

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y
Cartografía



**Ensayo y aplicación de técnicas
geoespaciales para la estimación del
riesgo sísmico en un edificio de acero**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

María del Rocío Romero Jarén

Máster Universitario en Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en
Topografía, Geodesia y Cartografía

Doctorado en Ingeniería Geomática

**Ensayo y aplicación de técnicas
geoespaciales para la estimación del
riesgo sísmico en un edificio de acero**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

María del Rocío Romero Jarén

Máster Universitario en Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica

Bajo la dirección de:

Dra. María Belén Benito Oterino (Director)

Dr. José Juan Arranz Justel (Director)

Madrid, 2024

Título: Ensayo y aplicación de técnicas geoespaciales para la estimación del riesgo sísmico en un edificio de acero

Autor: María del Rocío Romero Jarén

Programa de Doctorado: Ingeniería Geomática

Dirección de tesis:

Dra. María Belén Benito Oterino, Catedrática de la Universidad Politécnica de Madrid (Directora)

Dr. José Juan Arranz Justel, Profesor titular de la Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por la Comunidad de Madrid, en el marco de una ayuda para la realización de doctorado industrial (referencia de proyecto: IND2017/TIC- 7869) y la empresa Geolyder S.L, España, NIF: B86901543.

A mi familia: Mamá, Papá, Pablo, Martín, Bea, Violeta y Lucía,
por apoyarme y alegrarme día a día.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a mis tutores, Dra. María Belén Benito Oterino y Dr. José Juan Arranz Justel, por su dedicación, apoyo y orientación a lo largo de todo el proceso de esta tesis doctoral. Su invaluable conocimiento ha sido fundamental para crear y desarrollar todo el trabajo llevado a cabo.

Por otro lado, quiero reflejar un agradecimiento especial a mi amiga y compañera, la Dra. Laura Navas Sánchez. Laura ha sido un sólido soporte en todo momento, brindándome aliento y valor para seguir adelante. Su paciencia y serenidad han sido un bálsamo en los momentos de adversidad, y su entusiasmo por la investigación ha sido contagioso.

También quiero agradecer al Dr. Jaime Cervera Bravo y Dr. Miguel Marchamalo Sacristán, quienes han formado parte del tribunal de tesis y del tribunal de prelectura. Su exhaustivo análisis de mi trabajo y sus críticas constructivas fueron de un valor incalculable. Gracias a sus comentarios, pude mejorar mi investigación al máximo. También quiero agradecer a mi tía, la Dra. María del Carmen Jarén Ceballos, por aportar rigor y valor a mi trabajo.

Asimismo, deseo expresar mi gratitud a la Dra. Sandra Martínez Cuevas, al Dr. Emrah Erduran, al Mtr. Carlos José Gamboa Canté y a D. Pedro Cano Fernández por su ayuda durante diferentes etapas de la tesis. Sus aportaciones han sido fundamentales para completar mi tesis.

Por supuesto, no puedo dejar de mencionar a mis compañeras de despacho y amigas: la Dra. Ligia Elena Quirós Hernández y la Mtr. Sandra Ruíz Barajas. Desde el principio, me brindaron su apoyo y estímulo para iniciar esta travesía doctoral, compartieron generosamente sus conocimientos y me han acompañado en cada paso hasta el final de este camino.

También quiero agradecer a Geolyder S.L. y a la Comunidad de Madrid por la ayuda concedida para la realización del Doctorado Industrial (referencia de proyecto: IND2017/TIC- 7869).

Por último, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia. Han sido mi faro cuando lo he necesitado, brindándome un apoyo incondicional incluso en la distancia y en silencio. Siempre han creído en mí y en mi capacidad para superar los desafíos, pero también sé que me habrían respaldado si en algún momento hubiera decidido rendirme. Han dedicado su tiempo para que pudiera avanzar en este camino sin juzgarme en lo más mínimo. Quiero hacer especial mención a Martín, mi compañero de aventuras, sin tu inmenso apoyo, no habría sido posible llevar a cabo todo este trabajo.

Abstract

The current doctoral thesis focuses on innovating seismic risk assessments methods in buildings of special importance through the use of geospatial techniques. The main objective is to generate damage scenarios at a local scale for a building of special importance, ultimately aiming to enhance the definition of the vulnerability of these buildings by applying automation in the phase of geometric modelling from point clouds.

The manuscript is divided into three main blocks. The first details the introduction to the research topic and an exhaustive analysis of the state of the art. The second block includes the methodology, research development, and results obtained. This block constitutes the most extensive and substantial part of the research. It is divided into four chapters. The first chapter, Chapter 3 of the thesis, on one hand, presents the developed algorithm, ABM-indoor, as a tool for automating the modelling of buildings from point clouds. On the other hand, includes the methodology to be followed for seismic risk assessments in buildings of special importance based on the calibration of the building model. The following three chapters constitute the application of all the concepts presented in Chapter 3. Chapter 4 presents the application of ABM-indoor to two different indoor scenarios: a parking lot and an office. Chapter 5 includes the application for seismic risk assessment in a manually modelled building of special importance. Finally, Chapter 6 presents the combination of the two previous applications: the use of ABM-indoor for defining the geometric model of a building of special importance (the same building used in Chapter 4) and seismic risk estimation for that building based on the calibrated model. Lastly, the third block of the thesis contains the general conclusions of the study and future lines of research.

The application of the proposed methodology in this doctoral thesis has provided very positive results that validate the research. On one hand, ABM-indoor is an algorithm capable of automatically segmenting and modelling organized and unorganized point clouds from the interior and exterior of buildings. This algorithm has proven to be efficient and accurate in modelling buildings, providing detailed 3D models that are essential for conducting seismic risk assessments. On the other hand, the proposed methodology for seismic risk estimation based on the calibrated building model suggests that this approach could be extrapolated to larger-scale studies, encompassing a greater number of buildings, such as an entire city.

Resumen

La presente tesis doctoral se centra en innovar en los métodos de estimación del riesgo sísmico en edificaciones de importancia especial mediante el uso de técnicas geoespaciales. El objetivo principal es generar escenarios de daño a escala local, para un edificio de importancia especial, con el fin último de mejorar la definición de la vulnerabilidad de estos edificios mediante la aplicación de automatismos en la fase de modelización geométrica a partir de nubes de puntos.

La estructura de la tesis se divide en tres bloques principales. El primero abarca una introducción detallada al tema de investigación y un análisis exhaustivo del estado del arte. El segundo bloque incluye la metodología, desarrollo de la investigación y resultados obtenidos. Este bloque constituye la parte más extensa y sustancial de la tesis doctoral. Está dividido en cuatro capítulos. El primer capítulo, Capítulo 3 de la memoria, por un lado, presenta el algoritmo desarrollado, ABM-indoor, como herramienta para la automatización de la modelización de edificios a partir de nubes de puntos. Por otro lado, define la metodología a seguir para la estimación del riesgo sísmico en edificios de importancia especial a partir de la calibración del modelo del edificio. Los tres capítulos siguientes constituyen la aplicación de todo lo expuesto en el Capítulo 3. El Capítulo 4 presenta la aplicación de ABM-indoor a dos escenarios interiores distintos: un aparcamiento y una oficina. El Capítulo 5 incluye la aplicación para la estimación de riesgo sísmico en un edificio de importancia especial modelado de forma manual. Por último, el Capítulo 6 presenta la combinación de las dos aplicaciones anteriores: uso de ABM-indoor para la definición del modelo geométrico de un edificio de importancia especial (mismo edificio que se ha usado en el Capítulo 4) y estimación del riesgo sísmico para ese edificio a partir del modelo calibrado. Por último, el tercer bloque de la memoria contiene las conclusiones generales del estudio y las futuras líneas de investigación.

La aplicación de la metodología propuesta en la presente tesis doctoral ha proporcionado resultados muy positivos que validan la investigación. Por un lado, ABM-indoor es un algoritmo capaz de segmentar y modelar automáticamente nubes de puntos organizadas y no organizadas del interior y exterior de edificios. Este algoritmo ha demostrado ser eficiente y preciso en la modelización de edificaciones, proporcionando modelos 3D detallados que son fundamentales para realizar análisis de riesgo sísmico. Por otro lado, la metodología propuesta para la estimación del riesgo sísmico a partir del modelo calibrado del edificio sugiere que este enfoque podría extrapolarse a estudios a mayor escala, abarcando un mayor número de edificios, como una ciudad entera.

Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Resumen</i>	<i>v</i>
<i>Tabla de Contenido</i>	<i>vi</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xiv</i>
<i>Abreviaturas y acrónimos</i>	<i>xvi</i>
Bloque I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Motivación.....	3
1.2. Objetivos	7
1.3. Alcance del estudio y antecedentes	8
1.4. Estructura de la tesis	10
1.4.1. Bloque I.....	10
1.4.2. Bloque II.....	11
1.4.3. Bloque III	13
1.4.4. Bloque IV.....	13
1.4.5. Bloque V	13
Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1. Evaluación del riesgo sísmico.....	15
2.2. Técnicas geoespaciales aplicadas a la estimación de la vulnerabilidad sísmica	26
2.3. Técnicas geoespaciales aplicadas a los modelos tridimensionales de edificios, BIM	27
2.4. <i>Retrofitting</i> en edificios.....	34
Bloque II. METODOLOGÍA, DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN Y RESULTADOS	37
Capítulo 3. PROPUESTA METODOLÓGICA	39
3.1. Uso y aplicación de técnicas geoespaciales para la modelización automática de edificios.....	39
3.1.1. Introducción. ABM-indoor	40
3.1.2. Objetivos	41
3.1.3. Metodología	42
3.2. Estimación del riesgo sísmico en un edificio de importancia especial	54
3.2.1. Estimación de la peligrosidad sísmica.....	55
3.2.2. Definición de la vulnerabilidad sísmica	61
3.2.3. Estimación del daño en un edificio de importancia especial.....	65

Capítulo 4. APLICACIÓN METODOLÓGICA I. USO DE TÉCNICAS GEOESPACIALES PARA LA MODELIZACIÓN AUTOMÁTICA DE EDIFICIOS.....	68
4.1. Fuente de datos	68
4.2. Resultados experimentales y discusión	70
4.3. Resumen y conclusiones	77
Capítulo 5. APLICACIÓN METODOLÓGICA II. ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN UN EDIFICIO DE IMPORTANCIA ESPECIAL	80
5.1. Estimación de la peligrosidad sísmica	80
5.1.1. Introducción.....	80
5.1.2. Análisis probabilista de la peligrosidad sísmica	83
5.1.3. Resultados experimentales y discusión	89
5.1.4. Resumen y conclusiones	95
5.2. Estimación del riesgo sísmico en un edificio de importancia especial. Modelización manual	97
5.2.1. Definición de la vulnerabilidad sísmica	97
5.2.2. Estimación del riesgo sísmico	118
5.2.3. Resumen y conclusiones	120
Capítulo 6. APLICACIÓN METODOLÓGICA III. ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN UN EDIFICIO DE IMPORTANCIA ESPECIAL MODELADO DE FORMA SEMIAUTOMÁTICA.....	124
6.1. Definición del modelo del edificio de forma semiautomática	124
6.2. Resultados experimentales y discusión.....	127
6.3. Resumen y conclusiones	133
Bloque III. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	135
Capítulo 7. CONCLUSIONES GENERALES.....	137
Capítulo 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	144
Bloque IV. BIBLIOGRAFÍA.....	147
BIBLIOGRAFÍA	148
Bloque V. ANEXOS	159
ANEXOS.....	160
I. Resultados del ajuste de mínimos cuadrados de los elementos planos clasificados en las nubes de puntos.....	160
II. Planos arquitectónicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid	163
III. Publicaciones de artículos científicos.....	169
IV. Contribución en congresos nacionales e internacionales.....	170

V. Premios	171
------------------	-----

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema sobre el contenido y la interrelación entre los capítulos cuatro, cinco y seis.	11
Figura 2. Concepto de riesgo sísmico compuesto por cuatro variables: peligrosidad, vulnerabilidad, exposición y densidad y coste.	16
Figura 3: Combinación de punto de desempeño con curvas de fragilidad asociadas a un edificio específico para obtener probabilidades de daño.....	26
Figura 4: Flujo de trabajo de ABM-indoor.....	43
Figura 5: Ejemplo del proceso de clasificación de la nube de puntos para suelos y techos. Las paredes aparecen en gris porque están fuera del alcance de la figura.	45
Figura 6: Ejemplo de la clasificación de suelos y techos (seis clases).	46
Figura 7: Ejemplos de polígonos regulares (a) y polígonos irregulares (b). Se especifican las áreas (A_p) y perímetros (P_p) de los polígonos.	46
Figura 8: Ejemplo del flujo de trabajo del suavizado de bordes mostrando el polígono existente (a) y el polígono ajustado sin los nodos 5 y 6 (b).....	48
Figura 9: Esquema del ajuste de planos verticales. El plano rojo (Ψ) denota el plano final que se ajusta de manera óptima al clúster específico de puntos.	49
Figura 10: Transformación tridimensional de Helmert aplicada para proyectar las superficies y puntos horizontales.....	50
Figura 11: Ejemplo de los espacios en suelo y techo como resultado de las conexiones de los soportes entre ambos elementos horizontales. El plano gris representa el suelo y el plano verde representa el techo.	51
Figura 12: Flujo de trabajo del algoritmo de tetraedrización (Arranz, 2013).	53
Figura 13: Pseudocódigo del algoritmo de tetraedrización.	54
Figura 14: Esquema del método probabilista zonificado de estimación de peligrosidad.....	58
Figura 15: Ejemplo de la representación gráfica de la desagregación de la peligrosidad.....	60
Figura 16: Imágenes a color de muestra de las nubes de puntos del estacionamiento (a) y oficina (B). Se eliminaron algunas paredes y techos de las nubes de puntos para facilitar la visualización de los elementos interiores.....	70

Figura 17: Clasificación de la nube de puntos del estacionamiento (a) y de la oficina (b). Se eliminó el techo para facilitar la visualización.....	71
Figura 18: Muestra de resultados obtenidos para la segmentación automática en el estacionamiento. El color verde denota objetos ubicados en el suelo. Se eliminaron el techo y las paredes para facilitar la visualización.....	71
Figura 19: Direcciones principales en el estacionamiento (a): X en naranja, Y en verde, Z es altura; Y direcciones principales de la oficina (b): X en naranja, Y en verde, J en rosa, K en azul y Z es altura. Se eliminó el techo de la nube de puntos para facilitar la visualización.....	72
Figura 20: Resultados de una triangulación 3D para un automóvil de la nube de puntos del estacionamiento. Las dos imágenes superiores representan un conjunto clasificado como un automóvil (izquierda - color registrado y derecha - color de clase). La imagen inferior es el volumen del automóvil después de la tetraedrización	73
Figura 21: Disposición típica de matriz de confusión.....	74
Figura 22: Gráfica ROC que muestra los clasificadores discretos a partir de la matriz de confusión del estacionamiento.....	75
Figura 23: Gráfica ROC que muestra los clasificadores discretos a partir de la matriz de confusión de la oficina.....	76
Figura 24: Mapa de localización de la Terminal portuaria de Los Barrios Endesa generación S.A, donde se considera ubicado el edificio de estudio.....	82
Figura 25: Esquema de árbol lógico empleado en el cálculo de peligrosidad sísmica. Los pesos asignados a cada rama se indican en paréntesis.....	89
Figura 26. Espectros de respuesta uniforme (UHS) con efecto local obtenidos tras el estudio de peligrosidad sísmica en el proyecto de Los Barrios para los periodos de retorno 475 y 975 años.....	90
Figura 27. Localización de los sismos asociados a los escenarios específicos derivados del estudio de desagregación de la peligrosidad sísmica.....	92
Figura 28: Espectro específico para el escenario 1 (PR 975 años) estimados en base al estudio probabilista de la peligrosidad sísmica (verde) y espectro según NCSE-02 (granate).	93
Figura 29: Espectro específico para el escenario 2 (PR 975 años) estimados en base al estudio probabilista de la peligrosidad sísmica (verde) y espectro según NCSE-02 (granate).	94

Figura 30: Espectro específico para el escenario 2 (PR 975 años) estimados en base al estudio probabilista de la peligrosidad sísmica (verde) y espectro según NCSE-02 (granate).	94
Figura 31. Espectro UHS para PR 975 años y específicos para los tres escenarios sísmicos derivados del estudio de peligrosidad sísmica en Los Barrios.....	95
Figura 32: Espectro UHS para PR 975 años y espectro según NCSE-02 para un coeficiente de importancia especial de 1.3 y un coeficiente del terreno igual a 2.....	96
Figura 33: Espectro considerado para el estudio de riesgo sísmico asociado a un PR 975 años e incluyendo el efecto local.	97
Figura 34. Fotografía exterior del edificio de la ETSITGC de la UPM (UPM).....	98
Figura 35: Modelo estructural del edificio ETSITGC creado en SAP2000. A la izquierda, se muestra la fachada este (fachada principal del edificio) y, a la derecha, la fachada oeste (fachada trasera del edificio).	100
Figura 36. Vista en planta del edificio donde se muestran los cuatro módulos y las juntas de dilatación (amarillo).	101
Figura 37. Vistas de Mod1: arriba se muestra la vista 3D; abajo se muestran los alzados, fachada oeste en azul y fachada sur en verde; y la planta en naranja.....	102
Figura 38. Vista en alzado de Mod1 mostrando los modos de vibración principales para cada una de las direcciones horizontales.....	103
Figura 39. Imagen de la campaña de campo de medidas de vibración ambiental utilizando un sensor de velocidad portátil 3D Tromino.	104
Figura 40. Distribución de los puntos de medida de vibración ambiental.	104
Figura 41. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1 considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 1977 con el edificio situado en Madrid: MV 101-1962, MV 103-1975 y PDS-I 1974. Escenario ER1.	111
Figura 42. Espectro de respuesta en régimen estático lineal equivalente, modificado por amortiguamiento y ductilidad, para el municipio de Los Barrios según la NCSE-02. Considerando un edificio de importancia especial de pórticos de acero laminado. Escenario ER2.	112
Figura 43. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1 considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE. Escenario ER2.	115

Figura 44. Curva de capacidad del modelo Mod1 sobre el escenario ER2 (2021, Los Barrios).	116
Figura 45. Elementos de refuerzo considerados como técnicas de <i>retrofitting</i> para mejorar la capacidad y resistencia de Mod1. Fuente: Instrucción de Acero Estructural (Instrucción de Acero Estructural (EAE), 2012).	117
Figura 46. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1, tras aplicar <i>retrofitting</i> , considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE.	118
Figura 47. Acelerograma sintético compatible con el espectro de respuesta resultante del estudio de peligrosidad (mostrado en Figura 33).....	119
Figura 48. Resultados de daño obtenidos tras realizar el análisis dinámico no lineal para el edificio Mod1 creado de forma manual, habiendo sido reforzado y considerando las normativas y códigos técnicos de construcción vigentes en 2024 para la región de estudio (Los Barrios).	120
Figura 49. Periodo fundamental de Mod1 y su valor de aceleración en base al espectro considerado para el estudio.....	121
Figura 50: Nube de puntos a color de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid.	125
Figura 51. Planos exteriores del edificio ETSITGC: X en azul, Y en verde, Z es altura.....	125
Figura 52. Plano de la planta del edificio ETSITGC.....	125
Figura 53. Modelo geométrico del edificio Mod1 obtenido de forma semiautomática tras aplicar ABM-indoor.....	126
Figura 54. Vista en alzado de Mod1 semiautomático mostrando los modos de vibración principales para cada una de las direcciones horizontales.....	128
Figura 55. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1 considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE. Edificio modelado utilizando ABM-indoor. Escenario ER3.....	130

Figura 56. Curva de capacidad de Mod1 obtenido de forma semiautomática antes de ser reforzado. La curva de capacidad se ha obtenido considerando la NCSE-02.131

Figura 57. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1, tras aplicar *retrofitting*, considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE. Edificio modelado utilizando ABM-indoor. Escenario ER3.132

Figura 58. Resultados de daño obtenidos tras realizar el análisis dinámico no lineal para el edificio Mod1 creado aplicando ABM-indoor, habiendo sido reforzado y considerando las normativas y códigos técnicos de construcción vigentes en 2024 para la región de estudio (Los Barrios). Escenario ER3.133

Lista de Tablas

Tabla 1: Características principales de los elementos BIM basadas en el Nivel de Desarrollo	42
Tabla 2: Matriz de confusión de la nube de puntos del estacionamiento. Los valores de la tabla representan número de puntos clasificados.....	74
Tabla 3: Matriz de confusión de la nube de puntos de la oficina. Los valores de la tabla representan número de puntos clasificados.	77
Tabla 4. Parámetros de la recta Gutenberg-Richter y magnitudes máximas para las zonas sismogénicas.....	87
Tabla 5: Sismos de control obtenidos por desagregación de los resultados de peligrosidad sísmica en el proyecto de Los Barrios.	90
Tabla 6: Escenarios sísmicos identificados para los sismos de control resultantes de la desagregación.	91
Tabla 7. Resumen de detalles estructurales del edificio ETSITGC que se utilizaron para caracterizar el modelo del mismo	99
Tabla 8. Frecuencias (Hz) y periodos (s) obtenidos tras el análisis SSR del edificio ETSITGC. Los puntos están organizados en la tabla por módulos para facilitar la interpretación de los resultados.....	106
Tabla 9. Periodos (s) obtenidos tras el análisis SSR y el análisis modal del módulo Mod1. ...	107
Tabla 10. Parámetros considerados en el análisis de acciones sobre la edificación de Mod1 según MV 101-1962, MV 103-1975 y PDS-I 1974. Escenario ER1.	109
Tabla 11. Casos de cargas establecidos para el análisis de acciones en la edificación de Mod1 según MV 101-1962, MV 103-1975 y PDS-I 1974. Escenario ER1.....	110
Tabla 12. Parámetros considerados en el análisis de acciones sobre la edificación de Mod1. Escenario ER2.	113
Tabla 13. Casos de cargas establecidos para el análisis de acciones en la edificación de Mod1. Escenario ER2.	114
Tabla 14. Periodos (s) obtenidos tras el análisis SSR y el análisis modal del módulo Mod1 creado de forma semiautomática.....	128

Tabla 15: Resumen de los resultados del Ajuste de Mínimos Cuadrados clases de objeto de elementos planos en el estacionamiento. Los términos Q1, Q2 y Q3 hacen referencia al primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente.160

Tabla 16: Resumen de los resultados del Ajuste de Mínimos Cuadrados de los elementos planos en la oficina. Los términos Q1, Q2 y Q3 hacen referencia al primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente.162

Abreviaturas y acrónimos

ABM-indoor	As-Built Modeller indoor
ADRS	Acceleration-Displacement Response Spectrum
AEC/FM	Architecture, Engineering, Construction, and Facility Management
AMC	Ajuste por Mínimos Cuadrados
ATC	Applied Technology Council
BIM	Building Information Model
BPM	Business Process Modelling
CAD	Computer Aided Design
CIM	City Information Modelling
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
CUREE	Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering
DB SE AE	Documento Básico Seguridad Estructural Acciones en la Edificación
DCM	Displacement Coefficient Method
ELT/ELS	Escaneo Láser Terrestre/ Escáner Láser Terrestre
ELU	Estado Límite Último
ETSITGC	Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FN	False Negative
FP	False Positive
FPFH	Fast Point Feature Histograms
GEM	Global Earthquake Model
GMPEs	Ground motion prediction equations
IAP	Polígono Auxiliar Interior
I-DCM	Improved Displacement Coefficient Method
IFC	Industry Foundation Classes

ISM	Improved Slicing Method
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOD	Level Of Development
MADRS	Modified Acceleration-Displacement Response Spectrum
MEP	Mechanical, Electrical and Plumbing
MMS	Mobile Mapping System
Mod1	Módulo central del edificio ETSITGC (módulo azul en la Figura 36)
M _w	Magnitud momento
NCSE-02	Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program
NLDA	Nonlinear Dynamic Analysis
NLSA	Nonlinear Static Analysis
OC	Object Class
OMA	Operational Modal Analysis
PGA	Peak Ground Acceleration
PCA	Principle Components Analysis
PR	Periodo de Retorno
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Assessment
R	Distancia Fuente-emplazamiento
RANSAC	Random Sample Consensus
RGB	Red Green Blue
RISK-UE	Risk in the Urban Environment
RMA	Reduced Major Axis
ROC	Receiver Operating Characteristic
SA	Spectral Acceleration
Sa-Sd	Aceleración - Desplazamiento espectral
SIG	Sistema de Información Geográfica
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping

TIN	Triangulated Irregular Network
TN	True negative
TP	True Positive
UHS	Uniform Hazard Spectrum
UNDRO	United Nations Disaster Relief Coordinator
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
ZESIS	Modelo de zonas sismogénicas de la Península Ibérica y territorios de influencia
ε	Épsilon

Bloque I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Los fenómenos naturales son uno de los principales canales de interacción entre la Tierra y los sistemas socioeconómicos. Desgraciadamente, dichos fenómenos han generado a lo largo de la historia grandes catástrofes, provocando pérdidas materiales, económicas y humanas.

