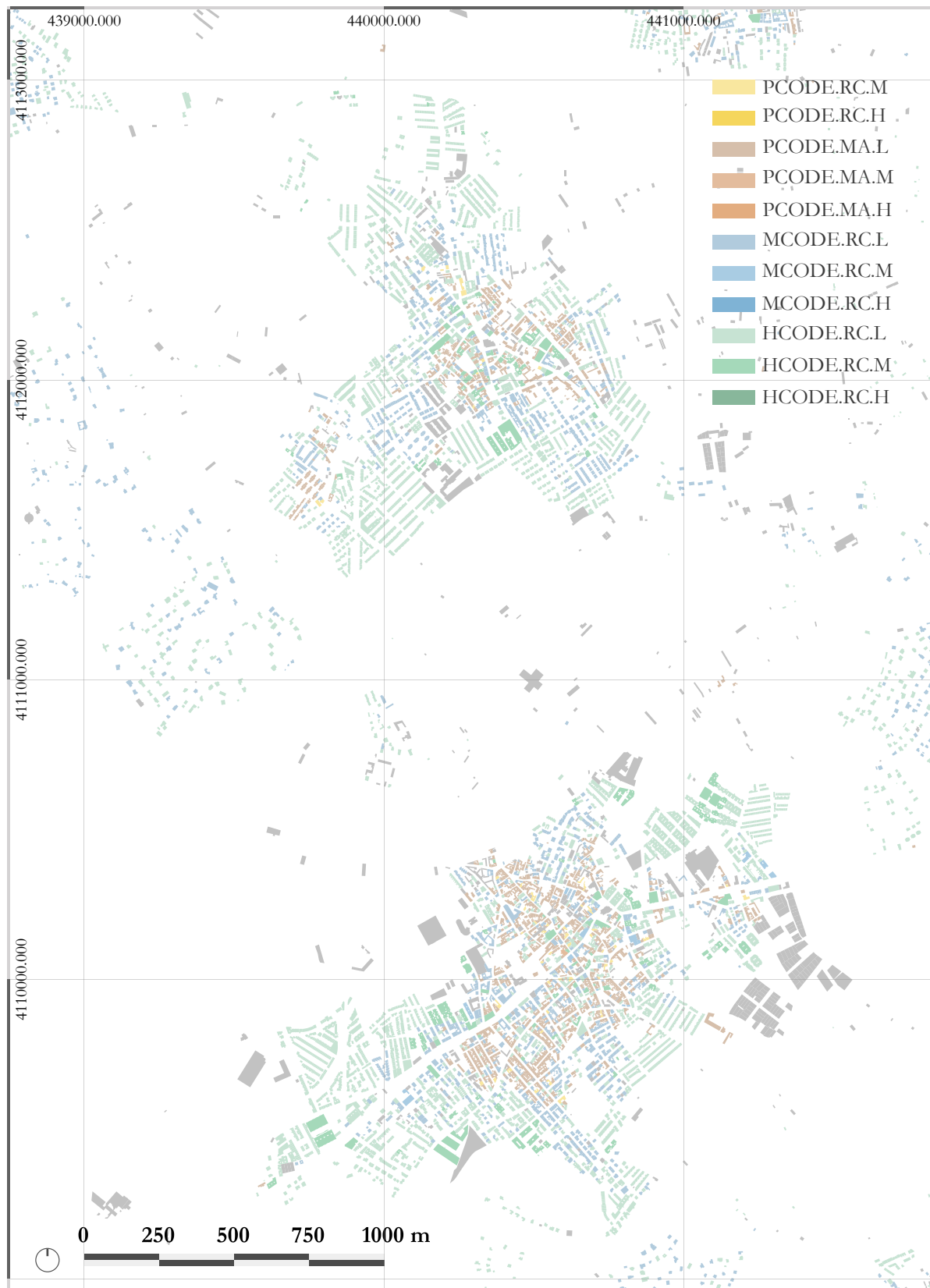


Figura 5.5: Fragmento de plano 03: tipos estructurales (Las Gabias y Cúllar Vega)

5.2. Estados de daño

Los estados de daños definidos son de utilidad para cuantificar el nivel de desperfectos que sufre un edificio en caso de sismo, pudiendo tomar cinco valores desde el *estado sin daños* (DS_0) al *estado de daños completo* (DS_4), con el que existe riesgo real de colapso. La figura 5.6 muestra, mediante círculos de diferente área según su superficie construida, cada una de las construcciones del Área metropolitana, dando información de su año de construcción y altura representativa. Además de mostrar la evolución de la altura media de las construcciones ponderada con su superficie (con línea punteada en el gráfico), presenta la evolución cronológica de la probabilidad media en cada año de cada estado de daño.

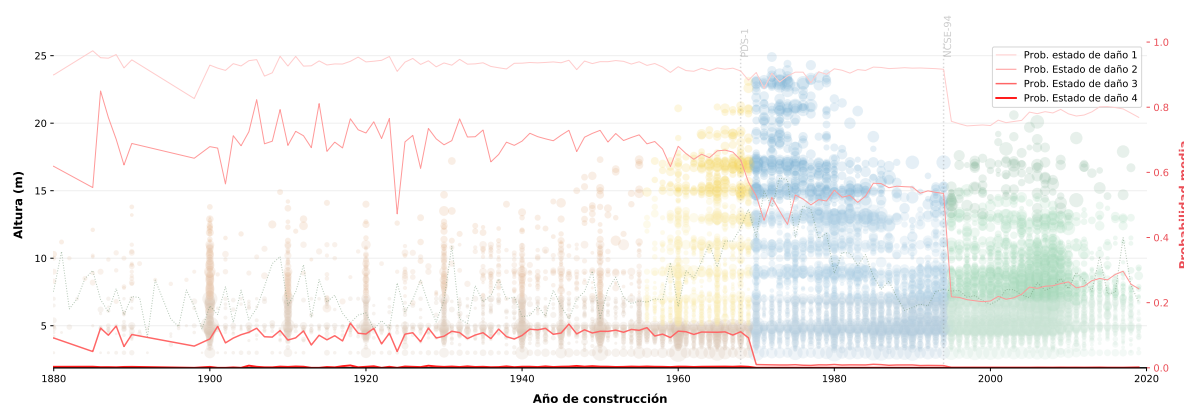


Figura 5.6: Año de construcción de la vivienda frente a altura, el tamaño del punto se refiere a su superficie construida. En el eje vertical derecho se muestra el estado de daños.

El decrecimiento de las probabilidades de cada estado de daños es coherente con la fecha de entrada en vigor de las diferentes normativas: la probabilidad de que presenten estado de daños completo o extenso se reduce para los edificios construidos en los años siguientes a la publicación de la PGS-1, tendiendo a una probabilidad casi nula de ambos estados que se completa con la promulgación de la NCSE-94. El estado de daños moderado se reduce de forma notable en el periodo de vigencia de la PGS-1 y PDS-1, aún manteniéndose en un valor cercano al 50 % de probabilidad. La probabilidad de presentar estados de daño moderado y leve descienden significativamente con la publicación de la NCSE-94, llegando a situarse en 20 % la probabilidad de edificios sin daños. Aún con este descenso, la probabilidad de daño moderado sigue rondando el 20 %, cuestión que se debe a las deformaciones plásticas debidas a la aplicación de coeficientes de reducción de formas sísmicas por ductilidad.

Se incluyen en la figura 5.7 histogramas de los estados de daño más frecuentes para cada tipología. El estado de daños completo únicamente se alcanza, con una probabilidad mínima, en algunos edificios diseñados de acuerdo a la MV-101 o anteriores a la misma. La cantidad de veces que aparece el estado de daños extenso, como se podía observar en la figura 5.6, no es significativa para cualquier edificio construido

con normativa NCSE-94 o NCSE-02, y no supera el 2 % para edificios acordes a la normativa PGS-1 o PDS-1. El estado de daños moderado es el que más aparece para las categorías HCODE.RC.M, MCODE.RC.L, MCODE.RC.L y PCODE.MA.L.

Con respecto a los materiales de cada tipología, los edificios de fábrica (PCODE.MA) son especialmente vulnerables, pues el desplome que tienen asociado a cada estado de daños es inferior al que se asocia a los edificios de hormigón, como se puede ver en la tabla 4.4. Como consecuencia, sobre el total de estados de daño de este material existe una probabilidad superior al 40 % de encontrarse con un estado de daños moderado o extenso tras el sismo, llegando esta probabilidad a más del 70 % en edificios de fábrica de baja altura. En cuanto a las tipologías de hormigón, el número de veces que aparecen los estados de daño sano y leve aumenta de forma considerable con respecto a las tipologías de fábrica, siendo superior en todos los casos al 50 % y superando el 65 % de probabilidad en edificios de gran o media altura. En edificios de pórticos de hormigón armado únicamente se alcanza el estado de daños extenso de forma reseñable en edificios prenormativos, donde alcanza un valor entre el 5 % y el 10 %, algo inferior a la probabilidad de daño extensivo en edificios de fábrica.

En el plano 04 (anexo, página 54) se ha representado la moda del estado de daños de cada edificio, aunque la representación obtenida no refleja si ha sido modificado estructuralmente en algún momento de su historia. Se puede observar un fragmento del plano en la figura 5.8, centrado en la ciudad de Granada, en el que se muestra como la mayor parte de los edificios del centro de Granada tienen como daño representativo el daño moderado. El daño extensivo se concentra en zonas vinculadas al crecimiento de la ciudad durante el periodo prenorma, especialmente en los edificios de gran altura de este periodo. Además, se aprecia que parte de los añadidos más recientes de la ciudad se quedan con un estado de daños leve como valor representativo.