El centro de investigación de epidemiología y desastres (en inglés *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*, CRED) publica gran variedad de informes en los que se muestran cifras de pérdidas asociadas a desastres ocasionados por fenómenos naturales. Por ejemplo, el informe 2022 “Disasters in number” (CRED, 2023) destaca en su introducción dos fenómenos sísmicos considerados entre los diez fenómenos que han generado más muertes durante 2022. Dichos fenómenos son el terremoto de Afganistán de junio, en el que hubo un total de 1,036 víctimas mortales, y el terremoto de Indonesia de noviembre, que causó 334 víctimas mortales. Durante todo el año 2022, los terremotos ocasionaron un total de 1,626 víctimas mortales, situando a los terremotos como el cuarto fenómeno que más muertes causó durante todo el año. Tal y como se indica en el informe “Economic Losses, Poverty & disasters” (CRED, 2017), entre 1998 y 2017, el 56% de las muertes ocasionadas por el desarrollo de fenómenos naturales está asociado a la ocurrencia de terremotos.

Los fenómenos naturales no se pueden ni reducir ni eliminar. Dichos eventos por sí solos no causan las grandes pérdidas económicas y humanas. Lo que ocasiona dichas pérdidas son los diferentes factores sociales que interaccionan con los fenómenos naturales, tales como las construcciones precarias, alta densidad de población o la ausencia de planes urbanísticos y de emergencias.

A lo largo de la historia, se ha demostrado que terremotos de gran magnitud han generado daños leves o moderados en estructuras y pocas pérdidas en poblaciones con reducida vulnerabilidad. Sin embargo, en ocasiones, terremotos de menor magnitud han tenido un impacto mucho mayor. Por ejemplo, el terremoto de Haití de 2010, con una magnitud

momento¹ de 7 M_w , destruyó un cuarto de las construcciones de la ciudad de Puerto Príncipe y causó 223,000 muertes aproximadamente (CRED, 2016). Por el contrario, ese mismo año, ocurrió un terremoto en Chile de magnitud 8.8 M_w que causó 525 víctimas mortales. Si se traduce el valor de la magnitud a términos de energía liberada, podemos decir que el terremoto de Chile fue 500 veces mayor al terremoto de Haití y sin embargo provocó menos del 1% de las muertes ocurridas en Haití.

Por lo tanto, tal y como se ha mencionado anteriormente, la calidad de las construcciones, la densidad y distribución de la población, la existencia de códigos de diseño sismorresistente de estructuras y, por supuesto, la existencia de planes de emergencias, entre otros factores, hacen que aumente o disminuya el riesgo sísmico de las ciudades y los países.

Establecer de manera precisa y detallada las características estructurales de un edificio, puente o cualquier infraestructura es crucial para evaluar su vulnerabilidad ante eventos sísmicos. Esto implica considerar aspectos como la calidad de los materiales utilizados y su disposición, las características de los cimientos, la distribución de la masa, entre otros factores determinantes. Un análisis adecuado de las estructuras no sólo contribuye a la seguridad de las personas que ocupan esos espacios, sino que también facilita la planificación urbana y la toma de decisiones en la construcción de nuevas infraestructuras, ayudando a mitigar los riesgos asociados a los sismos y a fortalecer la resiliencia de las comunidades frente a estos eventos naturales.

Definir las características estructurales de edificios puede ser un desafío considerable debido, entre otros, a la diversidad de diseños arquitectónicos y materiales de construcción. Cada edificio posee peculiaridades específicas que influyen en su comportamiento sísmico, desde la disposición de los cimientos hasta la rigidez de sus elementos estructurales y no estructurales. Además, la falta de información detallada sobre la historia constructiva y las propiedades exactas de los materiales utilizados puede complicar aún más la tarea. La variabilidad en los estándares o normativas de construcción a lo largo del tiempo y en diferentes regiones también añade una capa adicional de dificultad. En este contexto, las personas que investigamos en el ámbito del

¹ La escala de magnitud de momento (M_w) es una escala logarítmica usada para medir y comparar terremotos. Está basada en la medición de la energía total que se libera en un sismo (Hanks y Kanamori, 1979).

riesgo sísmico debemos enfrentarnos a la tarea crucial de obtener datos precisos para modelar adecuadamente las estructuras. Por lo tanto, es necesario considerar qué fuentes de información pueden utilizarse para estimar la vulnerabilidad de los edificios existentes. Por un lado, las inspecciones in situ permiten una evaluación directa de las condiciones estructurales y no estructurales del edificio. Sin embargo, es una tarea que puede ser costosa y requerir mucho tiempo, especialmente para grandes edificios o áreas. Por otro lado, es importante considerar archivos de proyecto de colegios oficiales y ayuntamientos ya que proporcionan documentación histórica y técnica sobre la construcción y remodelación del edificio. Además, suelen disponer de planos arquitectónicos, permisos de construcción, informes de inspección previa, entre otros documentos útiles. Sin embargo, la información puede ser limitada o incompleta, especialmente para edificios antiguos o que han experimentado múltiples remodelaciones. Por último, cabe mencionar la posibilidad de realizar mediciones con sensores láser obteniendo nubes de puntos para su posterior modelización. Esta técnica proporciona datos precisos y detallados sobre la geometría y las características del edificio y permite la generación de modelos tridimensionales precisos. Lamentablemente, es una técnica que requiere conocimientos técnicos avanzados para procesar y analizar los datos obtenidos dado que a día de hoy se han desarrollado pocos automatismos aplicables en este ámbito. Esta línea de investigación, por lo tanto, implica un enfoque multidisciplinario y la aplicación de tecnologías avanzadas, como las tecnologías geoespaciales, para superar estos desafíos y proporcionar una base sólida para la gestión del riesgo sísmico.

En las últimas décadas, ha habido importantes avances en el desarrollo de tecnologías de la información geoespacial que permiten adquirir, procesar y explotar grandes cantidades de datos de diversa índole. Las tecnologías geoespaciales desempeñan un papel fundamental en la definición de las características de edificios para la ingeniería sísmica. Tecnologías como la teledetección satelital, los sistemas de información geográfica (SIG) y las tecnologías de escaneo láser terrestre permiten recopilar datos detallados sobre la topografía del terreno, las características geométricas de las estructuras e incluso la distribución de edificaciones en una región determinada. Estos datos son esenciales para los estudios de riesgo sísmico. En concreto, son de gran valor para la evaluación de la vulnerabilidad de estructuras existentes y de la población.

A partir de determinadas técnicas geoespaciales es posible definir modelos tridimensionales precisos de edificios, lo que mejora la capacidad de simular el comportamiento estructural de edificios ante movimientos sísmicos. La combinación de

datos geoespaciales con técnicas de análisis estructural proporciona una visión integral de las estructuras.

La motivación detrás de esta tesis de investigación radica, por un lado, en la creciente importancia de aplicar tecnologías geoespaciales para mejorar la modelización de estructuras, en particular, en el contexto de edificios de importancia especial, como edificios educacionales, hospitales, teatros, etc. En general, edificios en los que la concentración de personas en determinados momentos puede ser elevada. Estos edificios, con características especiales que van más allá de su función arquitectónica, representan nodos cruciales en el tejido social y académico de una comunidad. La utilización de herramientas geoespaciales, como la teledetección y el escaneo láser, permiten la creación de modelos tridimensionales detallados de estos edificios. Esto no solo contribuye a una comprensión más profunda de la interacción entre la estructura y su entorno, sino que también facilitará el diseño de medidas específicas para reducir la vulnerabilidad sísmica de estos espacios de vital importancia. Al centrarse en edificios educacionales, esta investigación aspira no solo a avanzar en la capacidad de modelización estructural, sino también a enriquecer la seguridad y la sostenibilidad de entornos educativos, promoviendo así el bienestar de las comunidades y fomentando un enfoque proactivo hacia la gestión del riesgo sísmico en infraestructuras de importancia especial.

Por otro lado, se identificó una necesidad crítica relacionada con las actualizaciones de las normativas de diseño sismorresistente. La consideración de las normas de diseño sismorresistente es fundamental para garantizar la seguridad y la integridad estructural de los edificios frente a eventos sísmicos. Estas normativas proporcionan pautas y criterios para la planificación, diseño y construcción de estructuras capaces de resistir las fuerzas generadas por un terremoto. Sin embargo, el desafío actual radica en la necesidad de mantener estas normas actualizadas y alineadas con los avances en el conocimiento sísmico y las tecnologías de construcción.

El problema surge cuando nos enfrentamos a edificios construidos bajo normativas antiguas que no cumplen con los estándares actuales y es necesario modificar la estructura (*retrofitting*²) si se quiere adaptar a los requerimientos de normativas actualizadas. La pregunta clave es cómo abordar la seguridad de estas estructuras frente a eventos sísmicos futuros. También existe un desafío cuando se plantea la posibilidad de

² El retrofiting se refiere a la aplicación de mejoras o actualizaciones a una estructura existente para mejorar su rendimiento, especialmente en términos de resistencia sísmica, eficiencia energética u otros aspectos técnicos.

“trasladar³” edificios a zonas de sismicidad diferente para la cual fueron originalmente diseñados. La adaptación de estas estructuras a nuevos requisitos sísmicos implica consideraciones significativas, desde evaluaciones exhaustivas de su capacidad estructural hasta la implementación de medidas de refuerzo o incluso la reconstrucción en casos extremos.

1.2. Objetivos

La presente tesis doctoral ha sido desarrollada con el objetivo general de innovar en los métodos de estimación del riesgo sísmico en edificios de importancia especial empleando técnicas geoespaciales con el fin de generar escenarios de daño a escala local y regional. El fin último de esta investigación es favorecer la definición de la vulnerabilidad mediante la aplicación de automatismos en la fase de recogida de datos.

Objetivos específicos

A continuación, se enumeran los distintos objetivos específicos que han servido de guía durante el desarrollo de la tesis:

- Analizar el Estado del Arte relacionado con la aplicación de determinadas técnicas geoespaciales para generar modelos tridimensionales de edificios
- Desarrollar algoritmos que permitan la modelización automática de edificios a partir de nubes de puntos
- Crear un modelo de un edificio de dos formas distintas: 1) automática, a partir de datos LiDAR; y 2) manual, llevando a cabo observaciones de campo, mediciones, uso de planos arquitectónicos, etc. con el objetivo final de comparar los resultados obtenidos en ambos modelos
- Realizar el análisis estructural de un edificio de importancia especial a partir de los dos modelos creados anteriormente y evaluar la verosimilitud del modelado automático
- Definir un flujo de trabajo para la estimación del riesgo sísmico en edificios de importancia especial mediante el uso de un automatismo que facilite el modelado geométrico de edificios

³ Con el término “trasladar” nos referimos a construir un modelo idéntico de un edificio de importancia especial existente, que ha demostrado ser muy funcional en otro sitio.

- Adquirir habilidades fundamentales para difundir de manera efectiva los resultados obtenidos tanto en el ámbito académico como en el empresarial. Dado que se trata de una investigación desarrollada bajo el marco de un doctorado industrial, se persigue fomentar una comunicación bidireccional, garantizando un puente entre el mundo académico y el empresarial

1.3. Alcance del estudio y antecedentes

Doctorado industrial. Entorno empresarial

El estudio se enmarca en un Doctorado Industrial en el que han colaborado dos instituciones: Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y Geolyder S.L. España, NIF: B86901543. El presente proyecto está cofinanciado por la Comunidad de Madrid, España, Proyecto Número de Referencia: IND2017/TIC- 7869 y la citada empresa. Se subraya así la vinculación directa de la tesis con el entorno empresarial. Esta interacción más estrecha con la industria no solo valida la pertinencia de la investigación, sino que también añade una capa adicional de utilidad, garantizando que los hallazgos tengan aplicaciones tangibles y contribuyan al avance y la innovación dentro del ámbito empresarial.

La doctoranda comenzó a trabajar en 2016 dentro de la empresa Geolyder S.L. Durante dos años colaboró en los diferentes proyectos para la estimación del riesgo sísmico que se enumeran a continuación:

- Servicio para la realización del análisis de riesgo sísmico para elaborar el plan especial de emergencias ante este riesgo en Castilla-La Mancha; Junta de Castilla-La Mancha
- Estudio de riesgo sísmico en Salina Cruz, México; financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo
- Estudios para la mitigación del cambio climático, riesgo de desastres y vulnerabilidad al cambio climático y crecimiento urbano en la ciudad de Rionegro, Colombia; Banco Interamericano de Desarrollo
- Estudios de cambios climático y desarrollo urbano para Lázaro Cárdenas y Tapachula, México; Banco Interamericano de Desarrollo
- Estudios de cambio climático y desarrollo urbano para Neiva, Colombia; Banco Interamericano de Desarrollo

- Estudios de cambio climático y desarrollo urbano en Neiva e Ibagué, Colombia; Banco Interamericano de Desarrollo

El desarrollo de los estudios anteriores desencadenó el inicio de la presente tesis doctoral, debido a que la doctoranda identificó una necesidad crítica de perfeccionar la estimación de las características estructurales de los edificios.

Durante el periodo de investigación la doctoranda participó en el estudio de caracterización sísmica y evaluación del riesgo sísmico en el emplazamiento de la futura planta de almacenamiento de hasta 10,000 m³ de gas natural licuado (GNL) a ser construida en la terminal portuaria de Los Barrios, Endesa Generación S.A., situado en el municipio de Los Barrios, Cádiz (marzo de 2021). En el apartado 3.2. se explica en detalle el estudio mencionado, ya que los resultados obtenidos sobre la peligrosidad sísmica del emplazamiento se han aplicado en la presente investigación.

Doctorado industrial. Entorno académico

En referencia al entorno académico, la doctoranda colaboró como docente del Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía de las Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía (UPM) y del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM) durante los cursos académicos 2018/2019, 2019/2020 y 2020/2021. En total, impartió 66 horas de docencia en las siguientes asignaturas:

- Definición de la acción sísmica (53000940). Máster Universitario en Ingeniería Sísmica: Dinámica de Suelos y Estructuras
- Análisis espacial (125000424). Grado en Ingeniería de las Tecnologías de la Información Geoespacial
- Análisis geoespacial (123000700). Máster Universitario en Análisis del Riesgo Sísmico mediante Tecnologías Geoespaciales
- Exposición y vulnerabilidad (123000708). Máster Universitario en Análisis del Riesgo Sísmico mediante Tecnologías Geoespaciales
- Peligrosidad sísmica (123000704). Máster Universitario en Análisis del Riesgo Sísmico mediante Tecnologías Geoespaciales

Por último, como personal de la empresa Geolyder S.L. e investigadora de la UPM, la doctoranda participó como docente en dos ediciones de la Formación sobre Análisis del

riesgo sísmico en Castilla-La Mancha, impartida en el desarrollo del curso 94/19 técnico de Protección Civil y Emergencias en Castilla - La Mancha (2018 y 2019).

1.4. Estructura de la tesis

La presente tesis doctoral se ha estructurado en tres bloques principales, dividido cada uno en diferentes capítulos. En total, el documento está compuesto por siete capítulos, que se describen brevemente a continuación.

1.4.1. Bloque I

El Bloque I consta de dos capítulos, que contienen: el primero, una introducción detallada al tema de investigación y el segundo, un exhaustivo análisis del estado del arte en relación con la evaluación del riesgo sísmico, las técnicas geoespaciales aplicadas a la estimación de la vulnerabilidad y la modelización y el *retrofitting* en edificios.

Capítulo 1. Introducción

El primer capítulo incluye la introducción al contenido de la tesis, describiendo la motivación para llevar a cabo la investigación, los objetivos generales y específicos del estudio y el alcance del trabajo desarrollado. Se hace especial hincapié en el hecho de que se trata de un doctorado industrial y, en todo momento, se ha perseguido fomentar una comunicación bidireccional, garantizando un puente entre el entorno académico y el empresarial.

Capítulo 2. Estado del arte

El capítulo dos describe el estado del arte en los diferentes ámbitos que intervienen en la tesis doctoral. El estado del arte se ha dividido en cuatro partes. En la primera de ellas, se exponen los conceptos fundamentales del riesgo sísmico y se incluyen referencias para la caracterización de sus componentes: peligrosidad sísmica, exposición y vulnerabilidad. En la segunda parte, se incluyen referencias sobre las diferentes técnicas geoespaciales aplicadas a la definición de la vulnerabilidad sísmica. En la tercera parte, se incluye una revisión bibliográfica sobre la modelización de edificios aplicando técnicas geoespaciales. Por último, la cuarta parte incluye información sobre métodos de *retrofitting* en edificios construidos.

1.4.2. Bloque II

El Bloque II consta de cuatro capítulos. El primer capítulo, capítulo 3 de la memoria, incluye la propuesta metodológica en relación a la automatización de la modelización de edificios a partir de nubes de puntos y a la estimación del riesgo sísmico en edificios de importancia especial. Los tres capítulos siguientes constituyen la aplicación de todo lo expuesto en el Capítulo 3. Cada capítulo se desarrolla como una aplicación de la metodología propuesta. El Capítulo 4 presenta la aplicación del uso de técnicas geoespaciales para la modelización de edificios. El Capítulo 5 incluye todo lo relacionado con la estimación de riesgo sísmico en un edificio de importancia especial. Por último, el Capítulo 6 presenta la combinación de las dos aplicaciones anteriores. En este capítulo se describe la aplicación metodológica de la estimación del riesgo sísmico en un edificio de importancia especial modelizado de forma semiautomática. La **Figura 1** muestra un esquema sobre el contenido y la interrelación entre los capítulos cuatro, cinco y seis.