En la figura 5.9 se puede observar el fragmento del plano 04 correspondiente a los municipios de Las Gabias y Cúllar Vega, en los que la incidencia por barrios está más marcada que en el centro. Esta cuestión está vinculada con el ya mencionado crecimiento con zonas de baja densidad en periodo de vigencia de la NCSE-94 o NCSE-02, en las que el estado de daños representativo es leve en la mayor parte de casos.

En la figura 5.10 se puede observar el porcentaje de veces que aparece cada estado de daños según el número de plantas de los edificios. El estado sin daños aparece aproximadamente el 10 % de las veces en las categorías inferiores a 7 plantas y alcanza casi el 40 % en las categorías de 8 y 9 o más plantas. Una situación similar sucede para el estado de daños leve, que tiene más probabilidad de aparición cuanto más alto es el edificio, alcanzando su máxima probabilidad en los edificios de 6 plantas, de lo que se infiere que edificios más altos tienen más probabilidad de no tener daños o alcanzar un estado de daños leves.

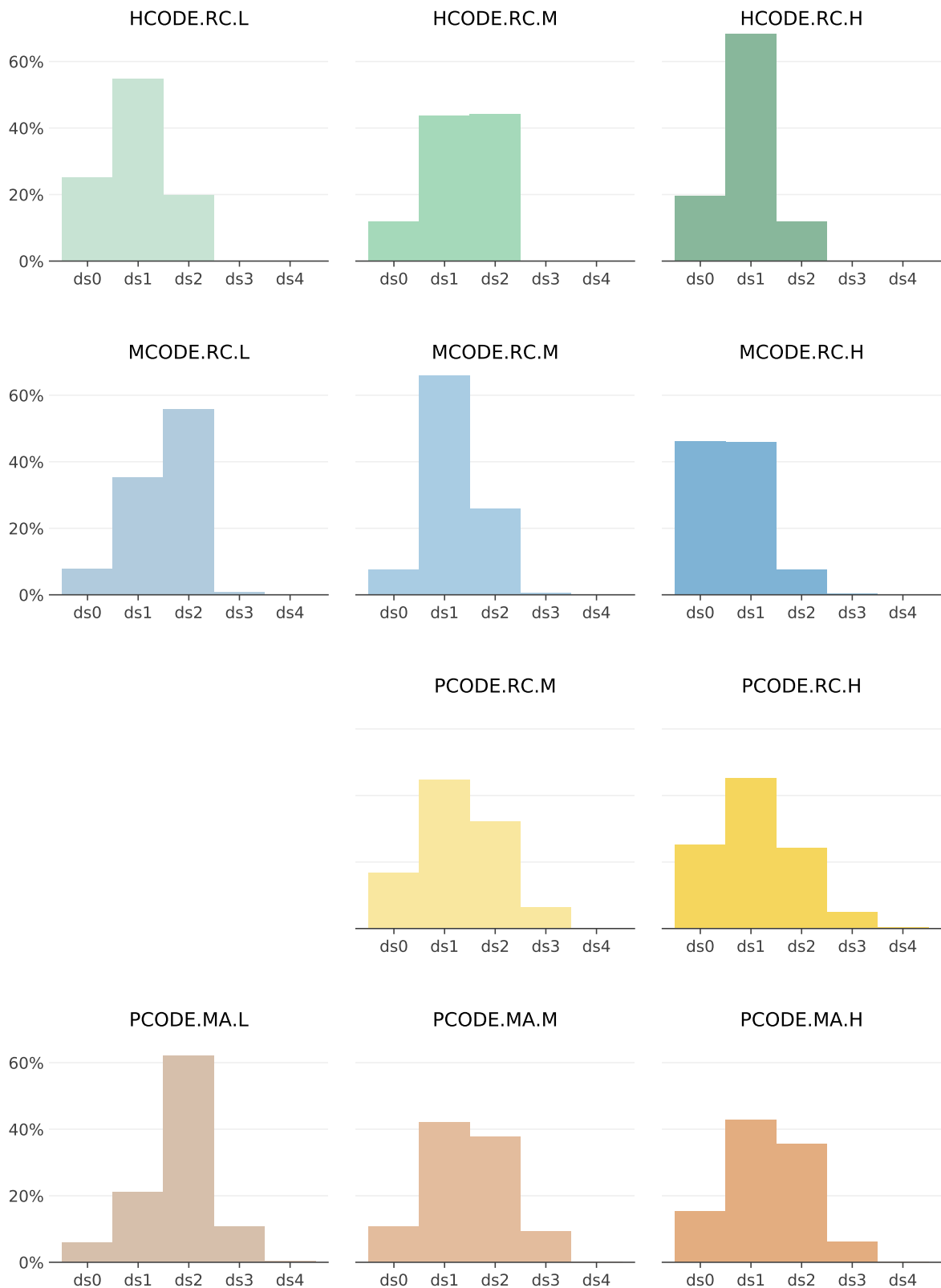


Figura 5.7: Porcentaje apariciones de cada estado de daños por categorías en la simulación probabilística.

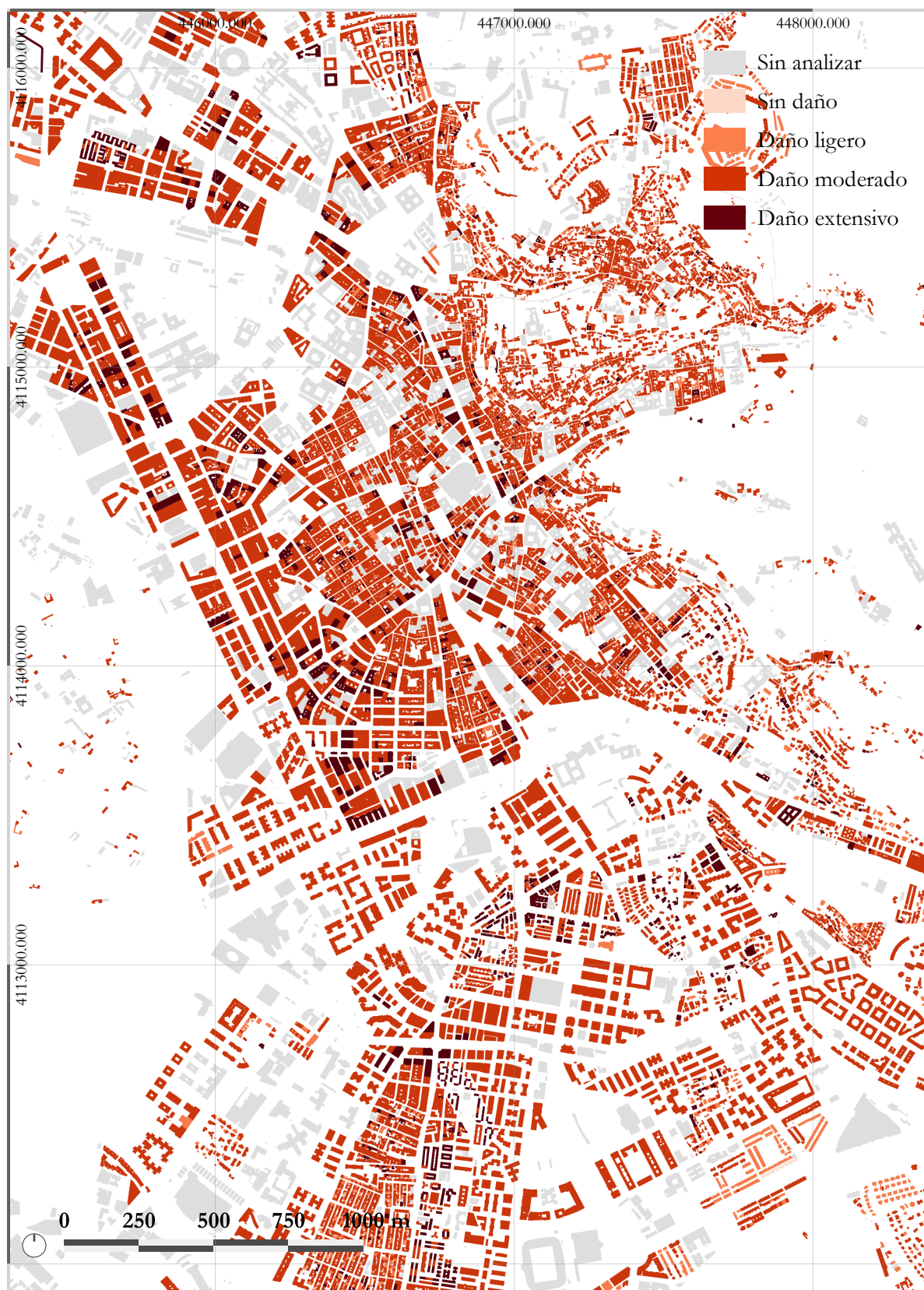


Figura 5.8: Fragmento plano 04: estado de daños representativo (Granada)