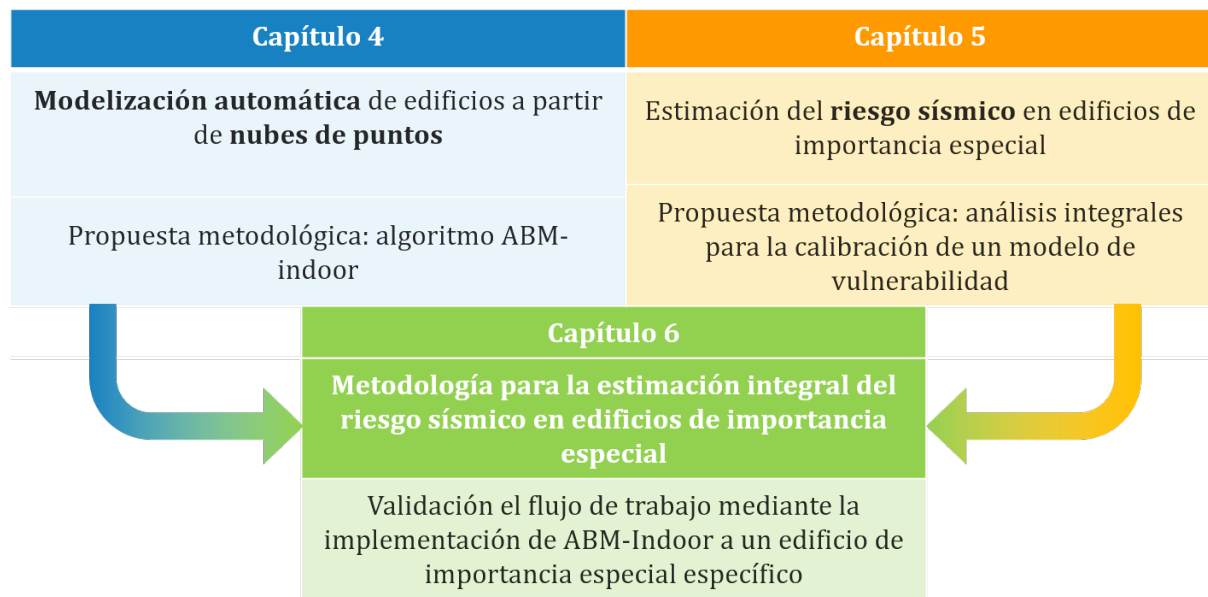


Figura 1. Esquema sobre el contenido y la interrelación entre los capítulos cuatro, cinco y seis.

Capítulo 3. Propuesta metodológica

El tercer capítulo incluye la propuesta metodológica de la presente tesis doctoral dividida en tres fases principales: uso y aplicación de técnicas geoespaciales, estimación del riesgo sísmico para un edificio de importancia especial y metodología de *retrofitting* para la reducción del dicho riesgo. En la primera parte, se expone el algoritmo desarrollado para la modelización automática de nubes de puntos. En la segunda parte del capítulo, se incluye la metodología desarrollada para la estimación de la peligrosidad sísmica, la modelización de la estructura, los análisis integrales para la calibración del modelo y la

estimación del daño considerando los escenarios sísmicos definidos. La tercera y última fase presenta la metodología de *retrofitting* seguida. Se exponen los tipos de modificaciones aplicados a la estructura en base al Código Estructural para reducir su vulnerabilidad sísmica y mejorar su capacidad ante sismo.

Capítulo 4. Aplicación metodológica I. Uso de técnicas geoespaciales para la modelización automática de edificios

El cuarto capítulo muestra los resultados obtenidos al aplicar ABM-indoor en dos escenarios interiores distintos, una oficina y un aparcamiento. Esta aplicación ha servido como análisis de calibración del algoritmo desarrollado y explicado en el capítulo 3. Para demostrar la robustez de ABM-indoor, se presentan resultados de precisión a través de matrices de confusión, gráficos *Receiver Operating Characteristic curve* (ROC⁴) y ajustes por mínimos cuadrados.

Capítulo 5. Aplicación metodológica II. Estimación de riesgo sísmico en un edificio de importancia especial

El quinto capítulo presenta la aplicación de la metodología definida para la estimación del riesgo sísmico en un edificio de importancia especial. Para ello se considera la definición de la peligrosidad sísmica en la región de interés y la modelización manual de un edificio de importancia especial, llevando a cabo diferentes análisis integrales para la calibración del modelo del edificio. Además, se calcula la curva de capacidad del edificio. Por último, se han aplicado técnicas de *retrofitting* para la mejora estructural del edificio y se ha estimado el daño esperado en base a un escenario sísmico específico.

Capítulo 6. Aplicación metodológica III. Estimación de riesgo sísmico en un edificio de importancia especial modelado de forma semiautomática

El sexto capítulo presenta la aplicación que resulta de combinar los dos capítulos anteriores. El objetivo principal de la aplicación presentada en este capítulo es validar ambas metodologías para un caso real de un edificio de importancia especial. Por un lado, se modeliza el edificio de forma semiautomática. Por otro lado, se llevan a cabo los

⁴ La curva Receiver Operating Characteristic (Bewick et al., 2004) fue desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial por ingenieros de radar que trabajaban en la detección de señales débiles en presencia de ruido. Los gráficos ROC han adquirido una relevancia significativa en la actualidad debido a su versatilidad para evaluar la precisión de metodologías en diversos campos de investigación, tales como la medicina (Mandrekar, 2010), la ingeniería industrial y la ingeniería agrónoma (Arana et al., 2001), entre otros.

diferentes análisis integrales para la definición calibrada de la vulnerabilidad para, finalmente, llevar a cabo el estudio de daño por la ocurrencia de un sismo.

1.4.3. Bloque III

Capítulo 7. Conclusiones generales

El capítulo siete contiene las conclusiones de todo el trabajo desarrollado en la presente investigación. Este capítulo da respuesta y solución a todos los objetivos marcados en el primer capítulo de la memoria de tesis.

Capítulo 8. Futuras líneas de investigación

El Capítulo 8 aborda las futuras líneas de investigación que se plantean como continuación natural de este estudio. En este contexto, se exploran nuevas direcciones y áreas de interés que podrían profundizar en la comprensión de la estimación del riesgo sísmico en edificaciones de importancia especial, aprovechando los avances tecnológicos y metodológicos en la ingeniería geomática.

1.4.4. Bloque IV

El bloque IV constituye la recopilación de las referencias bibliográficas citadas a lo largo de la presente memoria, elaboradas siguiendo el formato establecido por la (*American Psychological Association (APA)*), en su séptima edición. Este apartado, no solo proporciona un respaldo académico sólido a las afirmaciones y argumentos presentados a lo largo del trabajo, sino que también facilita a los lectores interesados una guía detallada para acceder a las fuentes consultadas y profundizar en los temas tratados.

1.4.5. Bloque V

El Bloque V alberga una compilación de diversos anexos que enriquecen y complementan la información presentada en la memoria. El Anexo I contiene los resultados del ajuste mínimo cuadrado de los planos modelados con ABM-indoor, El Anexo II contiene los planos arquitectónicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid, que ha sido el edificio objeto del estudio descrito. El Anexo III incluye los artículos publicados y el Anexo IV las contribuciones en congresos nacionales e internacionales. Por último, el Anexo V presenta los premios obtenidos a lo largo del desarrollo de la tesis.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Evaluación del riesgo sísmico

El terremoto y los daños

Un terremoto es un fenómeno natural que se caracteriza por la vibración o sacudida de la superficie terrestre resultante de la liberación repentina de energía en la litosfera. Esta liberación de energía provoca ondas sísmicas que se propagan a través de la Tierra, generando movimientos en superficie en la región alcanzada por las ondas. Los terremotos pueden variar en magnitud y causar efectos que van desde leves temblores hasta violentas sacudidas capaces de generar daños significativos a estructuras, así como ocasionar consecuencias devastadoras, como pérdidas humanas, daños materiales y cambios en la topografía de la zona afectada. Los terremotos son eventos naturales impredecibles y ocurren debido a la actividad tectónica en la corteza terrestre, donde las placas tectónicas interactúan y liberan energía acumulada a lo largo del tiempo.

Los terremotos pueden provocar gran variedad de daños, dependiendo de factores como la magnitud del evento, la profundidad del hipocentro, la distancia a áreas pobladas, la densidad de población y la calidad de los suelos y de las estructuras construidas en la región afectada, entre otros. Algunos de los principales tipos de daños causados por los terremotos incluyen:

Daños en infraestructuras. Los terremotos pueden dañar edificios, puentes, carreteras y otras infraestructuras. La vulnerabilidad de las estructuras está directamente relacionada con la calidad de los materiales empleados para su construcción y las prácticas constructivas aplicadas. La consideración o no de estándares de diseño sismorresistente es un factor condicionante en la calidad de las mismas y en su respuesta ante sismo. El grado de daño de las estructuras depende de su vulnerabilidad (Hu et al., 2023; Mahin, 2012).

Pérdida de vidas humanas. Los terremotos pueden generar tragedias humanas debido al colapso de edificios, deslizamientos de tierra y otros efectos secundarios. La cantidad de víctimas suele depender de la vulnerabilidad de las estructuras y de la densidad de población en la zona afectada, además de la intensidad de los movimientos sufridos (Spence et al., 2011).

Lesiones y salud mental. Las personas pueden sufrir lesiones físicas durante un terremoto, ya sea por la caída de objetos, estructuras colapsadas o movimientos bruscos

del suelo. Además, los eventos sísmicos también pueden tener impactos psicológicos, causando estrés postraumático y otros trastornos mentales (Díaz et al., 2012).

Desplazamiento de población. Los terremotos pueden obligar a las personas a abandonar sus hogares debido a los daños sufridos o al riesgo continuo de réplicas. Esto puede dar lugar a grandes cantidades de refugiados internos (Egea Jiménez et al., 2011).

Impacto económico. Los terremotos pueden tener efectos económicos significativos, ya que los costos asociados con la reconstrucción y reparación de edificios y otras infraestructuras, la pérdida de productividad y el colapso de empresas locales pueden ser enormes (Jiménez Martínez et al., 2020).

Cambios en la topografía. Algunos terremotos pueden causar cambios permanentes en la topografía, como la elevación o hundimiento de tierras, desplazamientos de la línea de costa, o la formación de fallas geológicas visibles (Schröter et al., 2018) (Derakhshan et al., 2020).

Es importante destacar que la construcción de estructuras resistentes a terremotos y la conciencia pública sobre cómo actuar durante un terremoto pueden reducir significativamente el impacto y la gravedad de estos daños.

Evaluación del riesgo sísmico

Según la definición de *United Nations Disaster Relief Co-ordinator* (UNDRO, 1979) oficialmente aceptada, el riesgo sísmico en una determinada población, es un concepto que depende de varios factores (**Figura 2**): 1) la peligrosidad sísmica que determina el movimiento esperado en una determinada región geográfica; 2) la vulnerabilidad de las estructuras, o capacidad para experimentar daño; 3) la exposición y densidad de estructuras y población; y 4) el coste de reparación o las pérdidas económicas.

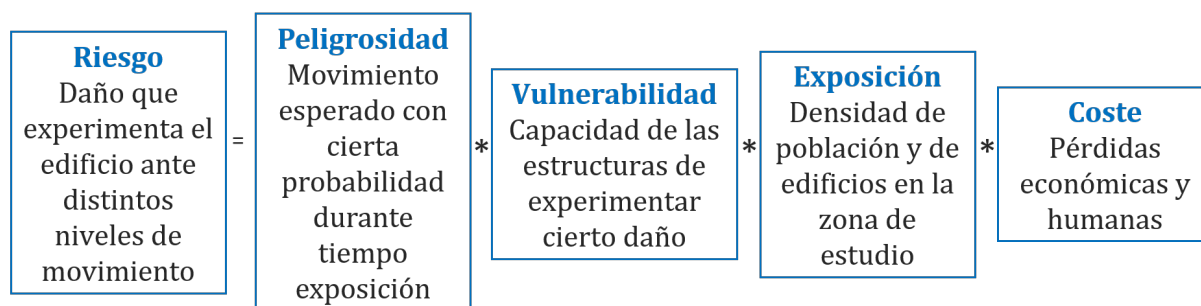


Figura 2. Concepto de riesgo sísmico compuesto por cuatro variables: peligrosidad, vulnerabilidad, exposición y densidad y coste.

En base a la ecuación anterior, el riesgo sísmico depende de varios factores que están relacionados con la actividad sísmica de una región específica, la vulnerabilidad de las estructuras y la distribución de la población. En concreto, la ubicación geográfica de una región en relación con las placas tectónicas y las fallas geológicas es un factor determinante en la peligrosidad sísmica de dicha región. Las áreas cercanas a los límites de placas tectónicas o a lo largo de fallas activas son más propensas a experimentar actividad sísmica. Otro factor determinante en el riesgo sísmico es la profundidad a la que se produce un terremoto. Sin embargo, a pesar de ser factores que no podemos ni reducir ni eliminar, ninguno de los dos generaría daños si no existieran construcciones ni población expuesta.

Por lo tanto, la densidad de población y la calidad de las estructuras de una región condicionan directamente el riesgo sísmico de una región, aparte de su peligrosidad. Por un lado, cuanto mayor sea la concentración de personas y estructuras, es decir la exposición, mayor será el riesgo. Por otro lado, mejores diseños sismorresistentes de estructuras y mejores calidades de construcción supondrán menores daños tras la ocurrencia de un sismo. Los edificios diseñados y construidos con buen diseño sismorresistente son menos propensos a sufrir daños, al ser menos vulnerables.

Los factores mencionados anteriormente son factores físicos: geotectónica de la Tierra, distribución de la población sobre la superficie terrestre y calidad de las construcciones. Sin embargo, hay otros factores, considerados factores sociales, que también afectan directamente al riesgo sísmico de una determinada región.

Por ejemplo, la preparación y conciencia de la población sobre cómo actuar antes, durante y después de un terremoto pueden reducir significativamente los daños y pérdidas ocasionadas y, por lo tanto, reducir el riesgo sísmico. Esto incluye la implementación de planes de emergencia, simulacros y educación pública.

Reducir el riesgo sísmico es un esfuerzo conjunto que involucra a gobiernos, comunidades, científicos y profesionales de la construcción. La combinación de medidas preventivas, preparación y respuesta efectiva puede ayudar a minimizar el impacto de los terremotos. Por ello, se plantean varias medidas que podrían reducir el riesgo sísmico:

- Mejora de las construcciones. Implementar y hacer cumplir códigos de diseño sismorresistente
- Evaluación y mejora de infraestructuras existentes, especialmente aquellas consideradas críticas: puentes, hospitales y escuelas, entre otros

- Mejorar de la ordenación del territorio con planes urbanísticos y planificar el desarrollo urbano de manera que se evite construir en áreas de alto riesgo sísmico
- Educación pública: Informar y educar a la población sobre el fenómeno del terremoto, el riesgo sísmico y las medidas de seguridad a adoptar
- Preparación Comunitaria: Fomentar la formación de comunidades preparadas para responder ante un terremoto, incluyendo la organización de simulacros y la creación de planes de emergencia
- Inversión en investigación en el ámbito de la ingeniería sísmica: Financiar la investigación para comprender mejor el fenómeno sísmico y desarrollar metodologías que permitan refinar las estimaciones de riesgo sísmico y aumentar el conocimiento para la propuesta de medidas eficaces de mitigación

Desde hace décadas, existen iniciativas y proyectos de carácter internacional con el objetivo de desarrollar metodologías para la mejora de las estimaciones del riesgo sísmico. Por ejemplo, el *Applied Technology Council* (ATC), con el apoyo y el respaldo de la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), fue pionero a la hora de presentar ATC-13 (ATC, 1985). En la década de 1990 surgió el programa “Hazus”, como colaboración entre FEMA y el *Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering* (CUREE). Hazus es una metodología de modelado de riesgos estandarizada a nivel nacional. Se distribuye como software de escritorio gratuito basado en SIG con una colección de bases de datos de inventario para cada estado y territorio de los Estados Unidos. Hazus identifica áreas con alto riesgo de desastres naturales y estima los impactos físicos, económicos y sociales de terremotos, huracanes, inundaciones y tsunamis. El Programa Hazus, es gestionado por FEMA y colabora con otras agencias federales, instituciones de investigación y autoridades de planificación regional para garantizar que los recursos de Hazus incorporen los enfoques científicos y tecnológicos más recientes y satisfagan las necesidades de gestión de emergencias de la comunidad. La primera versión del software Hazus, diseñada específicamente para evaluar el riesgo sísmico, se lanzó en 1997. Desde entonces, se han desarrollado nuevas versiones del software y de los manuales que lo acompañan para actualizar metodologías y abordar otros tipos de riesgos naturales, como inundaciones y huracanes. La última versión publicada en relación al riesgo sísmico y disponible en la web es la versión 5.1 de abril de 2022 (FEMA, 2022a; FEMA 2022b)

En 2009 nació el proyecto *Global Earthquake Model* (GEM), cuyo objetivo ha sido la generación de una gran base de datos internacional con información sobre peligrosidad

sísmica, vulnerabilidad y exposición. En el transcurso de los años, GEM ha desarrollado OpenQuake, un programa de cálculo y análisis del riesgo sísmico.

Por último, otra de las iniciativas de gran peso a nivel internacional, desarrollada en los últimos años, es el proyecto Risk-UE (Mouroux et al, 2004). Dicho proyecto presenta metodologías avanzadas para el estudio del riesgo sísmico, incorporando características de edificios, patrimonio cultural y distribución de las ciudades en Europa.

Peligrosidad sísmica

La peligrosidad sísmica es la probabilidad de alcanzar o exceder un determinado movimiento sísmico en una región geográfica y para un periodo de tiempo específico (Kijko, 2011). Este concepto se define por la interacción de los factores geológicos y tectónicos que se enumeran a continuación.

Fuentes sísmicas. Son las zonas donde se produce la ruptura súbita y en las que se generan ondas sísmicas, las cuales se propagan a través del interior de la Tierra hasta alcanzar la superficie. Estas fuentes pueden ser naturales o inducidas por actividades humanas (Ruiz-Barajas et al., 2017). Por un lado, los volcanes y los terremotos son fuentes sísmicas naturales. Por otro lado, las explosiones, la minería y las pruebas nucleares son fuentes sísmicas antropogénicas.

Atenuación del movimiento. Este concepto se refiere a la disminución gradual de la amplitud de las ondas sísmicas a medida que se propagan a través del subsuelo. Este decaimiento de amplitud ocurre debido a dos factores: 1) la expansión geométrica del frente de ondas que hace que la energía liberada en el foco se reparta en frentes de ondas cada vez mayores, llegando por tanto menos energía a cada punto al aumentar la distancia y 2) la absorción de energía por el medio transmisor a través del cual se propagan las ondas sísmicas. La atenuación tiene así dos componentes, geométrica y anelástica y esta última varía según las propiedades elásticas y viscoelásticas del material geológico por donde viajan las ondas. La atenuación conjunta se incorpora en la estimación de la peligrosidad sísmica mediante modelos empíricos o teóricos (Ambraseys y Bommer, 2022; Hwang y Huo, 1997).

Efecto local. Fenómeno que provoca una variación de las características del movimiento que representa la peligrosidad sísmica en una ubicación específica debido a la topografía y a las características geológicas de las capas más superficiales del suelo de la región de estudio (ATC, 2005; Bazzurro y Cornell, 2004). Este efecto puede amplificar o atenuar las ondas sísmicas, variando tanto su amplitud como su composición espectral, lo que

resulta en diferentes niveles de riesgo sísmico para una zona de estudio, incluso dentro de una misma región.

Exposición y vulnerabilidad sísmica

Como se ha mencionado anteriormente, la exposición y vulnerabilidad de las estructuras y de la población son dos factores que afectan directamente al riesgo sísmico de una región. Disponer de una base de datos de exposición completa, que incluya información detallada sobre la ubicación, características y cantidad de estructuras y la distribución de la población, es crucial para realizar estudios de riesgo sísmico de manera precisa y efectiva.

La vulnerabilidad sísmica se refiere a la susceptibilidad de una estructura, comunidad o región a sufrir daños o pérdidas como consecuencia de la ocurrencia de un terremoto. Esta vulnerabilidad está determinada por diversos factores, incluyendo la calidad de las construcciones su diseño estructural, la planificación urbana, la densidad de población y la capacidad de respuesta ante el sismo. Además, hay otros aspectos externos a las propias estructuras que afectan directamente a la vulnerabilidad sísmica como, por ejemplo, las características económicas, las sociales, las ambientales, etc. (Wilches-Chaux, 1998).

Evaluar y mitigar la vulnerabilidad sísmica en zonas urbanas permite reducir al máximo el riesgo asociado a los terremotos. La implementación de normas de construcción sismorresistente, la conciencia pública y la preparación para emergencias son elementos cruciales en la reducción de la vulnerabilidad sísmica.

Definir la vulnerabilidad sísmica de edificios resulta desafiante debido a la complejidad derivada de la interacción de múltiples factores que influyen en su capacidad para resistir terremotos. La vulnerabilidad sísmica de una estructura depende de factores como la calidad de la construcción, el diseño estructural, la edad del edificio y la implementación de normativas sísmicas de construcción. La investigación en el ámbito de la vulnerabilidad sísmica dentro de la ingeniería sísmica es continua y la comprensión de la vulnerabilidad sísmica evoluciona con nuevos conocimientos y avances tecnológicos (Navas-Sánchez y Cervera Bravo, 2022).

Existen diversas metodologías para definir correctamente la vulnerabilidad de una estructura. Los métodos de estimación de la vulnerabilidad clasifican o categorizan las estructuras en función de cómo se tiene en cuenta su vulnerabilidad (Quirós Hernández, 2017). La clasificación más comúnmente utilizada establece dos tipos de métodos de cálculo: empíricos y analíticos.

Las diferencias clave entre los modelos empíricos y analíticos radican en la complejidad y la naturaleza de los datos necesarios. Mientras que los métodos analíticos son más complejos y necesitan información detallada, los métodos empíricos son más accesibles y se basan en observaciones históricas. En la práctica, la elección entre métodos analíticos y empíricos a menudo se basa en la disponibilidad de datos y los objetivos específicos del análisis. En muchos casos, una combinación de ambos enfoques puede proporcionar una evaluación más completa de la vulnerabilidad sísmica, aprovechando las fortalezas de cada método para obtener resultados más robustos.

Por un lado, los métodos empíricos se basan en observaciones y datos históricos de eventos sísmicos ocurridos. Estos métodos utilizan estadísticas y relaciones empíricas entre los daños observados y las características estructurales para inferir la vulnerabilidad de las estructuras. En Europa, por ejemplo, es muy utilizada la metodología EMS-98 (Grünthal y Lorenzo Martín, 2009) y el método 1 de Risk-UE (Mouroux et al., 2004). La metodología EMS-98 se desarrolló en el marco de la *European Macroseismic Scale 1998* y utiliza criterios y relaciones empíricas basadas en la experiencia sísmica para asignar niveles de intensidad y daño a estructuras. La EMS-98 se centra en comprender la eficacia y la aplicabilidad de la clasificación establecida en diversos contextos estructurales y geográficos, destacando su utilidad en situaciones donde la disponibilidad de datos detallados sobre las estructuras es limitada. La escala establece 6 clases de vulnerabilidad, asociando la clase "A" a las edificaciones más vulnerables y la "F" a las menos vulnerables. La asignación de la clase depende del material de construcción, estado de conservación y características estructurales. Para una determinada tipología, la escala contempla la asignación de la clase más probable y de otras clases plausibles, teniendo en cuenta la incertidumbre inherente a la asignación de la vulnerabilidad.