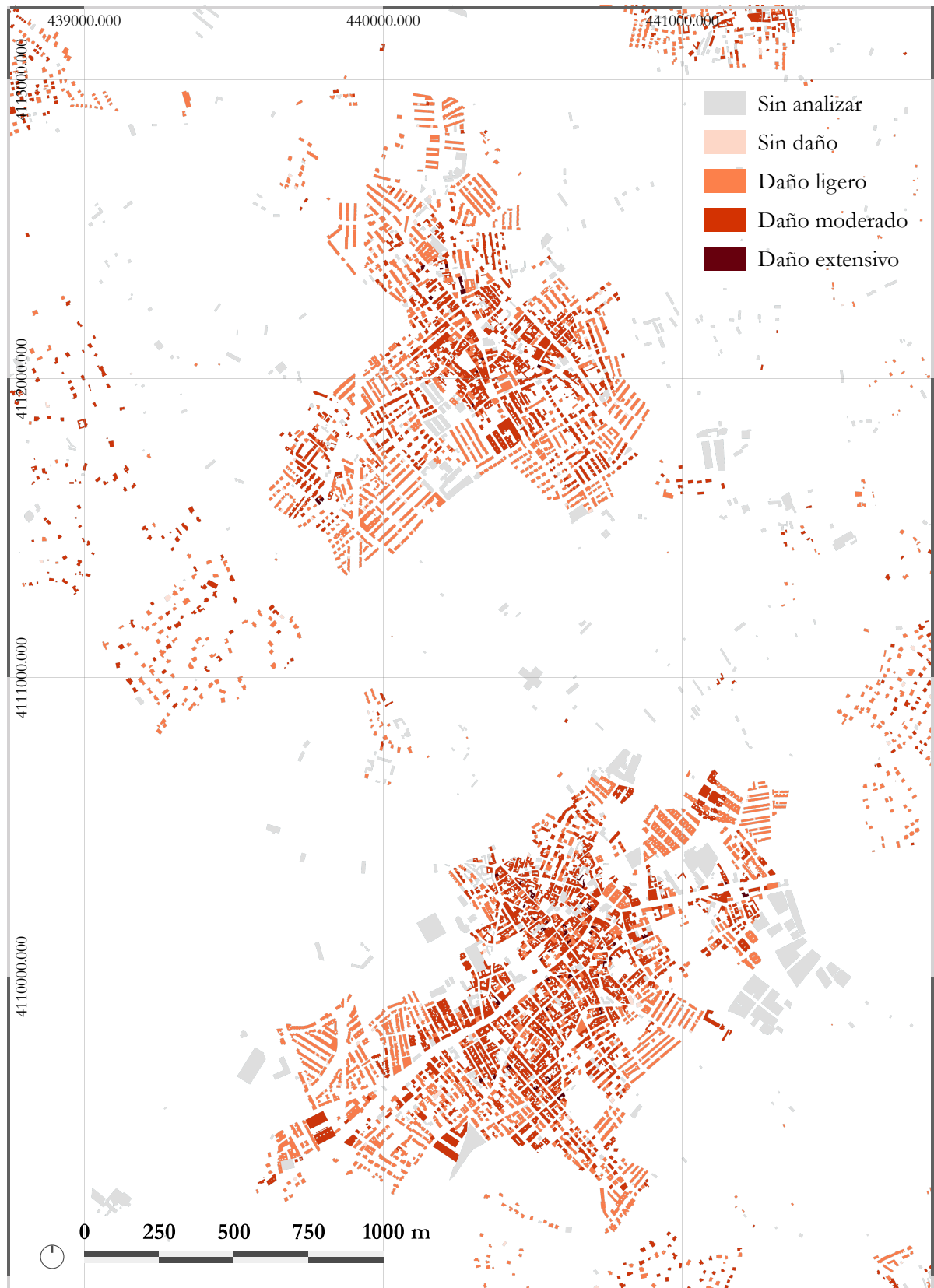


Figura 5.9: Fragmento plano 04: estado de daños representativo (Las Gabias y Cúllar Vega)

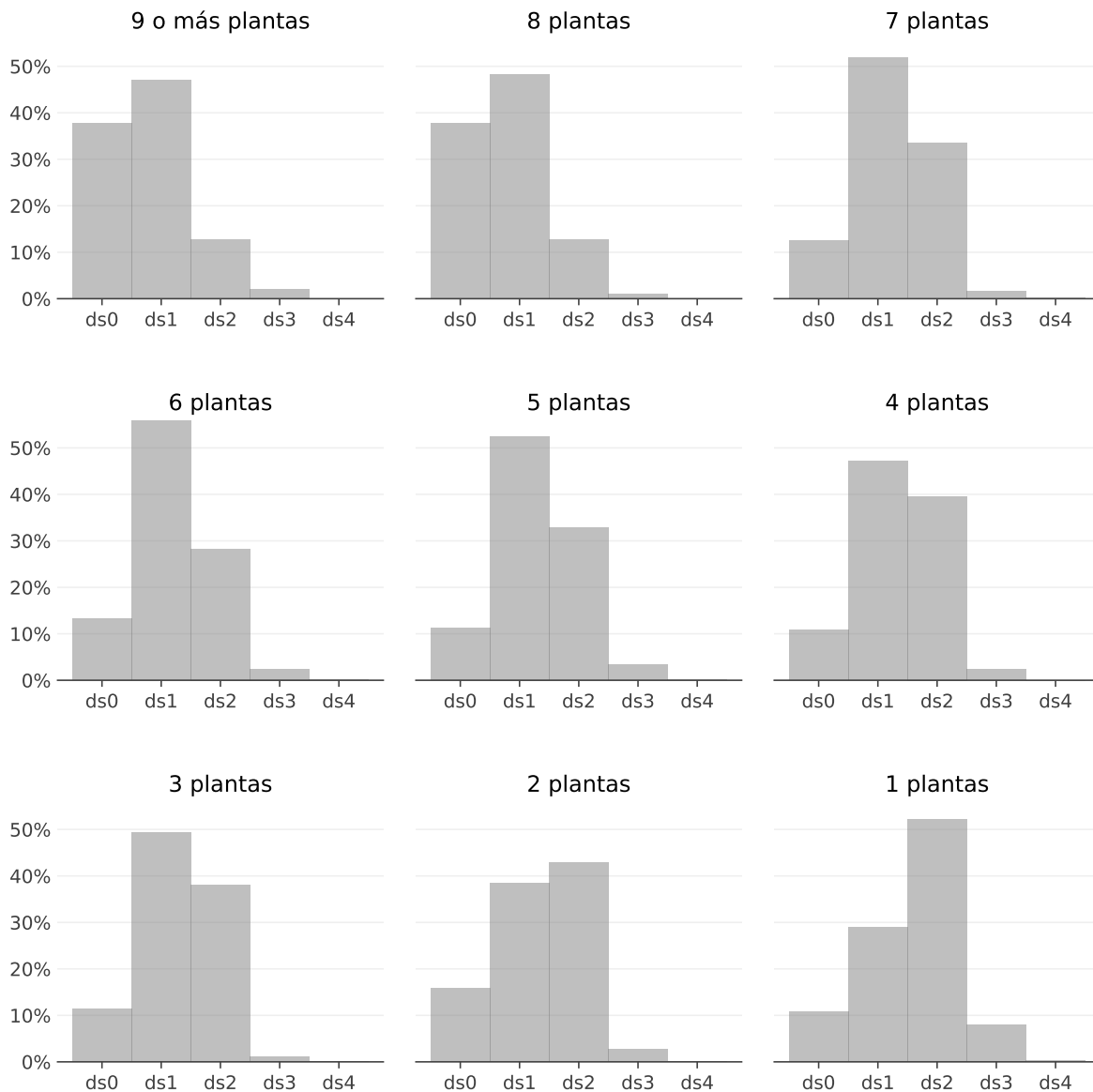


Figura 5.10: Incidencia de los estados de daño por número de plantas

Otro resultado de la figura 5.10 es que la incidencia del estado de daños moderado se reduce gradualmente cuando los edificios ganan altura, desde un 52,2% en los edificios de una planta hasta 12,8% para edificios de 9 o más plantas. El estado de daños extenso no supera en ninguna categoría de alturas el 10%, con un máximo del 7,9% de estados de daño producidos en los edificios de una planta. En cuanto al estado de daños completo, no se produce en ninguna categoría de forma significativa.

6

Conclusiones

Este Trabajo Fin de Grado presenta una evaluación del comportamiento de los edificios del Área metropolitana de Granada, obteniendo como resultado los estados de daños más probables ante la acción del terremoto definido por el EC-8 para un periodo de retorno de 475 años en Granada. Se ha empleado un procedimiento robusto para la caracterizar el comportamiento lateral de la estructura, basado en asignar a cada edificio una curva de capacidad probabilista. Aplicando la metodología propuesta en el anexo B del EC-8 se obtiene una estimación de la deformación lateral del edificio. La estimación de daño se realiza asignando un nivel de daño a los rangos de deformaciones en función de la tipología estructural.

Los sistemas de información geográfica y las aplicaciones de *big data* son herramientas eficaces para implementar metodologías de evaluación sismorresistente a diversas escalas. Gracias a estas potentes herramientas informáticas ha sido posible realizar un modelo probabilista de la capacidad estructural de los 106.134 edificios del Área Metropolitana con 5.3 millones de estimaciones estadísticas de daño.

La tipología estructural predominante en el área metropolitana de Granada es la estructura porticada de hormigón armado, que representa un 88.6 % de la superficie total construida. El resto de edificios están realizados con estructuras de fábrica, en su mayor parte prenormativas. El 66.0 % de los edificios están realizados con estructura de hormigón armado y tienen baja altura (menor de tres plantas). Los edificios con estructura de hormigón armado de media altura representa el 32.2 % de la superficie total construida.

Los edificios con daños más graves se concentran en la ciudad de Granada, que cuenta con un número importante de viviendas prenormativas e históricas. Los daños moderados y extensos son generalizados en el centro histórico y los ensanches de la ciudad, con excepción de las zonas periféricas construidas a partir de mediados de la década de los 1990. En contraste, el resto del área metropolitana es de construcción más reciente y la mayor parte de los edificios se mantienen con niveles de daño menores, con predominancia de los daños ligeros con la excepción del centro histórico de los municipios.

El hecho de que las normativas hayan sido cada vez más restrictivas tiene consecuencias positivas en las prestaciones sismorresistentes de los edificios más recientes. Esto queda patente en la disminución paulatina de daños graves a lo largo del tiempo. Comparando los daños en edificios prenormativos y recientes, se observa una importante reducción de la vulnerabilidad y de la ocurrencia de daños extensivos y completos. Sin embargo, los criterios de proyecto sismorresistente basado en la capacidad siempre implican la aparición de cierto nivel de daños sísmicos, como por ejemplo los daños moderados observados en los edificios de media altura proyectados con la NCSE-94 y NCSE-02.