Por otro lado, los métodos analíticos utilizan modelos matemáticos y teóricos que se fundamentan en los principios de la ingeniería estructural y mecánica, Risk-UE (Mouroux et al., 2004) y HAZUS (FEMA, 2012). Estos modelos requieren datos detallados sobre las propiedades físicas y mecánicas de la estructura y permiten una comprensión profunda de la dinámica estructural y de su comportamiento ante sismos.

Los métodos analíticos emplean curvas de capacidad y fragilidad para caracterizar la respuesta de un edificio ante un determinado movimiento sísmico. Las curvas de capacidad describen la relación entre la respuesta estructural y la carga sísmica, representando gráficamente cómo se comporta la estructura ante diferentes niveles de movimiento (Freeman, 1998).

superior. Por otro lado, las curvas de fragilidad muestran la probabilidad de que una estructura experimente determinados niveles de daño ante un determinado movimiento sísmico. Al cruzar las curvas de capacidad con la demanda sísmica de una región de interés se identifican puntos de intersección, denominados puntos de desempeño, que representan combinaciones específicas de capacidad y demanda sísmica. Estos puntos se introducen después en las curvas de fragilidad que establecen la probabilidad de que la estructura experimente ciertos niveles de daño dada una carga sísmica particular. Este análisis permite cuantificar la vulnerabilidad de una estructura en términos de probabilidad de daño frente a diferentes movimientos sísmicos.

Para definir la curva de capacidad de un edificio, inicialmente se lleva a cabo un análisis estructural detallado que incorpora propiedades mecánicas y geométricas, considerando materiales, conexiones y configuraciones específicas del edificio. Posteriormente, se somete la estructura a una serie de excitaciones sísmicas, generándose la formación de rótulas plásticas en los elementos y la pérdida de rigidez. El área bajo la curva de capacidad representa la energía que un determinado edificio o elemento puede resistir sin romperse.

En el proceso de selección de una curva de capacidad para una estructura determinada, se presentan dos enfoques distintos. La primera opción implica la adopción de curvas de capacidad genéricas, las cuales se derivan a menudo de normativas o investigaciones previas y proporcionan estimaciones generales de la respuesta sísmica basadas en propiedades típicas de las estructuras (FEMA, 2012; Lagomarsino y Giovinazzi, 2006; Mouroux et al., 2004). La segunda alternativa implica llevar a cabo análisis no lineales detallados. Estos análisis proporcionan curvas de capacidad específicas para una estructura determinada, teniendo en cuenta su geometría, materiales y detalles constructivos únicos. La elección entre estas dos metodologías depende de la disponibilidad de datos detallados, la complejidad de la estructura y la necesidad de precisión en la evaluación de la capacidad sísmica de un edificio. Los análisis no lineales pueden ser estáticos, *Nonlinear Static Analysis* (NLSA), comúnmente conocidos como análisis pushover (Kim y D'Amore, 1999) y dinámicos, *Nonlinear Dynamic Analysis*, (NLDA). La principal diferencia entre NLSA y NLDA radica en la naturaleza de las cargas y cómo se aplican para evaluar la respuesta de una estructura frente a eventos sísmicos.

Las respuestas o comportamientos no lineales se refieren a aquellas cuya relación entre la carga aplicada y la respuesta de la estructura no sigue una ley lineal. Existen diferentes tipos de respuestas no lineales y su naturaleza puede deberse a diversos factores. Por ejemplo:

Deformaciones grandes. En situaciones donde las deformaciones son significativas, las ecuaciones que rigen el comportamiento estructural ya no son lineales. En este caso, las cargas pueden generar deformaciones importantes que no pueden ser modeladas de manera precisa mediante la teoría lineal de la elasticidad.

Materiales no lineales. Algunos materiales exhiben un comportamiento no lineal en respuesta a cargas. Por ejemplo, el acero puede alcanzar su límite de fluencia y comenzar a plastificar bajo determinadas cargas de tracción. En este punto, las deformaciones ya no son proporcionales a la carga aplicada y el acero experimenta deformaciones permanentes.

Cargas variables con el tiempo. Cargas dinámicas o cíclicas pueden introducir no linealidades en el sistema.

Contacto y fricción. Situaciones en las que hay contacto o fricción entre partes de una estructura, como en uniones o apoyos, pueden introducir no linealidades.

Inestabilidades geométricas. En algunos casos, las cargas propias de las estructuras pueden inducir inestabilidades geométricas, como el pandeo en soportes delgados. Estas inestabilidades pueden resultar en respuestas no lineales o en grandes desplazamientos.

Comportamiento hiperelástico. Algunos materiales elastoméricos, como ciertos tipos de gomas, pueden exhibir un comportamiento hiperelástico no lineal en lugar de seguir la ley de Hooke de la elasticidad lineal.

En el NLSA, las cargas son aplicadas de manera gradual y constante y la estructura se encuentra en equilibrio estático en cada paso. Se asume que la estructura responde lentamente a las cargas aplicadas y el análisis se detiene cuando se alcanza el equilibrio. Las cargas pueden ser fuerzas concentradas, momentos, cargas distribuidas, etc., pero su aplicación es estática, es decir, no varían con el tiempo durante el análisis y no se consideran los efectos inerciales ni de amortiguamiento.

Sin embargo, en el NLDA, las cargas son funciones del tiempo y representan excitaciones dinámicas, como las generadas por terremotos, explosiones u otras fuentes de vibración. Las cargas varían continuamente durante el análisis. Las ecuaciones de movimiento son integrales - en el dominio del tiempo - de la respuesta derivada de las ecuaciones de equilibrio instantáneo. La respuesta de la estructura a lo largo del tiempo es analizada para comprender cómo varían las deformaciones y tensiones bajo cargas dinámicas. Pueden considerarse tanto no linealidades temporales como geométricas en el análisis

dinámico. Esto significa que las propiedades del material pueden cambiar con el tiempo y se pueden tener grandes deformaciones y desplazamientos.

En estudios de riesgo sísmico para edificios concretos y especialmente para estructuras de importancia especial, como edificios educacionales, es necesario aplicar análisis no lineales para generar las curvas de capacidad específicas para dicha estructura a partir de su modelo estructural (Deierlein et al., 2010). Este requisito se debe a que en este tipo de edificios, no solo albergan actividades críticas, sino que también exhiben particularidades arquitectónicas y estructurales únicas que influyen en su respuesta sísmica (Estêvão y Esteves, 2020; Popa, 2016).

Otra de las herramientas utilizadas en los estudios de riesgo sísmico son las curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad suelen expresarse en términos de la relación entre el desplazamiento por la ocurrencia de un terremoto y la probabilidad de que la estructura alcance o supere ciertos niveles de daño. Los niveles de daño pueden variar desde daños leves o moderados hasta daños severos o colapso total. Las curvas de fragilidad pueden obtenerse mediante formulación simplificada a partir de las curvas de capacidad (Mouroux et al., 2004).

Estimación del daño en estructuras

Como se ha explicado al inicio del capítulo, el riesgo sísmico se refiere a la probabilidad de pérdidas o daños significativos en términos de vidas humanas, bienes materiales, infraestructuras y servicios públicos debido a la ocurrencia de terremotos. La precisión en la estimación de la peligrosidad sísmica, la comprensión de la vulnerabilidad estructural y la evaluación precisa de la exposición son fundamentales para definir una estimación completa del daño y de las pérdidas ocasionadas por la ocurrencia de terremotos.

En los métodos analíticos de estimación del daño, se emplea una aproximación detallada para evaluar la interacción compleja entre la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad de las estructuras. La peligrosidad se caracteriza mediante los espectros de demanda o de respuesta, que representan aceleración en función del periodo de vibración de la estructura. Los valores representados previamente son transformados a un diagrama Sa-Sd, aceleración y desplazamiento espectral. Los espectros de demanda se construyen a partir de acelerogramas registrados, a partir de acelerogramas sintéticos asociados a un par magnitud-distancia de un terremoto conocido o a partir de un estudio probabilista de peligrosidad, como se explicará en el capítulo 3.2.1. Por otro lado, la vulnerabilidad se

describe mediante los espectros de capacidad, que representan la capacidad intrínseca de la estructura para resistir las fuerzas sísmicas.

La clave de estos métodos radica en la superposición de ambos conjuntos de espectros, generando un análisis gráfico que revela la intersección de las curvas correspondientes a la peligrosidad (demanda) y la vulnerabilidad (capacidad). El punto de cruce entre estas curvas se denomina punto de desempeño (**Figura 3**) y proporciona información crucial sobre la capacidad de la estructura para resistir las fuerzas sísmicas esperadas (ATC, 1996, 2005; Fajfar y Gašperšič, 1996).

El ATC ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de diversos métodos analíticos destinados a la estimación del daño sísmico en estructuras. Entre estos enfoques, destacan los métodos de capacidad-demanda, los cuales proporcionan una evaluación detallada de la interacción entre la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad estructural. Estos métodos, que involucran procedimientos estáticos no lineales, han sido documentados y recogidos en importantes códigos y normativas. A continuación, se explican de manera concisa algunos métodos desarrollados por el ATC, ofreciendo una visión integral de su contribución al campo de la estimación del daño sísmico.

- *Displacement Coefficient Method* (DCM), FEMA-356 (ASCE, 2000). Este enfoque implica la determinación de coeficientes de desplazamiento, los cuales relacionan la demanda sísmica con el desplazamiento estructural esperado. La identificación del punto de desempeño se logra al encontrar el desplazamiento en el cual la capacidad de la estructura iguala la demanda sísmica.
- *Improved Displacement Coefficient Method* (I-DCM), ASCE / SEI 41-06 (Poland y Mitchell, 2007). Este enfoque se basa en el cálculo refinado de los coeficientes de desplazamiento calculado en el método DCM. La identificación del punto de desempeño se realiza con mayor exactitud de la misma forma que anteriormente, determinando el desplazamiento en el cual la capacidad estructural iguala la demanda sísmica.
- *Acceleration-Displacement Response Spectrum* (ADRS). A diferencia de los métodos anteriores que se centran en coeficientes específicos, el ADRS se basa en la representación gráfica de la relación entre la aceleración y el desplazamiento estructural. Proporciona un espectro que caracteriza la respuesta sísmica esperada, permitiendo una evaluación detallada del comportamiento estructural ante diferentes niveles de demanda sísmica.

- *Modified Acceleration-Displacement Response Spectrum (MADRS)*. Este método genera una respuesta aceleración-desplazamiento modificada con respecto al método ADRS.

Una vez obtenido el punto de desempeño, se utiliza en conjunto con las curvas de fragilidad, para determinar las probabilidades asociadas a los diversos niveles de daño estructural (**Figura 3**). La relación entre el punto de desempeño y las curvas de fragilidad proporciona una comprensión detallada de cómo las estructuras pueden responder a diferentes niveles de movimiento sísmico.

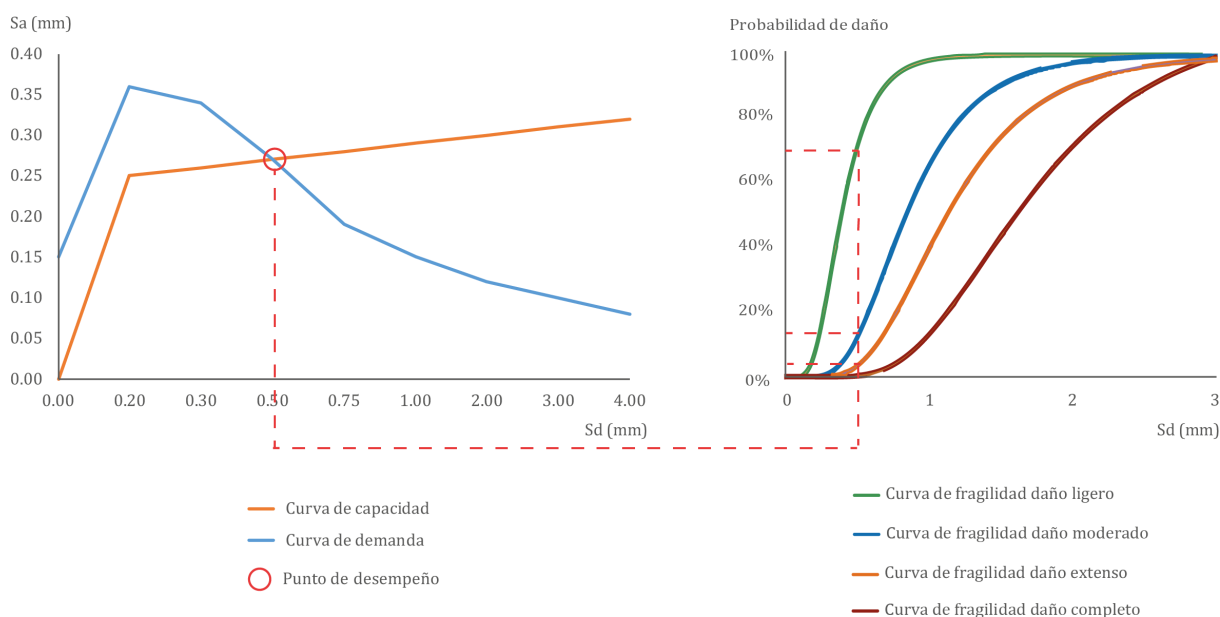


Figura 3: Combinación de punto de desempeño con curvas de fragilidad asociadas a un edificio específico para obtener probabilidades de daño.

2.2. Técnicas geoespaciales aplicadas a la estimación de la vulnerabilidad sísmica

Actualmente, se utilizan diversas técnicas geoespaciales para la mejora de definición de la vulnerabilidad sísmica en zonas urbanas y a nivel de estructura. Algunas de las tecnologías más utilizadas se mencionan a continuación.

Sensores remotos pasivos. Utilizando imágenes satelitales y fotografías aéreas, se puede obtener información detallada sobre la topografía, el uso del suelo, la distribución de edificios en una determinada área y algunas características físicas del edificio como el tipo de tejado (Torres et al., 2019).

Sistemas de Información Geográfica. Los SIG permiten almacenar, analizar y visualizar datos espaciales, lo que facilita la integración de información sobre la ubicación de

edificaciones, redes de servicios y características geológicas y topográficas. Esto ayuda a identificar áreas de riesgo y a planificar medidas de mitigación (Barbat et al., 2010; Leggieri et al., 2022).

LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Por un lado, el LiDAR aéreo proporciona modelos de elevación de alta resolución, permitiendo una evaluación detallada de la topografía y la identificación de posibles zonas de deslizamientos o fallas geológicas (Stepinac y Gašparović, 2020). Por otro lado, el LiDAR terrestre proporciona nubes de puntos tridimensionales de alta resolución con información detallada y precisa sobre la geometría de las estructuras y su entorno. La capacidad de capturar con precisión la topografía del entorno y la morfología de las edificaciones facilita la creación de modelos de edificios que permiten estimar con precisión su comportamiento frente a eventos sísmicos, contribuyendo así a una evaluación más precisa de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. Esta tecnología de escaneo láser terrestre permite mejorar la modelización estructural (Romero-Jarén et al., 2021).

2.3. Técnicas geospaciales aplicadas a los modelos tridimensionales de edificios, BIM

Los edificios constituyen la mayoría de los elementos expuestos en una ciudad. Experimentan cambios debido a la antigüedad del edificio, así como a eventos específicos, por ejemplo, incendios, terremotos, huracanes u otros fenómenos naturales o antropogénicos. Durante el siglo XX, los edificios se digitalizaban mediante dibujos bidimensionales, comúnmente denominados *Computer Aided Design* (CAD). Recientemente, ha aumentado el uso de *Building Information Model* (BIM).

BIM es una metodología integral que va más allá de ser simplemente una representación tridimensional de un edificio. En su esencia, el BIM es una representación digital y colaborativa de las características físicas y funcionales de una construcción. Incluye la topología tridimensional detallada del edificio, capturando no solo su geometría, sino también información sobre la relación y conectividad de los elementos. Este enfoque va acompañado de la definición de parámetros, que abarcan desde propiedades físicas hasta atributos funcionales y de rendimiento.

Además de la fase de diseño y construcción, el BIM se extiende a la gestión de la vida útil del edificio, permitiendo un seguimiento integral desde la planificación hasta la operación y el mantenimiento. Los cambios realizados en el modelo se reflejan automáticamente en todas las fases del ciclo de vida del edificio, lo que facilita la toma de decisiones informadas y eficientes. La capacidad de integrar datos de diversas disciplinas, como arquitectura,

ingeniería y construcción, promueve la colaboración entre equipos y profesionales, mejorando la eficiencia y la calidad en todas las etapas del proyecto. En resumen, el BIM no solo redefine la representación visual de un edificio, sino que también transforma la forma en que se planifica, construye y gestiona a lo largo de su existencia.

Uso de los BIM

El uso de BIM comprende el diseño de edificios, la gestión de la construcción, los planes de renovación y la evaluación de la eficiencia energética de los mismos. Por ejemplo, en el ámbito de Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Gestión de Instalaciones (AEC/FM siglas en inglés), estos modelos son comúnmente utilizados como elementos para el control de calidad y monitoreo durante la construcción (Bosché, 2010; Pučko et al., 2018; Wang et al., 2015).

Los BIM se utilizan habitualmente en el ámbito de la evaluación de la eficiencia energética de edificios. El estudio llevado a cabo por D'Angelo et al. (2022) destaca la importancia de superar las barreras existentes en el proceso de *retrofitting*⁵ de edificios para mejorar la eficiencia energética y alcanzar los objetivos de descarbonización propuestos por la Unión Europea. Los autores identificaron obstáculos significativos, como la limitada disponibilidad financiera, la conciencia del usuario, la incertidumbre en los marcos regulatorios y la fragmentación en la cadena de suministro, que afectan la implementación efectiva de proyectos de *retrofitting*. Para abordar estos desafíos, los autores proponen una novedosa guía paso a paso para el *retrofitting* de edificios que utiliza una combinación estratégica de BIM y la técnica de *Business Process Modelling* (BPM). Reconocen la capacidad de BIM para gestionar la información a lo largo del ciclo de vida de un edificio y la eficiencia de BPM para optimizar el flujo de trabajo de *retrofitting*, proporcionando a todas las partes interesadas los instrumentos necesarios para comprender mejor sus roles y responsabilidades en el proceso de *retrofitting*. El innovador flujo de trabajo BIM-BPM se ilustra con un caso práctico en un edificio residencial en Irlanda.

Los BIM también son muy utilizados en el ámbito de la ingeniería sísmica. Un ejemplo concreto se presenta en Biagini y Ottobri (2019). El estudio presenta un análisis de riesgo sísmico en edificios escolares. Para ello, los autores utilizan un modelo BIM obtenido tras un diseño manual en Revit, a partir de planos CAD en 2D y una nube de puntos. Otro ejemplo de aplicación en ingeniería sísmica es el estudio de Perrone y Filiatrault (2017). Los autores evalúan el riesgo sísmico de elementos no estructurales,

⁵ Retrofitting se refiere a la aplicación de mejoras o actualizaciones a una estructura existente para mejorar su rendimiento, especialmente en términos de resistencia sísmica, eficiencia energética u otros aspectos técnicos.

tales como aspersores contra incendios. El estudio parte de información extraída de un BIM, que no fue generado a partir de una nube de puntos. Aunque esta metodología difiere de nuestro enfoque, ofrece una contribución interesante que respalda la importancia de nuestra investigación en el campo de la ingeniería.

Los modelos BIM también se implementan para evaluar el rendimiento económico y las pérdidas de un edificio expuesto a riesgos sísmicos, como se describe en [Vitiello et al. \(2019\)](#). Los autores realizan un análisis estructural estático no lineal de un modelo 3D de un edificio para estimar los diferentes estados de daño. Sin embargo, el modelo del edificio no representa un edificio real y no fue creado ni a partir de una nube de puntos, ni de un dibujo CAD.

Fuentes de datos para la creación de BIMs

Para crear modelos BIM se pueden utilizar diversas fuentes de datos, como dibujos CAD, estaciones totales y fotogrametría o LiDAR. El trabajo presentado en [Angelini et al. \(2017\)](#) utiliza datos de múltiples fuentes, tales como estaciones totales, Escaneo Láser Terrestre (ELT) y fotogrametría, para construir un BIM manualmente y reconstruir monumentos y edificios históricos.

Una de las principales fuentes de datos para la elaboración de modelos BIM son las nubes de puntos, obtenidas mediante el uso de sistemas LiDAR. Los sistemas LiDAR emiten un haz de luz láser y miden distancias desde el sensor hasta cada elemento en el que rebota la luz. A partir de estas mediciones, se generan nubes de puntos, que puede incluir varios millones de puntos según la resolución configurada. Las nubes de puntos pueden representar cualquier elemento 3D en su verdadera magnitud, ya que incluyen información geométrica mediante las coordenadas tridimensionales, información radiométrica con el valor de la intensidad de la luz reflejada e información de color (RGB) si además tienen incorporada una cámara. La principal ventaja de esta técnica es que permite la adquisición de datos a gran velocidad y solo se necesitan unos pocos minutos para generar nubes de miles o millones de puntos.

Las nubes de puntos son una fuente significativa de datos. Sin embargo, la extracción de información y modelización manual puede ser muy tediosa. En los últimos años, la comunidad científica está trabajando por desarrollar métodos de visualización, segmentación automática y modelado de nubes de puntos. La segmentación y el modelado de nubes de puntos es una línea de investigación vanguardista dentro del campo AEC/FM e incluye la caracterización y segmentación de áreas urbanas basadas en cobertura y uso del suelo, segmentación de fachadas, creación

de *City Information Modelling* (CIM) y reconstrucción de habitaciones interiores, entre otros.