La resultados de este trabajo son de interés para predecir la magnitud de los daños sísmicos, el número de víctimas y los costes de reparación. Además tienen utilidad en planificar estrategias de reacondicionamiento sísmico y actuaciones de protección civil y de emergencias. En este sentido, es necesario priorizar medidas de protección de las zonas más vulnerables y con mayor densidad de ocupación. La metodología resulta fácilmente aplicable a aglomeraciones urbanas con características similares como el Área Metropolitana de Málaga y Almería.

Una limitación de este trabajo es que representa la estructura de los edificios con un modelo simplificado. Por tanto, no se tienen en cuenta las consecuencias de efectos perniciosos en las estructuras como los pilares cortos, el golpeteo entre edificios, plantas débiles, etc. A este respecto, la estimación de daño de este trabajo se entiende conservadora. Como línea de trabajo futura, la metodología podría implementar una mejor estimación de capacidad teniendo en cuenta estos factores, así como incluir en la evaluación de la vulnerabilidad otros parámetros significativos como la irregularidad en planta, los efectos locales del suelo, o el estado de conservación.

Bibliografía

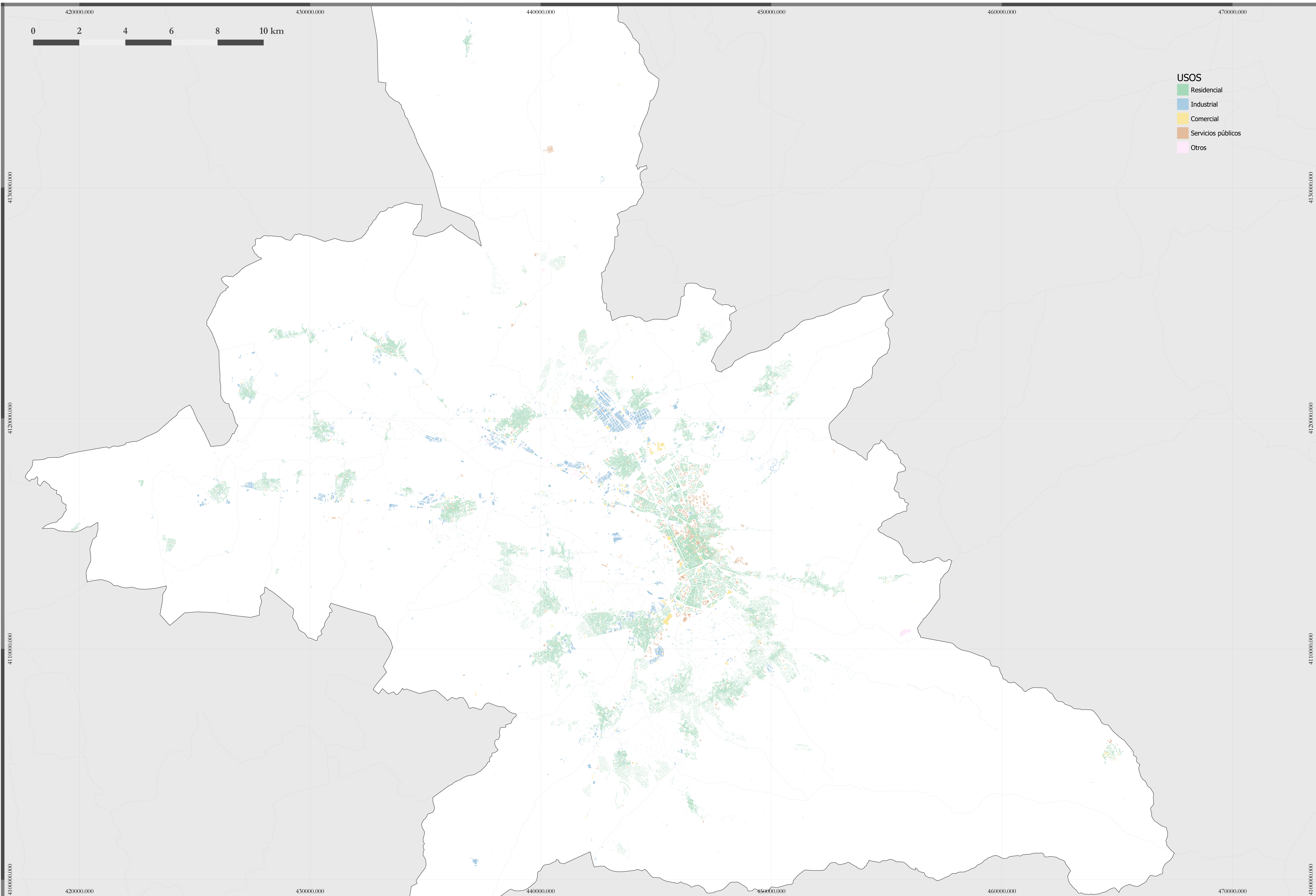
Bibliografía

- [1] M. Feriche Fernández-Castanys, *Elaboración de escenarios de daños sísmicos en la ciudad de granada*, (2013).
- [2] M. Benito, M. Navarro, F. Vidal, J. Gaspar-Escribano, M. García-Rodríguez, and J. Martínez-Solares, *A new seismic hazard assessment in the region of andalusia (southern spain)*, *Bulletin of earthquake engineering* **8**, 739 (2010).
- [3] Instituto Geográfico Nacional, *Catálogo de terremotos*, Recurso digital, recuperado de <https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos>.
- [4] Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, *Nomenclátor de entidades y núcleos de población de andalucía*, Junta de Andalucía (2019).
- [5] Dirección General del Catastro, *Datos y servicios de INSPIRE (IDEE)*, (Recuperado el 19/03/2020).
- [6] J. Fernández-García, *De la figuración a la abstracción. Arquitectura en Granada, 1950* (Universidad de Granada, 2005).
- [7] Ministerio de la Vivienda, *Norma MV-101/1962, Acciones en la edificación*, BOE, 09/02/1963 (1968).
- [8] Ministerio de Planificación del Desarrollo, *Norma sismorresistente P.G.S.-1*, Comisión Interministerial de la Presidencia del Gobierno (1968).
- [9] Ministerio de Planificación del Desarrollo, *Norma sismorresistente P.D.S.-1, parte A*, Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes (1974).
- [10] Ministerio de Fomento, *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación (NCSE-02)*, Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica-Ministerio de Fomento: Madrid, Spain (2002).
- [11] B. Benito, J. Gaspar-Escribano, A. Rivas-Medina, S. Ruiz, L. Cabañas, and J. M. Solares, *Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012.*, edited by I. G. Nacional (Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2013) pp. 101–255.

- [12] N. Lantada, L. G. Pujades, and A. H. Barbat, *Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. a comparison*, *Natural Hazards* **51**, 501 (2009).