Las nubes de puntos se pueden crear combinando datos aéreos y terrestres. Por ejemplo, los autores en [Zolanvari et al. \(2018\)](#) presentan el método *Improved Slicing Method* (ISM), como una extensión del *Slicing Method* ([Zolanvari y Laefer, 2016](#)), para segmentar fachadas de estructuras urbanas complejas, como el edificio Rubrics en Dublín (Irlanda). Se basan en datos de LiDAR aéreos y terrestres. Como resultado del estudio, los autores consiguen producir un conjunto de datos de alta densidad con mínimas oclusiones.

Otro ejemplo de uso combinado de datos es un estudio llevado a cabo para modelar automáticamente edificios a gran escala para crear CIMs ([Chen et al., 2018](#)). En este estudio, las fuentes de datos son: 1) mapas topográficos para obtener la huella de los edificios y los valores de elevación, 2) LiDAR aéreo y 3) convenciones arquitectónicas para imponer algunas restricciones, como pendientes de techo, paralelismo entre objetos y la dirección principal de los edificios.

Sistemas LiDAR estáticos y dinámicos

Los sistemas LiDAR, tanto estáticos como dinámicos, son tecnologías de escaneo remoto que utilizan láseres para medir distancias y generar representaciones tridimensionales de entornos. Los LiDAR estáticos se despliegan en ubicaciones fijas y capturan datos desde una posición estacionaria. Estos sistemas son ideales para aplicaciones como la topografía, la cartografía y el escaneo de edificios, donde se requiere una alta precisión y resolución.

Por otro lado, los sistemas LiDAR dinámicos se integran en plataformas móviles, como vehículos terrestres, aéreos o marítimos y adquieren datos mientras se desplazan. Esta movilidad los hace ideales para la generación de mapas 3D de grandes áreas, la detección de objetos en movimiento y la creación de modelos tridimensionales de carreteras, entornos urbanos y edificios con gran cantidad de objetos y objetos de geometrías complejas.

En términos de comparación, los LiDAR estáticos ofrecen una mayor precisión y resolución, ya que permiten un mayor tiempo de muestreo en un área específica. Esto los hace adecuados para aplicaciones que requieren detalles minuciosos. Por otro lado, los LiDAR dinámicos destacan por su capacidad para cubrir grandes extensiones rápidamente, capturar datos de entornos en constante cambio y evitar oclusiones con facilidad y rapidez. La elección entre uno u otro depende de la aplicación específica y de los requisitos de precisión y cobertura.

En el estudio de [Che y Olsen \(2018\)](#) los autores utilizan diferentes nubes, para así disponer de nubes de puntos tomadas desde diferentes orígenes y poder modelizar elementos complejos y oblicuos. El estudio también utiliza el algoritmo de Crecimiento de Regiones para segmentar la nube de puntos. Aunque los resultados de este enfoque fueron positivos, solo funciona con nubes de puntos estructuradas. Los autores organizaron las nubes de puntos utilizando una cuadrícula.

Algoritmos para la segmentación de nubes de puntos

La comunidad científica trabaja activamente en el desarrollo de métodos para procesar nubes de puntos. Los algoritmos más comunes aplicados son la Transformada de Hough, *Random Sample Consensus* (RANSAC), *Principle Components Analysis* (PCA), los *Fast Point Feature Histograms* (FPFH), el Crecimiento de Regiones, Componentes Conectados, el Corte de Grafos y la Supervoxelización ([Che et al., 2019](#)).

En concreto, el algoritmo de crecimiento de Regiones es una técnica utilizada en el procesamiento de nubes de puntos para segmentar y modelar regiones homogéneas dentro de un conjunto tridimensional de datos. Este algoritmo se utiliza habitualmente para segmentar y modelizar elementos complejos. Su objetivo principal es agrupar puntos cercanos que comparten propiedades similares, como color, intensidad o distancia, formando así regiones coherentes en el espacio. El proceso comienza con la selección de una semilla inicial, que actúa como punto de partida para la expansión de la región. Tras ello, el algoritmo evalúa los vecinos de la semilla y agrega aquellos que cumplen con ciertos criterios de similitud a la región. Este proceso se repite iterativamente, extendiendo la región y fusionando puntos que cumplen con los criterios predefinidos. El resultado es una representación segmentada de la nube de puntos, donde cada región captura características específicas del entorno tridimensional, facilitando el análisis y la interpretación de la información capturada.

En [Xiong et al. \(2013\)](#) se presenta una metodología que trabaja automáticamente modelando tanto superficies completamente visibles, como superficies con oclusiones., utilizando únicamente nubes de puntos obtenidas con sensores terrestres. Para segmentar la nube de puntos, los autores utilizan el algoritmo de Crecimiento de Regiones. El resultado del estudio es un modelo 3D del interior de un edificio, incluyendo paredes, incluyendo los huecos de puertas y ventanas, techos y suelos. Hay investigaciones que combinan diferentes algoritmos y generan nuevos procesos y desarrollos. Por ejemplo, los autores en [Rabbani et al. \(2006\)](#) presentan un algoritmo de segmentación que trabaja con nubes de puntos terrestres no organizadas. El nuevo algoritmo está compuesto por dos fases de estimación normal.

La primera de ellas consiste en ajustar un plano a los puntos vecinos, como se describe en [Che y Olsen \(2017\)](#) y en [Nurunnabi et al. \(2012\)](#). La segunda de las fases consiste en aplicar el algoritmo de Crecimiento de Regiones.

El algoritmo RANSAC es una herramienta esencial en la modelización de nubes de puntos. Este algoritmo se utiliza para identificar modelos matemáticos óptimos que describen de manera eficiente subconjuntos de datos ruidosos. En el contexto de las nubes de puntos, RANSAC puede emplearse para ajustar modelos como planos, líneas o incluso formas más complejas, eliminando valores atípicos y ruido. La fortaleza del RANSAC radica en su capacidad para manejar datos contaminados, como aquellos afectados por errores de medición o presencia de objetos no deseados. Su uso frecuente se debe a su versatilidad y eficacia en diversos escenarios, como la segmentación de superficies, la detección de objetos tridimensionales y la estimación de parámetros geométricos ([Fischler y Bolles, 1981](#)).

En el estudio de [Jung et al. \(2014\)](#) se presenta un enfoque semiautomático para modelar nubes de puntos interiores. Los autores, primero segmentan automáticamente la nube de puntos para la extracción de planos (RANSAC) y luego eliminan puntos ruidosos y trazan límites para la extracción de contornos, seguido de un modelado BIM manual. En [Ochmann et al. \(2016\)](#) se presenta una metodología automática para crear modelos 3D de interiores de edificios a partir de nubes de puntos estáticas utilizando RANSAC. Los autores logran modelar suelos, techos, paredes y aberturas en las paredes, como puertas y ventanas. La fase de segmentación se lleva a cabo con: 1) filtrado automático de desorden ([Ochmann et al., 2014](#)) y 2) fusión automática de diferentes escaneos para una sola habitación.

Manhattan World

El estudio presentado en [Mura et al. \(2016\)](#) consiste en un método de reconstrucción para interior de edificios. Dicho método segmenta las nubes de puntos utilizando las distancias entre las paredes de las habitaciones. Este enfoque aún no se ha probado con nubes de puntos no estructuradas y solo reconstruye elementos estructurales planos, como techos, suelos y paredes. Esta investigación ha sido muy relevante para la comunidad científica, ya que fue un primer enfoque capaz de procesar interiores de edificios más allá del *Manhattan World* ([Coughlan y Yuille, 1999](#)).

El *Manhattan World*, en el contexto de la modelización de nubes de puntos de edificios, es una premisa que asume la prevalencia de estructuras arquitectónicas que siguen patrones geométricos ortogonales característicos de edificios dispuestos en ángulos

rectos. Esta premisa se considera valiosa porque simplifica la tarea de segmentación y modelización al introducir restricciones geométricas que reflejan la organización típica de elementos de edificios. Facilita el trabajo al permitir la aplicación de algoritmos específicos diseñados para identificar y extraer características basadas en estas geometrías regulares, como la detección de planos verticales y horizontales.

Sin embargo, es importante destacar que el mundo real no siempre se ajusta perfectamente a la premisa del *Manhattan World*. Muchos edificios contienen elementos no lineales. Por lo tanto, aunque el *Manhattan World* simplifica la modelización en edificios convencionales, existen desafíos en la aplicación de esta premisa en entornos más complejos. Los trabajos que van más allá de la premisa del *Manhattan World* son esenciales para abordar la diversidad y complejidad de los entornos del mundo real, permitiendo una modelización más precisa y completa de nubes de puntos. Estos enfoques ampliados son fundamentales para mejorar la aplicabilidad y robustez de los algoritmos de procesamiento de nubes de puntos en una variedad de contextos.

Estándar IFC

Una de las aplicaciones principales de los modelos de edificios creados a partir de nubes de puntos es la transferencia de dichos modelos a programas de modelado BIM para su futura explotación.

Sin embargo, la conversión de formatos de modelos no es trivial. El Estándar de Intercambio de Datos para la Construcción, *Industry Foundation Classes* (IFC), es un protocolo esencial en el ámbito del BIM. El estándar fue desarrollado por BuildingSMART International y se desarrolla en la norma ISO 16739-1:2018. El IFC es un formato de archivo neutro e interoperable que facilita la comunicación entre diferentes plataformas y software utilizados en el ciclo de vida de un proyecto de construcción. Este estándar define un conjunto común de objetos y sus relaciones, permitiendo la representación digital de elementos arquitectónicos, estructurales y elementos del grupo *Mechanical, Electrical and Plumbing* (MEP). La principal ventaja del IFC radica en su capacidad para superar las barreras de interoperabilidad, ya que garantiza que la información del modelo BIM pueda transferirse sin pérdida de datos entre distintas aplicaciones y sistemas. Esto promueve la colaboración eficiente entre profesionales de la construcción y mejora la coordinación de datos en todas las fases del proyecto, desde el diseño hasta la construcción y el mantenimiento.

La exportación de modelos BIM al formato IFC puede ser un proceso desafiante debido a la complejidad inherente de representar la diversidad de información detallada que

abarca un proyecto de construcción. La riqueza y la variedad de datos incluidos en un modelo BIM, que abarca desde la geometría hasta la información sobre materiales, sistemas y relaciones, deben ser convertidos de manera precisa al formato IFC para garantizar la interoperabilidad entre diferentes plataformas y software. La complejidad se intensifica cuando se consideran las diferencias en la implementación del estándar IFC en distintas aplicaciones BIM. La tarea implica definición precisa de propiedades y atributos, así como la consideración de las diferentes clasificaciones y taxonomías utilizadas en el modelo original y en el estándar IFC. A pesar de los desafíos, superar esta complejidad es crucial para aprovechar al máximo las ventajas del BIM en términos de colaboración y coordinación en todas las etapas del ciclo de vida de la construcción.

En el estudio presentado por [Macher et al. \(2017\)](#), los autores construyen modelos de edificios en 3D a partir de nubes de puntos organizadas como datos de entrada. Este enfoque comienza rotando la nube de puntos para establecer la dirección principal del edificio, es decir, la dirección dominante de la fachada. Luego, los autores segmentan la nube de puntos y crean modelos 3D de las paredes y los suelos. Finalmente, un programa de modelado CAD 3D de código abierto exporta los elementos 3D a un formato de archivo IFC.

2.4. *Retrofitting* en edificios

El *retrofitting* en edificios es un proceso de mejora estructural y no estructural, diseñado para fortalecer y actualizar estructuras existentes, con el objetivo de hacerlas más resilientes, seguras y eficientes en términos de rendimiento sísmico, energético o funcional ([Ma et al., 2012](#)). Este enfoque se aplica a construcciones ya existentes que pueden no cumplir con los estándares modernos o enfrentar nuevos desafíos, como cambios normativos o necesidades funcionales modificadas ([Tartaglia et al., 2022](#)).

El *retrofitting* es una práctica crucial para preservar y prolongar la vida útil de edificaciones históricas, así como para actualizar construcciones más antiguas a estándares contemporáneos de seguridad y eficiencia. Este proceso contribuye significativamente a la sostenibilidad y resiliencia de las comunidades urbanas al asegurar que los edificios existentes evolucionen para enfrentar los desafíos cambiantes del entorno construido.

Los métodos de *retrofitting* estructural abarcan una amplia gama de técnicas, desde la incorporación de refuerzos en elementos estructurales críticos hasta la instalación de dispositivos de aislamiento sísmico ([Di Sarno y Elnashai, 2009](#)). La elección de la estrategia adecuada depende de diversos factores, como la evaluación detallada de la

condición estructural existente, las normativas de diseño sismorresistente vigentes, el tipo de amenazas sísmicas predominantes en la región y los requisitos de carga y uso del edificio.

En el ámbito de la ingeniería estructural, la adaptación de edificaciones existentes a los estándares actuales de diseño sismorresistente se ha convertido en una preocupación fundamental para garantizar la seguridad y la resiliencia sísmica. Las normativas y códigos de diseño sismorresistente desempeñan un papel crucial al proporcionar directrices específicas para la planificación, evaluación y ejecución de intervenciones de *retrofitting*.

Estas normativas, que evolucionan en respuesta a avances científicos, establecen principios técnicos y criterios de diseño para abordar la vulnerabilidad de las estructuras existentes frente a eventos sísmicos. Al considerar el *retrofitting*, estos códigos ofrecen un marco normativo que orienta a los ingenieros en la toma de decisiones fundamentadas, asegurando que las estructuras mejoradas cumplan con los estándares de seguridad y rendimiento estructural.

El Eurocódigo es un conjunto de normativas y estándares de diseño estructural adoptado por muchos países europeos. Aborda el concepto de *retrofitting* en el contexto de la seguridad y resistencia estructural de edificaciones existentes. En particular, el Eurocódigo 8, EC8 ([European Committee For Standardization, 2004](#) y [2005](#)) se centra en las estructuras sujetas a acciones sísmicas, proporcionando directrices para el diseño sísmico y la evaluación de edificaciones.

En relación con el *retrofitting*, el Eurocódigo 8 establece principios específicos para la mejora de la resistencia sísmica de edificios existentes. Estos principios incluyen la evaluación detallada de la capacidad sísmica actual de la estructura, la identificación de deficiencias estructurales y la aplicación de medidas de mejora para alcanzar niveles de seguridad y rendimiento establecidos.

Algunas consideraciones clave del Eurocódigo 8, en relación con el *retrofitting* incluyen:

Evaluación de la capacidad sísmica existente. El EC8 prescribe métodos detallados para evaluar la capacidad sísmica actual de una estructura existente. Esto implica analizar la resistencia y rigidez de los elementos estructurales, así como la capacidad de absorción y disipación de energía.

Criterios de diseño sísmico. El Eurocódigo 8 proporciona criterios específicos para el diseño de medidas de *retrofitting*, asegurando que se cumplan estándares de seguridad y

rendimiento sísmico. Esto abarca desde la selección de materiales hasta la implementación de técnicas de refuerzo.

Identificación de zonas de vulnerabilidad. El EC8 destaca la importancia de identificar zonas específicas de vulnerabilidad en la estructura existente, orientando así la aplicación de medidas de *retrofitting* hacia áreas críticas.

Documentación y verificación. El Eurocódigo enfatiza la necesidad de documentar adecuadamente el proceso de *retrofitting* y realizar verificaciones estructurales para garantizar que se cumplan los requisitos de diseño y que la estructura mejorada sea capaz de resistir adecuadamente las acciones sísmicas.

En resumen, el Eurocódigo 8 proporciona un marco normativo detallado para el *retrofitting* sísmico, estableciendo pautas específicas que los ingenieros deben seguir para mejorar la resistencia sísmica de edificaciones existentes. Estas normativas buscan garantizar que las intervenciones sean técnicamente sólidas y contribuyan a la seguridad y resiliencia estructural en caso de eventos sísmicos.

**Bloque II. METODOLOGÍA,
DESARROLLO DE LA
INVESTIGACIÓN Y RESULTADOS**

Capítulo 3. PROPUESTA METODOLÓGICA

Capítulo 3. PROPUESTA METODOLÓGICA

Este capítulo de propuesta metodológica se estructura en dos apartados. El primero presenta ABM-indoor, la metodología desarrollada en la presente tesis para la modelización automática de edificios a partir de nubes de puntos. El segundo apartado incluye el proceso integral de evaluación de riesgo sísmico de un edificio de importancia especial. Se presenta un flujo bien definido para la estimación del riesgo sísmico, desde la modelización inicial de la estructura hasta la consideración de su capacidad frente a diversas acciones, tanto permanentes como transitorias. Por último, se incluye la propuesta de medidas de *retrofitting* destinadas a mejorar la respuesta estructural del edificio. Estas medidas se diseñan estratégicamente para fortalecer la resistencia y capacidad de la estructura, garantizando su integridad y seguridad frente a posibles eventos sísmicos. El enfoque considera la particularidad de la ubicación del edificio, situándolo en una región con mayor peligrosidad sísmica para la cual fue originalmente diseñado. Además, podría ocurrir que los valores de peligrosidad en la región en la que está construido el edificio fueran superiores a los considerados en el momento de construcción porque la normativa de diseño sismorresistente se hubiera actualizado con valores mayores de aceleración.

En los dos capítulos siguientes se presentan las aplicaciones de toda la metodología planteada en este capítulo, desde la metodología ABM-indoor para la modelización de un edificio de forma automática (Capítulo 4), hasta la estimación de riesgo sísmico de dicho edificio (Capítulo 5). Para ello se utiliza un edificio modelo, un edificio educacional de importancia especial.

3.1. Uso y aplicación de técnicas geoespaciales para la modelización automática de edificios

En este apartado, se presenta el algoritmo desarrollado en la tesis para modelar automáticamente elementos estructurales y no estructurales del interior de edificaciones construidas. El algoritmo se ha bautizado con el nombre *As-Built Modeller* (ABM-indoor). ABM-indoor es un algoritmo nuevo que se ha desarrollado específicamente como parte de la investigación de la presente tesis doctoral. Una vez desarrollado, se ha implementado en un potente programa informático, MDTopX® (Digi21, 2024), que es utilizado por múltiples usuarios relacionados con el tratamiento de nubes de puntos y modelos digitales. El algoritmo se desarrolló por la necesidad de complementar enfoques existentes al modelar simultáneamente, elementos estructurales y de la envolvente de edificios y sus elementos de contenido. Desde este punto de la memoria en adelante, haremos uso del término "algoritmo" para referirnos a ABM-indoor.

3.1.1. Introducción. ABM-indoor.

La determinación y modelado de los elementos estructurales de los edificios son de utilidad en AEC/FM. Sin embargo, para algunos campos relacionados con la ingeniería civil, como la ingeniería sísmica, también es necesario definir la ubicación y vulnerabilidad de los sistemas no estructurales y de los elementos del contenido del edificio (ATC, 2018). La estimación del riesgo sísmico considera todos los elementos expuestos de los edificios. En regiones de alto riesgo sísmico, es crucial conocer los sistemas estructurales de los edificios que podrían resultar dañados por un terremoto. Habitualmente no se suelen tener en cuenta elementos no estructurales y de contenido, como particiones interiores, sistemas de conductos y tuberías, mobiliario y equipos electrónicos, entre otros. Sin embargo, en áreas de baja peligrosidad sísmica, los sistemas no estructurales y los elementos de contenido suelen causar la mayoría de los daños cuando se expone a la infraestructura y la población a un movimiento sísmico (Torres et al., 2019).

ABM-indoor segmenta automáticamente nubes de puntos y crea superficies 3D de los elementos de las edificaciones, tanto elementos estructurales como elementos de contenido. Existen métodos previamente publicados sobre la automatización para la creación de BIM. A continuación, se enumeran las características diferenciadoras del enfoque propuesto.

La primera característica distintiva es que ABM-indoor realiza automáticamente las diferentes fases para obtener el modelo 3D de los elementos de un edificio. Las fases son 1) interpretación de datos, 2) segmentación y clasificación de la nube de puntos, 3) análisis de la precisión de la clasificación y 4) modelado 3D.

El segundo aspecto es la capacidad del algoritmo para trabajar con nubes de puntos provenientes de sistemas de adquisición estáticos y dinámicos. Los datos de diferentes sistemas no suelen estar organizados de la misma manera, por lo que el procesamiento de la nube de puntos no puede realizarse de manera similar. Sin embargo, ABM-indoor puede procesar cualquier tipo de nube de puntos independientemente de su origen.

La tercera característica es que ABM-indoor no asume la existencia de geometrías, por lo que los modelos 3D resultantes representan la forma y ubicación reales de los elementos que componen el edificio. Trabajos previos han asumido geometrías "perfectas" basadas en la nube de puntos. Sin embargo, algunas áreas de investigación en edificaciones, como la detección de irregularidades y deformaciones en edificios, estructuras o patrimonio

histórico, requieren herramientas que modelen formas del mundo real, incluso si son incompletas.

Finalmente, el cuarto aspecto es que ABM-indoor modela elementos planos y no planos contenidos dentro de edificaciones. Modelar los elementos de contenido no planos como objetos individuales también es de interés y es importante para ampliar las aplicaciones de este tipo de modelado.

El algoritmo ABM-indoor se desarrolló debido a la falta de una herramienta única que tuviera todas estas características mencionadas anteriormente. Se considera que el enfoque desarrollado contribuye a un avance novedoso en el estado del arte en el procesamiento de nubes de puntos y modelado 3D de edificaciones.

3.1.2. Objetivos

Antes de empezar a desarrollar ABM-indoor se fijaron dos objetivos fundamentales que debía cumplir el algoritmo:

1. Segmentar automáticamente nubes de puntos organizadas y no organizadas de elementos de edificación. Por ejemplo, paredes, suelos, techos, soportes y componentes del edificio
2. Modelar automáticamente superficies 3D de estos elementos

Estos objetivos se han fijado con la finalidad de poder definir el tamaño, posición y orientación de todos los elementos del edificio correctamente, ya que conocer esta información es crucial para obtener un inventario o realizar un análisis estructural completo.

La creación del modelo 3D de un edificio sirve de base para crear un modelo BIM que contribuya a múltiples áreas de investigación. El *Level Of Development* (LOD) del BIM define la resolución del trabajo. El algoritmo desarrollado se centra en generar superficies útiles para construir un modelo LOD 300 en 3D. Como se describe en el conjunto de directrices, estándares y procedimientos específicos para la implementación del BIM presentado por la *American Institute of Architects* (AIA, 2013), los modelos LOD 300 representan los elementos de objetos específicos con información sobre el tamaño, forma, ubicación y orientación (**Tabla 1**).

Tabla 1: Características principales de los elementos BIM basadas en el Nivel de Desarrollo

Nivel de desarrollo	Representación geométrica	Información sobre cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación.	Información no gráfica adjunta
LOD 100	Símbolo o representación genérica	No	No
LOD 200	Sistema, objeto o ensamblaje genérico.	Sí. Aproximado	Sí. No obligatorio
LOD 300	Sistema, objeto o ensamblaje específico	Sí	Sí. No obligatorio
LOD 350	Sistema, objeto o ensamblaje específico	Sí. Interactúa con otros sistemas.	Sí. No obligatorio
LOD 400	Sistema, objeto o ensamblaje específico	Sí. Información de producción, ensamblaje e instalación.	Sí. No obligatorio
LOD 500	Sistema, objeto o ensamblaje específico	Sí. Los elementos son una representación verificada en campo en cuanto a tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación.	Sí. No obligatorio

3.1.3. Metodología

Para el desarrollo de ABM-indoor se ha utilizado únicamente la información geométrica de los puntos. El uso de la información radiométrica o de color de la nube de puntos queda fuera del alcance de la presente tesis de investigación. No es posible garantizar la recopilación simultánea de la nube de puntos y las imágenes, lo que puede resultar en la presencia de objetos en movimiento que dificulten la segmentación (Mahmoudabadi et al., 2017). ABM-indoor sigue el flujo de trabajo ilustrado en la **Figura 4**. En el primer paso, el algoritmo segmenta la nube de puntos y etiqueta los puntos mediante un agrupamiento automático. Este agrupamiento proporciona un conjunto de entidades geométricas divididas en siete *Object Class* (OC): suelos, techos, paredes, soportes, elementos en el suelo, elementos que cuelgan de los techos y otros elementos. Cada OC puede contener múltiples entidades, como en edificaciones comunes que incluyen más de una pared, un soporte o incluso un componente del edificio.

En el segundo paso, ABM-indoor divide la nube de puntos en entidades, lo que resulta en la creación automática de superficies 3D. El modelado de superficies se ejecuta en tres

fases: 1) definición de los límites de cada entidad; 2) filtrado de polígonos basado en su área y 3) suavizado de bordes de polígonos.

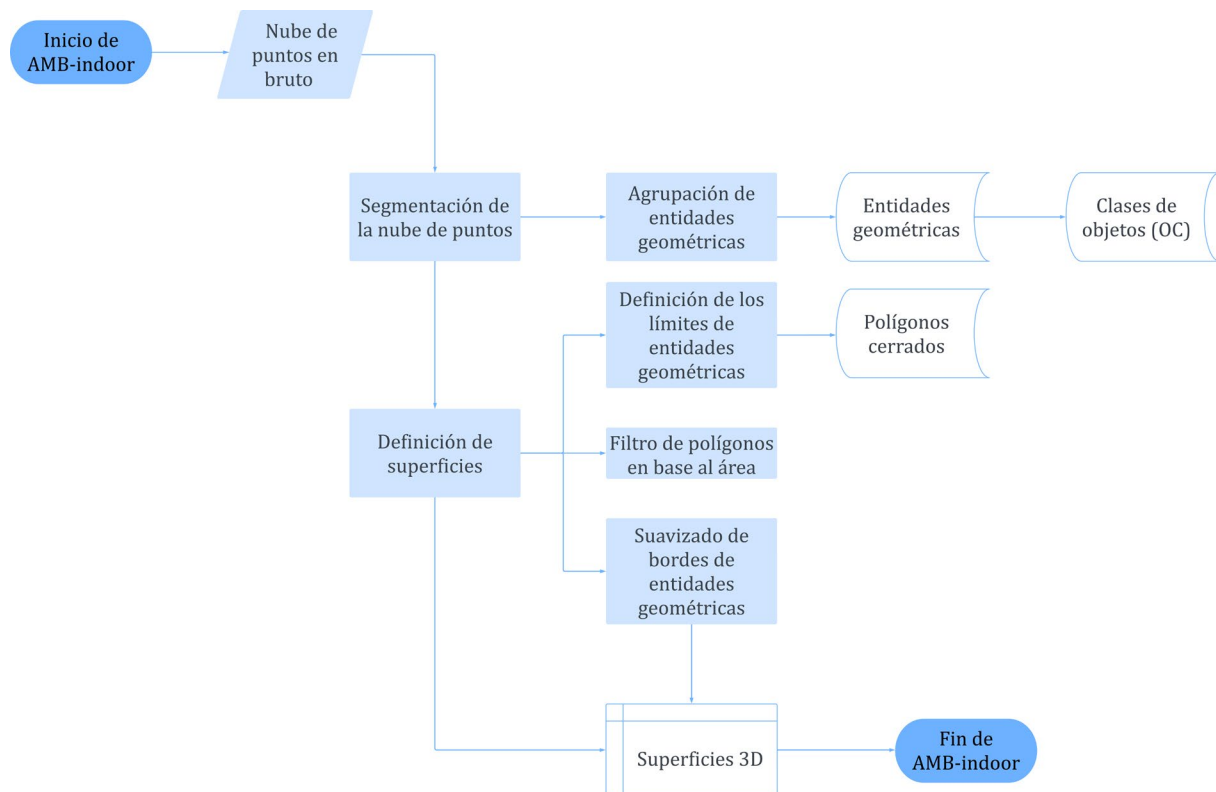


Figura 4: Flujo de trabajo de ABM-indoor.

En función del tipo de geometría de las entidades, los procesos dentro de la metodología descrita en la **Figura 4** son distintos. Tras analizar la geometría de los elementos de diferentes nubes de puntos, establecemos dos tipos principales de elementos: planos y no planos. Esta distinción es importante debido a las diferencias de procesamiento, identificación y manejo de cada tipo de elemento. Los suelos, los techos y las paredes se consideran elementos planos, mientras que los elementos no planos incluyen los muebles, los coches y las luminarias, entre otros. Los soportes de un edificio pueden ser planos o no planos según la forma de su perfil, ya que los soportes pueden ser cilíndricos (no planos) o rectangulares (planos). A continuación, se describe el proceso seguido para los distintos tipos de entidades geométricas. Primero se describe como se aplica ABM-indoor para obtener suelos y techos, dado que son geometrías similares. Seguidamente, se describe el proceso para obtener paredes. Posteriormente, se detalla la obtención de soportes. Y, por último, se describe el proceso para la obtención de elementos no planos.

Suelos y techos

ABM-indoor segmenta la nube de puntos mediante agrupamiento automático. Para extraer de la nube de puntos las clases de objetos de suelos y techos, el algoritmo

considera el valor de elevación de cada punto. En términos generales, el algoritmo genera capas a distintas elevaciones y agrupa todos los puntos que se sitúan dentro de una misma capa. A continuación, se explica más en detalle el procedimiento seguido por ABM-indoor para definir suelos y techos.

Inicialmente, el algoritmo calcula el valor de la moda de los valores de elevación de todos los puntos de la nube de puntos. A partir de este valor, ABM-indoor determina capas de 10 cm de espesor, con un límite superior e inferior. Todos los puntos que quedan incluidos dentro de esos dos límites se asocian a un conjunto de puntos y se etiquetan como un clúster. El algoritmo repite este proceso de segmentación para identificar otros valores de elevación repetidos y establece nuevos límites superiores e inferiores para definir nuevos clústeres. La **Figura 5** muestra la vista en alzado de una sección de un edificio de varios pisos y la clasificación inicial de los puntos de la sección.

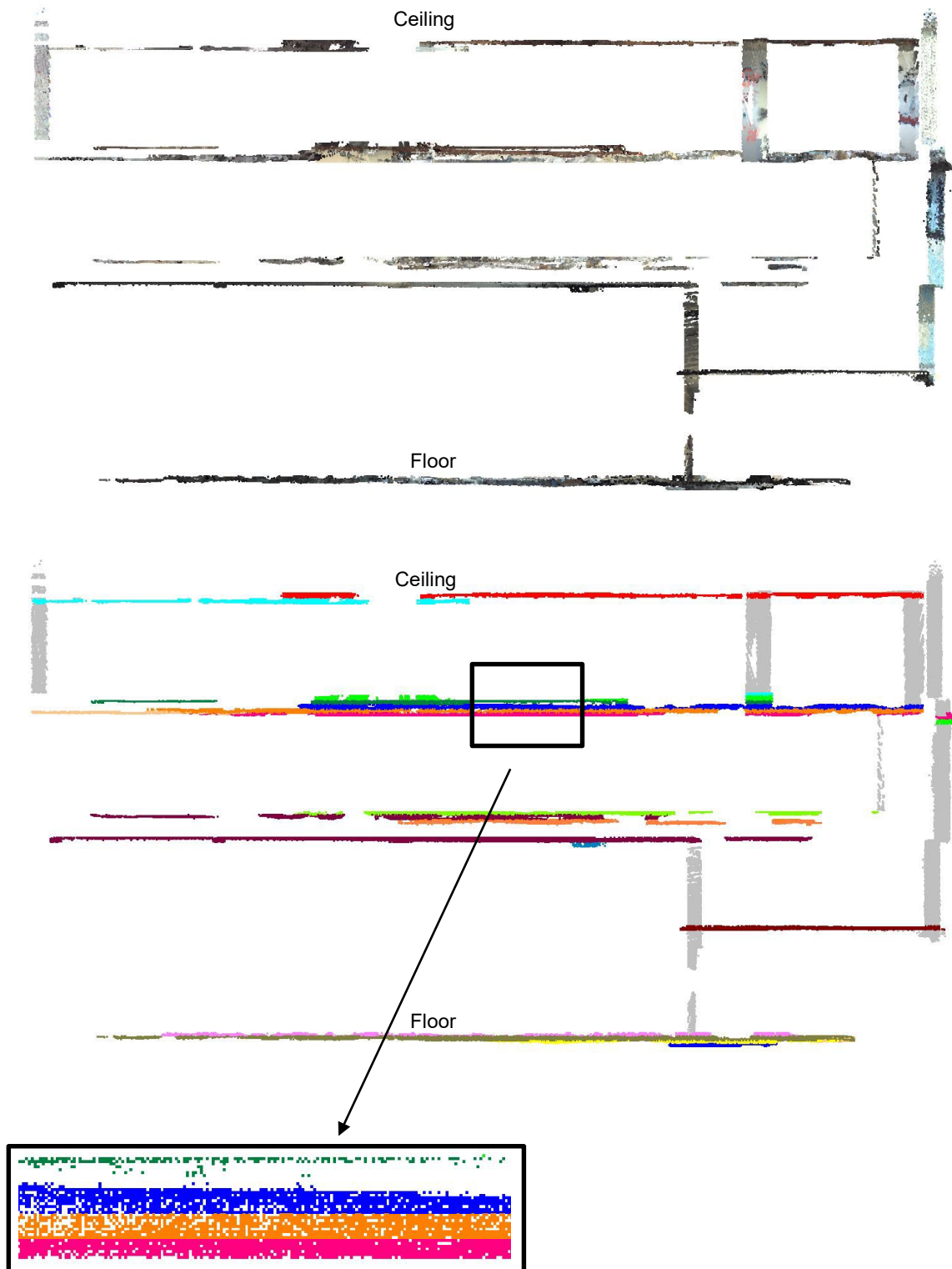


Figura 5: Ejemplo del proceso de clasificación de la nube de puntos para suelos y techos. Las paredes aparecen en gris porque están fuera del alcance de la figura.

Inicialmente, todos los clústeres tienen un grosor de 10 cm. La imagen superior de la **Figura 5** muestra la sección de elevación de un edificio de varios pisos en el color registrado y la imagen inferior de la misma figura muestra la primera clasificación de la

sección. La ampliación incluida en la parte inferior izquierda representa clústeres adyacentes sobre los cuales los límites se superponen. La superposición ocurre al segmentar niveles consecutivos de un piso. El algoritmo modifica estos límites para establecer nuevos clústeres de mayor espesor. Después de restablecer los límites, las entidades geométricas pueden tener un grosor variable (**Figura 6**)

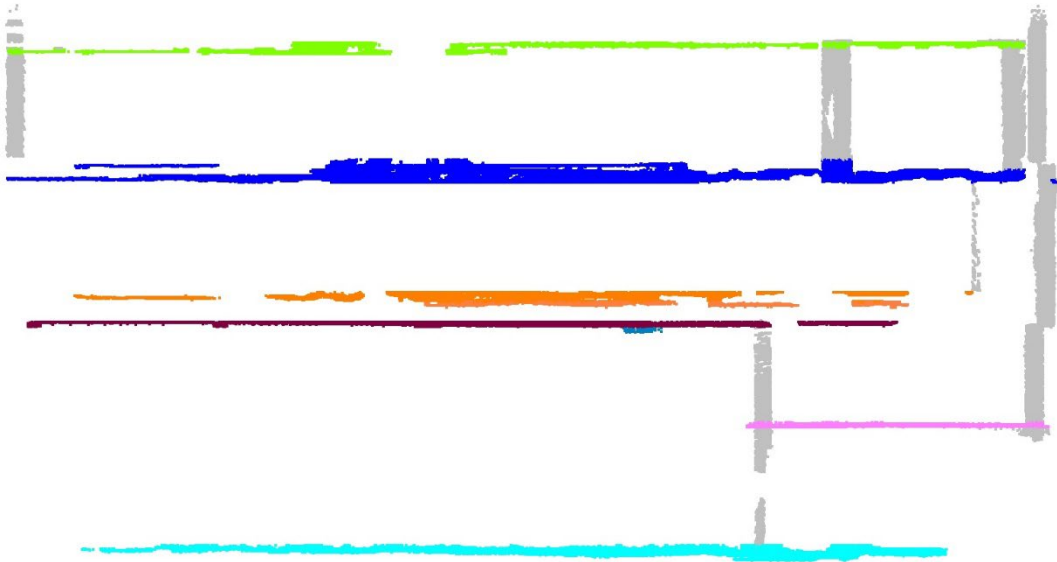


Figura 6: Ejemplo de la clasificación de suelos y techos (seis clases).

Posteriormente, ABM-indoor crea superficies 3D a partir de las entidades geométricas segmentadas anteriormente. Para crear las superficies tridimensionales, se utiliza el algoritmo de Triangulación de Delaunay (Isenburg et al., 2006), que proporciona relaciones y contornos internos y externos.

Al analizar las geometrías de los polígonos generados para suelos y techos, se observa que algunos exhiben geometrías regulares o simples (**Figura 7.a**). Sin embargo, otros tienen geometrías irregulares, como se ve en la **Figura 7.b**.

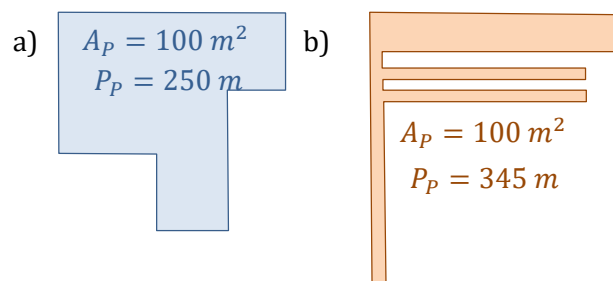


Figura 7: Ejemplos de polígonos regulares (a) y polígonos irregulares (b). Se especifican las áreas (A_p) y perímetros (P_p) de los polígonos.

Los polígonos irregulares y alargados dificultan la asociación de superficies 3D con los elementos estructurales del edificio (suelos y techos). Por este motivo, ABM-indoor filtra automáticamente los polígonos según su área útil mediante el cálculo del “Área del Círculo Proporcional” (APC, de sus siglas en inglés). Para ello, se utilizan las ecuaciones 3-1 y 3-2. Publicaciones recientes analizaron y filtraron polígonos en función de su grado de compacidad en lugar de su área útil (Cerri, 2018; Schröter et al, 2018) y los resultados indican que el APC debe ser igual o superior a 1 m². Por lo tanto, ABM-indoor elimina aquellos polígonos cuyo APC es inferior a 1 m².

$$APC_i = Ap_i / Rt_i^2 \quad 3-1$$

$$Rt_i = R_{2-i} / R_{1-i} \quad 3-2$$

Donde:

Ap_i es el área del polígono i ;

Rt_i es la relación perímetro-área;

R_{2-i} y R_{1-i} son los radios del círculo proporcional al perímetro y al área del polígono i respectivamente;

Tras completar el filtrado de polígonos, ABM-indoor realiza un suavizado automático de bordes para ayudar a homogeneizar las geometrías de los polígonos. Este ajuste se denomina “Polígonos Interiores Paralelos”. Este suavizado elimina las convexidades y concavidades de los límites del polígono. Cada nodo del polígono se forma mediante la unión de dos bordes, desde n_i hasta n_j . Primero, desde cada nodo del polígono, el algoritmo establece un arco de radio de 10 cm (Figura 8.a). La intersección del arco con la bisectriz de dos bordes consecutivos en el polígono define el nodo homólogo (n'_i , ..., n'_j) del “Polígono Auxiliar Interior” (IAP, de sus siglas en inglés). En segundo lugar, el algoritmo elimina los nodos existentes a una distancia de 20 cm o más de los nodos homólogos (Figura 8.a). Finalmente, ABM-indoor crea un nuevo polígono, dando como resultado una superficie 3D con bordes suavizados y menos nodos (Figura 8.b). En el ejemplo mostrado en la Figura 8, ABM-indoor descarta los nodos 5 y 6 porque la distancia entre los nodos existentes y sus homólogos supera los 20 cm.

El proceso de suavizado de bordes es opcional. Si el usuario no considera necesario llevar a cabo el suavizado, puede anularse dicha función. Para el desarrollo de la presente tesis doctoral, se sabe que el edificio no ha sufrido ningún tipo de erosión, por lo que los límites de las paredes deberían corresponder a líneas continuas sin convexidades o concavidades

exageradas. Por lo tanto, se considera apropiado aplicar el suavizado de bordes. Sin embargo, si las superficies 3D se van a examinar en busca de deformaciones o erosiones, entonces los límites de las clases deben representar fielmente su geometría.

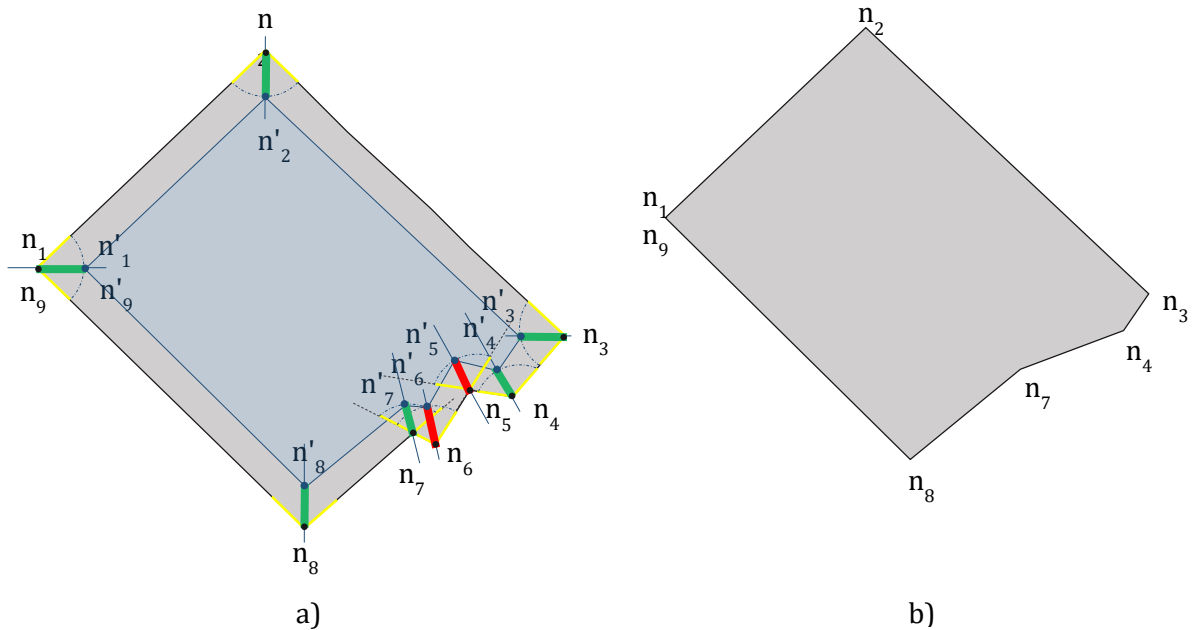


Figura 8: Ejemplo del flujo de trabajo del suavizado de bordes mostrando el polígono existente (a) y el polígono ajustado sin los nodos 5 y 6 (b).