- [13] S. Martínez-Cuevas, B. Benito, J. Cervera, M. Morillo, and M. Luna, *Urban modifiers of seismic vulnerability aimed at urban zoning regulations*, *Bulletin of Earthquake Engineering* , 1 (2017).
- [14] S. Lagomarsino and S. Giovinazzi, *Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings*, *Bulletin of Earthquake Engineering* **4**, 415 (2006).
- [15] P. Fajfar, *Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra*, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **28**, 979 (1999).
- [16] A. W. Coburn, R. J. Spence, and A. Pomonis, *Factors determining human casualty levels in earthquakes: mortality prediction in building collapse*, in *Proceedings of the tenth world conference on earthquake engineering*, Vol. 10 (Balkema Rotterdam, 1992) pp. 5989–5994.
- [17] R. Vacareanu, D. Lungu, A. Aldea, and C. Arion, *Seismic risk scenarios handbook, an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns*, *Risk-UE WP* **7**, 68 (2004).
- [18] H.-M. MR, *Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model*, Department of Homeland Security, FEMA, Washington, DC (2003).
- [19] C. A. Kircher, R. V. Whitman, and W. T. Holmes, *Hazus earthquake loss estimation methods*, *Natural Hazards Review* **7**, 45 (2006).
- [20] P. Mouroux and B. Le Brun, *Presentation of risk-ue project*, *Bulletin of Earthquake Engineering* **4**, 323 (2006).
- [21] Z. Milutinovic and G. Trendafiloski, *WP04: vulnerability of current buildings handbook. RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*, Contract No. EVK4-CT-2000-00014, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology (IZIIS), Skopje (2003).
- [22] G. Grüntal, *European macroseismic scale*, Conseil de L, Europe, Chaiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, Tech. Rep (1998).
- [23] N. Lantada, *Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. (Universitat Politècnica de Catalunya, 2007).

- [24] A. Guardiola-Víllora and L. Basset-Salom, *Earthquake risk scenarios of the Ciutat Vella District in Valencia, Spain*, *Bulletin of Earthquake Engineering* **18**, 1245 (2020).
- [25] B. Gencturk and A. Elnashai, *Development and application of advanced capacity spectrum method*, *Engineering Structures* **30**, 3345 (2008).
- [26] P. Fajfar and P. Gašperšič, *The n2 method for the seismic damage analysis of rc buildings*, *Earthquake engineering & structural dynamics* **25**, 31 (1996).
- [27] A. Rivas-Medina, J. M. Gaspar-Escribano, B. Benito, and M. A. Bernabé, *The role of gis in urban seismic risk studies: application to the city of almería (southern spain)*, *Natural Hazards and Earth System Sciences* **13**, 2717 (2013).
- [28] S. Anagnostopoulos, C. Providakis, P. Salvaneschi, G. Athanasopoulos, and G. Bonacina, *Seismocare: An efficient gis tool for scenario-type investigations of seismic risk of existing cities*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **28**, 73 (2008).
- [29] C. E. de Estandarización, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*, Brussels: European Committee for Standardization (2005).

Anexos



- USOS**
- Residencial
 - Industrial
 - Comercial
 - Servicios públicos
 - Otros