Paredes

Después de segmentar y modelar los suelos y techos, ABM-indoor continúa con la identificación de las paredes. Estos elementos se consideran planos verticales que pueden tener múltiples direcciones. Por lo tanto, establecer la dirección principal del edificio es esencial. Para ello, se utilizan las direcciones de los bordes de los polígonos generados en la sección anterior. Los bordes correspondientes a más de cuatro metros de longitud permiten establecer una dirección preliminar desde la cual ABM-indoor ajusta iterativamente diferentes planos verticales que se ajustan de manera óptima a la distribución de los conjuntos verticales (π , σ , ρ en la **Figura 9**). Para mejorar el ajuste durante cada iteración, el algoritmo extrae los vectores característicos y los acimuts de los planos verticales ajustados ($X\pi$, $X\sigma$, $X\rho$ y $\theta X X\pi$, $\theta X X\sigma$, $\theta X X\rho$, respectivamente, en la **Figura 9**). Por último, define el plano óptimo de un conjunto específico de puntos (Ψ en la **Figura 9**).

Dado que el edificio con el que se trabaja en la presente tesis doctoral tiene solo dos direcciones, la dirección secundaria debería ser perpendicular a la principal definida anteriormente. Después de definir las direcciones principales y secundarias del edificio,

el algoritmo segmenta la nube de puntos por conjuntos verticales, es decir, entidades geométricas correspondientes con paredes.

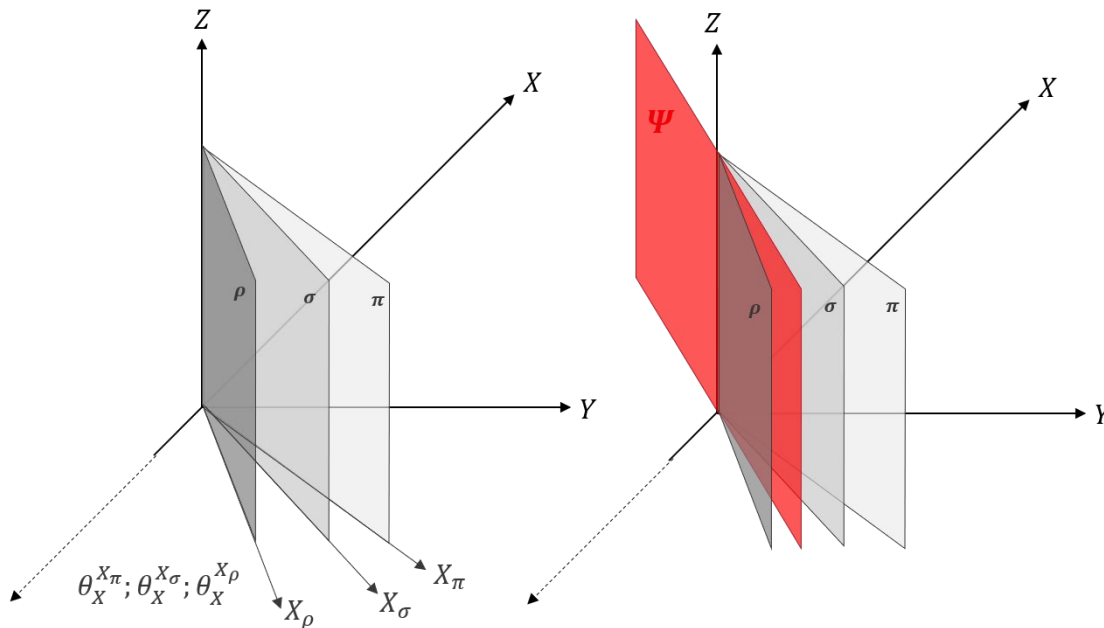


Figura 9: Esquema del ajuste de planos verticales. El plano rojo (Ψ) denota el plano final que se ajusta de manera óptima al clúster específico de puntos.

Para crear superficies 3D a partir de los clústeres de paredes, ABM-indoor aplica el mismo procedimiento desarrollado para modelar los suelos y techos. Primero, el algoritmo establece los límites de las entidades geométricas segmentadas. Segundo, ABM-indoor aplica un filtrado de polígonos y un suavizado de bordes. Sin embargo, la solución para este proceso no es trivial, ya que es necesario trabajar con polígonos verticales en lugar de horizontales. Después de generar los límites del polígono, ABM-indoor abate los planos horizontalmente a través de la transformación 3D de Helmert. En la **Figura 10**, ω , φ y κ denotan las componentes cartesianas de la rotación y X_0 , Y_0 y Z_0 son las componentes cartesianas de la traslación. Los ejes rojos (x' , y' y z') representan el sistema de referencia local y los ejes en negro (X , Y , Z) indican los ejes cartesianos del sistema de referencia global. Una vez se proyectan los polígonos, se filtran mediante el algoritmo según su área útil y los bordes se suavizan utilizando el método de “Polígonos Interiores Paralelos”. Finalmente, ABM-indoor crea superficies en 3D de los polígonos e invierte la proyección horizontal.

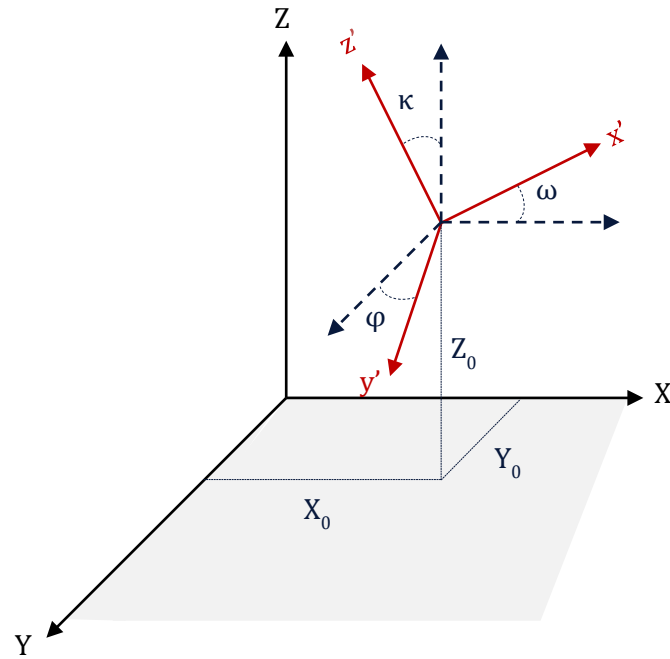


Figura 10: Transformación tridimensional de Helmert aplicada para proyectar las superficies y puntos horizontales.

Soportes

Los soportes se corresponden con elementos verticales que constituyen una parte importante del sistema estructural de carga del edificio. Estos elementos están fabricados con diferentes materiales, típicamente acero u hormigón armado. Además, los soportes pueden adoptar diferentes formas geométricas, como rectangular, cilíndrica o cuadrada, por lo que se pueden corresponder con elementos planos o no planos. Un aspecto muy importante es que los soportes pueden ser visibles o no visibles, ocultas entre los muros. En este estudio, se consideran soportes visibles rectangulares.

Para ayudarnos a definir los soportes como entidades geométricas, se consideran los huecos regulares en suelos y techos tal y como se obtuvieron a partir de la nube de puntos (**Figura 11**). Se asume que un hueco en un suelo debe tener un hueco equivalente en el techo paralelo superior, dado que los soportes están conectados al suelo y al techo. Estos huecos se denominan huecos de conexiones. El algoritmo primero identifica los huecos de conexiones y, posteriormente, crea un límite externo para cada hueco de conexión (rectángulos rojos en la **Figura 11**). Estos límites externos deben tener una forma normalizada, por ejemplo, rectangular, cilíndrica o cuadrada, así como un perímetro de al menos un valor específico, según lo indicado por el usuario. Entre estos huecos equivalentes en suelo y techo existe una superficie imaginaria (los prismas verticales en la **Figura 11**). El algoritmo selecciona todos los puntos que quedan dentro de cada

superficie imaginaria y considera dichos puntos como elementos de un clúster particular, que representaría un soporte. Antes de considerar los conjuntos segmentados como entidades geométricas definitivas, el algoritmo verifica que los puntos de cada clúster cumplen con la condición de continuidad vertical. De esta forma, se evita incluir puntos que no pertenezcan a los soportes.

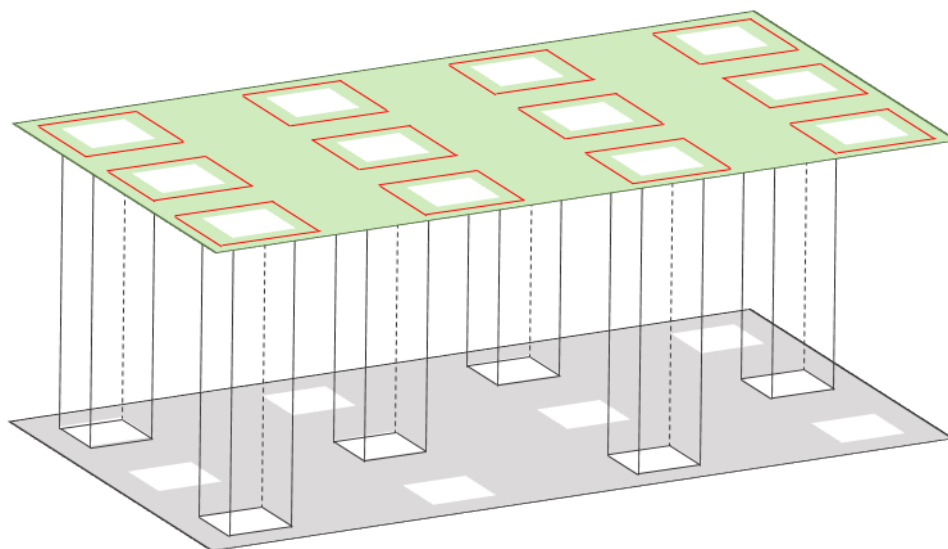


Figura 11: Ejemplo de los espacios en suelo y techo como resultado de las conexiones de los soportes entre ambos elementos horizontales. El plano gris representa el suelo y el plano verde representa el techo.

Cuando se segmenta la nube de puntos, el algoritmo establece los límites de los clústeres según la forma de la superficie imaginaria. Los límites no requieren ningún filtro ni suavizado de bordes porque se crean a partir de bases y dimensiones regulares establecidas por el usuario. A partir de estos límites, el algoritmo consolida los polígonos de cada clúster y finalmente crea superficies en 3D de los soportes.

Elementos no planos

Hasta este punto de la memoria, se ha detallado exhaustivamente el proceso mediante el cual el algoritmo ABM-indoor lleva a cabo la segmentación y modelización de elementos estructurales, suelos, techos y soportes, y de la envolvente del edificio, paredes. Sin embargo, es crucial destacar que la versatilidad de este algoritmo no se limita exclusivamente a elementos arquitectónicos o estructurales. ABM-indoor va más allá al ofrecer la capacidad de segmentar, clasificar y modelar automáticamente la nube de puntos para elementos de contenido presentes en el entorno interior del edificio. Estos elementos pueden abarcar desde extintores, estanterías, lámparas hasta equipos informáticos, o incluso vehículos en caso de aparcamientos. Este proceso implica una

adaptabilidad intrínseca del algoritmo, permitiéndole identificar y representar con precisión una amplia variedad de objetos.

A continuación, se abordará específicamente la metodología aplicada para esta fase del algoritmo, destacando cómo se lleva a cabo la segmentación, clasificación y modelado automático de elementos de contenido, contribuyendo así a la comprensión integral de la capacidad de ABM-indoor en la modelización detallada de entornos tridimensionales.

En la ejecución de esta etapa, el algoritmo realiza una exclusión selectiva de los puntos previamente clasificados como elementos arquitectónicos y estructurales, generando así una nube de puntos con una densidad reducida. ABM-indoor, a continuación, procede a la identificación de conjuntos aislados dentro de esta nube y realiza una evaluación detallada de las relaciones de adyacencia entre las características del suelo y el techo. Únicamente después de este análisis meticuloso, el algoritmo lleva a cabo la modelización precisa de los elementos de contenido detectados.

Dada la variabilidad de los elementos de contenido, los cuales pueden exhibir geometrías tanto planas como no planas, además de formas irregulares, surge una complejidad en su modelización. Estos objetos, caracterizados por su distribución aleatoria en todo el edificio, presentan desafíos en su representación mediante los mismos procedimientos anteriormente descritos. Existen diversas soluciones matemáticas para transformar información discreta en continua, como aquellas basadas en la triangulación de Delaunay (1934) que han sido aplicadas en geometría computacional desde la década de 1970. Sin embargo, nuestra necesidad específica se orienta hacia un enfoque que brinde soluciones tridimensionales.

Para abordar esta exigencia, adoptamos un proceso basado en la triangulación 3D (Cavendish et al., 1985), que implica establecer relaciones a través de tetraedros simples y esferas. Los tetraedros, con caras triangulares, se introducen incrementalmente para optimizar el tiempo de cálculo y minimizar los requisitos de memoria. A diferencia de soluciones previas, el algoritmo evita el aumento sustancial del tiempo de procesamiento.

Un estudio anterior propuso la detección de bordes de silueta como solución para modelar elementos no planos (Che y Olsen, 2018). A pesar de ello, encontró dificultades al tratar de identificar los bordes de elementos en las nubes de puntos generadas por MMS debido a la ausencia de sobras. En la **Figura 12**, se muestra el flujo de trabajo seguido para llevar a cabo la clasificación y modelado de elementos de contenido de un edificio (Arranz, 2013). Además, la **Figura 13** presenta el pseudocódigo del algoritmo correspondiente.

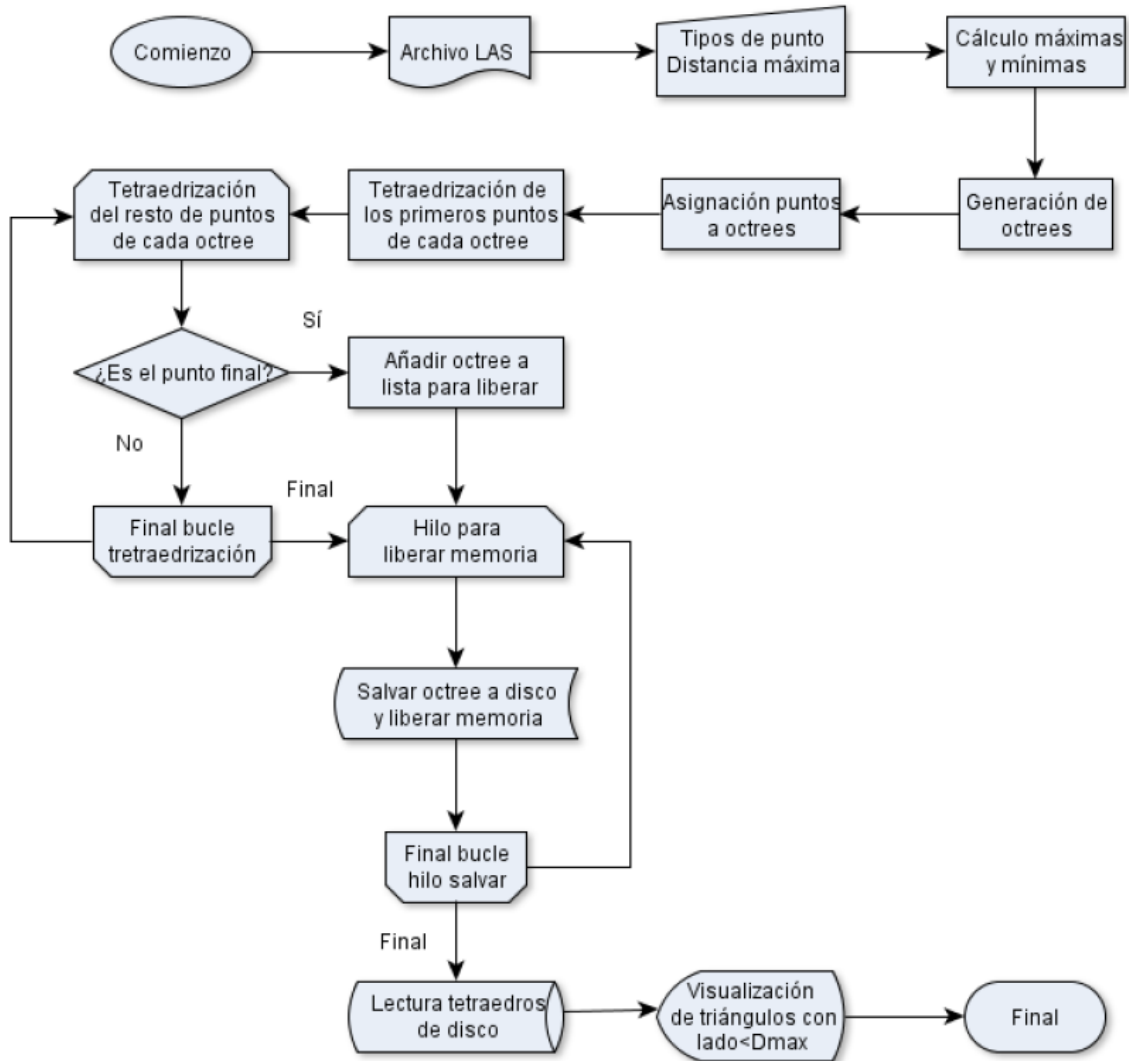


Figura 12: Flujo de trabajo del algoritmo de tetraedrización (Arranz, 2013).

El núcleo de nuestro algoritmo de triangulación 3D emplea dos hilos de cálculo. Por un lado, define los tetraedros y, por otro, almacena los octrees⁶ resultantes en un archivo. Aunque esto proporciona un conjunto de tetraedros, se requiere la presentación de la triangulación *Triangulated Irregular Network* (TIN) de las caras externas del objeto. ABM-indoor modela los elementos de contenido basándose en este algoritmo de triangulación 3D, representándolos mediante volúmenes y asociándolos con una clase de objeto específica. Un área futura de investigación consistirá en comparar los objetos extraídos con bibliotecas predefinidas para establecer un nivel óptimo de detalle de los elementos de contenido para un BIM.

⁶ Octree: estructura jerárquica de datos tridimensional utilizada en informática gráfica y visualización para representar y gestionar la subdivisión de un espacio tridimensional.

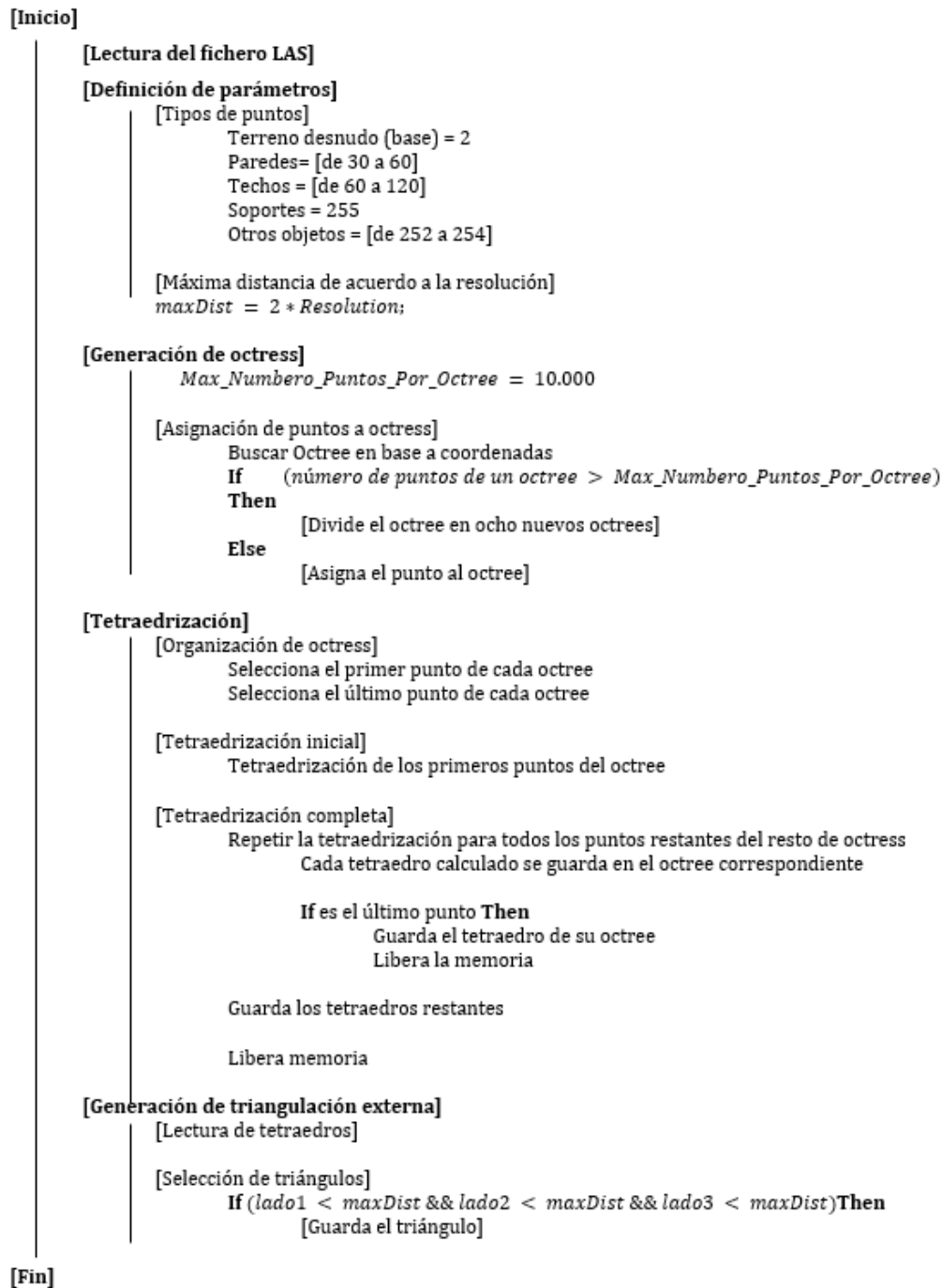


Figura 13: Pseudocódigo del algoritmo de tetraedrización.

3.2. Estimación del riesgo sísmico en un edificio de importancia especial

En el capítulo actual, se presenta de manera detallada la metodología propuesta para la estimación integral del riesgo sísmico en un edificio de importancia especial. Según NCSE-02 (Ministerio de Fomento, 2009b) se consideran construcciones de importancia especial *“aquellas cuya destrucción por el terremoto, pueda interrumpir un servicio imprescindible o dar lugar a efectos catastróficos. En este grupo se incluyen las*

construcciones que así se consideren en el planeamiento urbanístico y documentos públicos análogos, así como en reglamentaciones más específicas". Por otro lado, según el informe WP06 del proyecto RISK-UE (Monge et al., 2004), se consideran instalaciones esenciales aquellas que están destinadas a proporcionar servicios esenciales a la comunidad y deben mantenerse operativas durante y después de un terremoto. Entre otros, se consideran edificios de importancia especial o instalaciones esenciales los hospitales, edificios docentes, edificios de instalaciones básicas de comunicación, edificios de las fuerzas de seguridad del estado, construcciones catalogadas como edificios históricos y edificios donde se prevea una ocupación masiva de personas en determinados momentos, entre otros.

En este capítulo se abordan minuciosamente todos los pasos y procedimientos necesarios para cubrir cada fase del análisis del riesgo sísmico, incluyendo la estimación de la peligrosidad, vulnerabilidad y daño. La metodología se ha establecido considerando las particularidades de los edificios de importancia especial.

3.2.1. Estimación de la peligrosidad sísmica

Cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica

La caracterización de la peligrosidad sísmica constituye la primera fase fundamental en un estudio de riesgo sísmico. Esta etapa implica la evaluación del movimiento sísmico potencial en una región de interés, movimiento que puede esperarse con una cierta probabilidad durante un intervalo de tiempo definido. En esencia, se busca comprender y cuantificar la probabilidad de excedencia de distintos niveles de movimiento que puedan ser generados por la ocurrencia de eventos sísmicos de diversas magnitudes y a diferentes distancias desde la zona de estudio. Este análisis se traduce en la generación de curvas de peligrosidad que representan la probabilidad asociada a distintas intensidades del movimiento, usualmente representado por la aceleración pico (PGA) o diferentes aceleraciones espectrales SA(T). A partir de esas curvas estimadas en distintos puntos del territorio a evaluar, se pueden generar mapas que representan la distribución espacial de las aceleraciones sísmicas esperadas para una determinada probabilidad de excedencia. Estas curvas y mapas son esenciales, ya que sirven como insumos fundamentales para la siguiente fase del estudio, donde se realizará una evaluación detallada de la vulnerabilidad estructural. El objetivo último de la fase de peligrosidad sísmica es obtener los espectros de demanda para los diferentes escenarios estimados.

El estudio de peligrosidad sísmica se ha desarrollado siguiendo una metodología probabilista zonificada. La peligrosidad sísmica (H) se caracteriza como la probabilidad

(P) de alcanzar o superar un nivel de movimiento predefinido (A) durante un intervalo de tiempo específico, también denominado periodo de exposición (t). El cálculo de la peligrosidad sísmica se lleva a cabo tal y como se indica en la ecuación 3-3. Para desarrollar el cálculo se consideran los terremotos que han tenido lugar en una zona de influencia alrededor del emplazamiento a estudiar a lo largo de la historia. Habitualmente la zona de influencia se define como un círculo de radio 300 km con centro el emplazamiento de interés.

$$H(a, t) = P(a \geq A, \text{ en } t \text{ años}) \quad 3-3$$

Donde:

a es el parámetro que representa el movimiento sísmico estimado, que habitualmente se identifica con la aceleración pico del mismo (PGA en g y cm/s²) o con alguna aceleración espectral (SA(T) en g y cm/s²).

La probabilidad de excedencia del movimiento definido en la ecuación 3-3 es función de tres variables independientes: distancia fuente-emplazamiento (r), magnitud (m) y épsilon (ε). El parámetro ε está relacionado con la variabilidad del modelo de predicción del movimiento fuerte y representa el número de desviaciones típicas que se consideran en la predicción sobre el valor medio que proporciona el modelo.

Las metodologías probabilistas clásicas (Cornell, 1968) consideran la sismicidad distribuida en fuentes o zonas sismogénicas de potencial sísmico homogéneo. Para ello, se utilizan modelos zonificados, cuyo principio es que la sismicidad se distribuye aleatoriamente en tiempo y espacio dentro de una determinada zona, asumiendo un modelo de Poisson para su representación, lo que implica independencia espacial y temporal entre los terremotos que ocurren dentro de esa zona. Esos modelos son independientes del tiempo, es decir, se considera que la ocurrencia de un evento no está condicionada por el tiempo transcurrido desde el evento anterior. Esta hipótesis requiere considerar solo sismos principales dentro de cada zona, eliminando réplicas, premonitores y enjambres. Al considerar la ocurrencia de sismos dentro de una cierta zona regulada por un modelo de Poisson, se puede identificar la peligrosidad como la probabilidad de excedencia del movimiento en un periodo de t años mediante la ecuación 3-4 (Kramer, 1996).

$$P(a > A \text{ en } t \text{ años}) = 1 - e^{-\lambda(a>A)t} \quad 3-4$$

Donde:

$P(a > A \text{ en } t \text{ años})$ es la probabilidad de excedencia en t años; t es el tiempo de exposición y λ es la tasa anual de excedencia.

El periodo de retorno Tr es un concepto estadístico y se define como la inversa de la probabilidad anual de excedencia. Y la probabilidad anual de excedencia en el futuro se aproxima a la tasa anual de excedencia en el pasado λ ($a > A$). Por lo tanto, la ecuación 3-4 también puede escribirse en función del periodo de retorno, tal y como se muestra en la ecuación 3-5.

$$P(a > A \text{ en } t \text{ años}) = 1 - e^{-t/Tr} \quad 3-5$$

El periodo de retorno se elige en función de la importancia de la estructura a diseñar. Cuanto mayor es la importancia de la estructura, es necesario considerar movimientos con menor probabilidad de ser excedidos. Esto supone acudir a periodos de retorno mayores en el diseño de la estructura en cuestión. Por ejemplo, aplicando la ecuación 3-5 para un tiempo de exposición de 50 años, se obtiene que para un periodo de retorno de 475 años la probabilidad de alcanzar o exceder el correspondiente movimiento sísmico es del 10% y para un periodo de retorno de 975 años es del 5% (ecuaciones 3-6 y 3-7 respectivamente)

$$P(a > A \text{ en } 50 \text{ años}) = 1 - e^{-\frac{50}{475}} = 0.10 \quad 3-6$$

$$P(a > A \text{ en } 50 \text{ años}) = 1 - e^{-\frac{50}{975}} = 0.05 \quad 3-7$$

Los métodos probabilistas de estimación de la peligrosidad sísmica asumen ciertas hipótesis y modelos para cuantificar la influencia de la fuente y del medio por el que se propagan las ondas sísmicas. La definición de la fuente y de la propagación está sujeta a una gran subjetividad. Son dos de los factores más determinantes en la incertidumbre final de los resultados de peligrosidad sísmica. Ante el desconocimiento de los modelos reales de fuente y propagación, la metodología *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*, PSHA (Baker, 2008) pone especial énfasis en la consideración de distintas hipótesis sobre la información básica: catálogos sísmicos, geometría y caracterización de zonas fuente, distribución temporal, espacial y de tamaño de los sismos dentro de cada zona y leyes de atenuación del movimiento del suelo (modelos de propagación). Además, lleva a cabo un análisis de las incertidumbres asociadas (Bernreuter et al., 1992; Budnitz et al., 1997). Las distintas opciones consideradas en cada estado del proceso de cálculo se combinan en un árbol lógico.

Resultados de peligrosidad sísmica. Espectros UHS

En resumen, los resultados del estudio de peligrosidad por métodos zonificados clásicos proporcionan una primera caracterización del movimiento sísmico del suelo esperado para una cierta probabilidad prefijada, con independencia del tiempo. Un esquema de la secuencia seguida por estos métodos se muestra en la **Figura 14**.

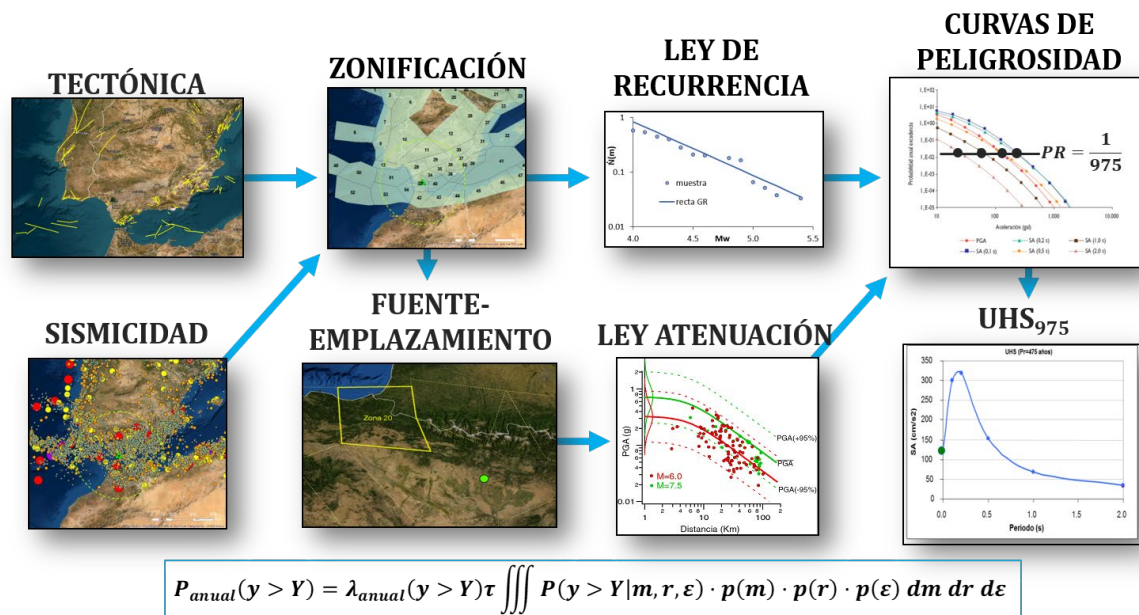


Figura 14: Esquema del método probabilista zonificado de estimación de peligrosidad.

En la presente tesis doctoral, se ha realizado la estimación de la peligrosidad sísmica con un doble enfoque, siguiendo los métodos anteriormente descritos:

- Probabilista, adoptando un método zonificado y estimando los modelos de recurrencia de las zonas sismogénicas y fallas activas, para cuantificar los movimientos asociados a distintas probabilidades de excedencia. Este método proporciona aceleraciones, u otros parámetros de movimiento, con una cierta probabilidad de excedencia, por contribución de todos los posibles sismos que puedan ocurrir en el área de influencia. Por tanto, no representan un escenario sísmico concreto.
- Probabilistas-deterministas, estimando unos escenarios sísmicos a partir de un análisis de desagregación de la peligrosidad estimada previamente por un método probabilista. A partir de este análisis se definen los sismos de control, que son los escenarios sísmicos concretos que presentan mayor contribución al movimiento estimado en el análisis probabilista de la peligrosidad, para una cierta probabilidad fijada. Ese nivel de movimiento viene dado usualmente por el valor de la aceleración pico o espectral para la probabilidad considerada y se denomina “movimiento objeto”. Los escenarios que más contribuyen al movimiento objeto se identifican con los sismos de control y viene representados por una o varias ternas magnitud, distancia y épsilon (M, R y ϵ). Son entonces escenarios deterministas, pero con una probabilidad asociada, la del movimiento objeto para el que han sido definidos.

A partir del estudio probabilista de peligrosidad sísmica se definen espectros de respuesta uniforme (*Uniform Hazard Spectrum*, UHS) para los diferentes periodos de retorno para los que se ha llevado a cabo la estimación de la peligrosidad. Los espectros UHS representan las aceleraciones espectrales esperadas con una probabilidad uniforme, en función de su periodo.

Desagregación de la peligrosidad e identificación de los sismos de control

La estimación de la peligrosidad sísmica requiere sumar las contribuciones de todos los posibles escenarios, representados por pares de valores magnitud-distancia, que contribuyen a la excedencia del movimiento predefinido. Sin embargo, la curva de peligrosidad no da información específica sobre las características del sismo (tamaño y localización) que con mayor probabilidad causará la excedencia del movimiento en el emplazamiento de interés. A este sismo se le denomina terremoto de control para la frecuencia espectral considerada. Determinar las características de este sismo requiere encontrar el conjunto de valores de las variables magnitud, distancia y ϵ , en adelante denominado terna (M, R y ϵ), que presentan mayor contribución a la peligrosidad. Para ello, es necesario llevar a cabo un proceso de descomposición de la peligrosidad total en contribuciones parciales. Este proceso se conoce como desagregación de la peligrosidad (Bazzurro y Cornell, 1999; Bernreuter et al., 1992).

El método para llevar a cabo la desagregación de la peligrosidad sísmica implica los siguientes pasos:

1. Definición de los movimientos objetivos: Se seleccionan las ordenadas espectrales y los periodos de retorno para los cuales se desea realizar el análisis de desagregación.
2. Representación gráfica de triple entrada: Para cada ordenada espectral y periodo de retorno seleccionados, se crea una representación gráfica que muestra la magnitud del sismo en el eje vertical, la distancia fuente-emplazamiento en el eje horizontal y la probabilidad de excedencia asociada al movimiento sísmico predefinido (**Figura 15**).
3. Identificación del terremoto de control: Se busca el par de valores de magnitud y distancia que presenta la mayor contribución a la peligrosidad en el sitio de interés. Este terremoto, denominado terremoto de control para la frecuencia espectral considerada, representa las características más probables del sismo que causaría la excedencia del movimiento predefinido en el sitio.

4. Análisis e interpretación: Se analizan los resultados obtenidos y se interpretan en el contexto de la evaluación del riesgo sísmico. Esto puede implicar la identificación de las fuentes sísmicas más significativas que contribuyen a la peligrosidad en el sitio, así como la evaluación de la variabilidad y la incertidumbre asociadas a los resultados.

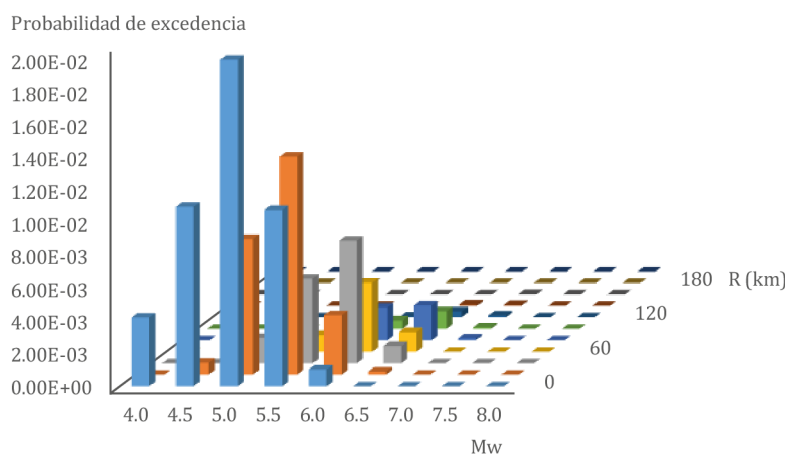


Figura 15: Ejemplo de la representación gráfica de la desagregación de la peligrosidad.

Cada elemento en esta representación tridimensional corresponde a un sismo específico, caracterizado por sus parámetros sísmicos fundamentales. La magnitud y la distancia del sismo se proyectan en los ejes horizontales y la probabilidad de excedencia se representa en el eje vertical. Mediante esta representación, es posible identificar la terna (M , R y ϵ) que presenta mayor contribución a la peligrosidad de la región de estudio. Por ejemplo, en el ejemplo mostrado en la **Figura 15**, la terna (M , R y ϵ) que parece presentar mayor contribución se asocia a un sismo de magnitud $5.0 M_w$, distancia (fuente-emplazamiento) de hasta 20 km y ϵ 3.

Escenarios específicos híbridos probabilistas-deterministas

En la presente tesis, los escenarios sísmicos específicos tienen una naturaleza dual, siendo tanto deterministas como probabilistas. Por un lado, los escenarios se definen a partir de sismos de control, que tienen un carácter determinista al representar eventos específicos con propiedades bien definidas. Por otro lado, los sismos de control se obtienen a partir de un estudio de la peligrosidad sísmica probabilista, lo que confiere a los escenarios la componente probabilística. La fusión de las dos naturalezas proporciona una perspectiva integral de los escenarios sísmicos, ya que combina la especificidad asociada a los sismos de control deterministas con la consideración de una probabilidad derivada del movimiento objeto previamente estimado en el análisis probabilista. De esta manera, se

logra una aproximación más completa y precisa para la evaluación del riesgo sísmico en el área de estudio.

La obtención de sismos de control a través de la desagregación de la peligrosidad sísmica proporciona información valiosa para la definición de escenarios sísmicos específicos. Estos sismos de control, que representan eventos característicos en términos de magnitud, distancia y probabilidad de excedencia, se utilizan como base para la generación de escenarios sísmicos específicos.

En el proceso de establecer escenarios sísmicos específicos, se asocian las características identificadas en los sismos de control a fuentes sísmicas que comparten propiedades similares, es decir, que son compatibles con las condiciones de magnitud y distancia de los sismos de control definidos por la desagregación. Estas fuentes sísmicas se pueden corresponder con segmentos específicos de fallas geológicas, regiones tectónicas o cualquier otra fuente identificable de actividad sísmica.

La asociación de las características de los sismos de control a fuentes sísmicas específicas permite la creación de escenarios realistas y detallados para la evaluación del riesgo sísmico. Como resultado final, se obtienen los espectros específicos correspondientes a los escenarios asociados a los sismos de control, que constituirán las curvas de demanda en el posterior cálculo de riesgo.

3.2.2. Definición de la vulnerabilidad sísmica

En el contexto de la presente investigación, se ha optado por la aplicación de un enfoque analítico para abordar la caracterización de la vulnerabilidad sísmica. El principal motivo porque el que se ha decidido aplicar un enfoque analítico es por la naturaleza del objeto de estudio: un edificio de importancia especial. Las normativas vigentes resaltan la necesidad de caracterizar de manera detallada la vulnerabilidad sísmica de estructuras de esta categoría. Así, la elección de este método se sustenta en la relevancia de cumplir con los criterios normativos establecidos para edificios de importancia especial, contribuyendo a fortalecer la base metodológica de la estimación del riesgo sísmico y proporcionando resultados robustos que aborden de manera específica las características particulares de este tipo de edificaciones.

En este apartado, se presenta el flujo de trabajo establecido en la presente tesis para definir la vulnerabilidad sísmica de un edificio de importancia especial mediante métodos analíticos.

Definición del modelo del edificio

En esta primera fase, se lleva a cabo la **recopilación de datos** detallados sobre la estructura. Para ello, es de utilidad disponer de planos arquitectónicos y estructurales, informes sobre el proyecto constructivo, información sobre los materiales utilizados y las características geométricas de los elementos que componen el edificio. Posteriormente, utilizando la información recopilada, se procede al desarrollo de un **modelo digital estructural** del edificio. Este modelo tiene como objetivo representar de manera precisa la geometría de la estructura, así como la distribución de masa y rigidez, incorporando también las propiedades de los materiales utilizados en la construcción.

La modelización del edificio puede realizarse de diversas maneras. Por un lado, existe la opción de llevar a cabo la modelización de forma manual, utilizando programas de diseño y modelado 3D que permiten crear representaciones digitales detalladas de la estructura. Estos programas ofrecen flexibilidad en la definición de la geometría y propiedades del edificio, pero también requieren un conocimiento técnico sólido y son procesos que demandan un tiempo significativo.

Por otro lado, la modelización automática se ha convertido en una alternativa eficiente gracias a la aplicación de técnicas geoespaciales, como se ha detallado en el capítulo 3.1. Estas técnicas permiten obtener información detallada sobre la geometría y características del edificio de manera automatizada, aprovechando datos provenientes de sensores remotos, imágenes satelitales y sistemas LiDAR, entre otros. La aplicación de estas técnicas agiliza el proceso de modelización, reduce la posibilidad de errores humanos y proporciona una representación más precisa de la estructura en cuestión. En el Capítulo 4 se aplica ABM-indoor para modelar de forma semiautomática la geometría de un edificio de estudio. De esta forma, se persigue validar la metodología propuesta sobre modelización automática a partir de nubes de puntos.

Análisis integrados para la calibración del modelo del edificio

En la secuencia de fases destinadas a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un edificio de importancia especial, se propone llevar a cabo análisis integrados que culminan en la calibración del modelo estructural. La primera fase, el **análisis modal**, se realiza para evaluar las características dinámicas de la estructura. Consiste en determinar las formas modales naturales de vibración de la estructura y las frecuencias asociadas. Estas formas modales representan las configuraciones específicas en las que la estructura vibra de manera predominante en respuesta a una excitación dinámica.

A continuación, se lleva a cabo el **análisis modal operacional** (en adelante denominado como OMA). Este análisis permite definir el comportamiento dinámico de un edificio o estructura durante su operación real. Consiste en registrar la respuesta de vibración de la estructura en diferentes ubicaciones utilizando instrumentación especializada, como acelerómetros. Estos datos de campo permiten identificar los modos de vibración naturales del edificio, así como sus frecuencias y formas modales reales bajo las condiciones de carga y operación reales (Aras y Karapınar, 2021; Barghi y Azadbakht, 2011; Bertero et al., 2022).

La información obtenida mediante el OMA es crucial para la validación y calibración de modelos analíticos utilizados en estudios de vulnerabilidad sísmica. Al comparar los modos de vibración observados con los predichos por el modelo, se puede ajustar y mejorar la precisión del modelo estructural, lo que contribuye a una evaluación más precisa del comportamiento sísmico del edificio en situaciones de operación real.

El último análisis llevado a cabo es el **análisis de acciones sobre la edificación**. En esta fase, se lleva a cabo una evaluación detallada de las fuerzas y cargas que actúan sobre una estructura con el propósito de verificar su capacidad portante y la estabilidad general del edificio. Este análisis es esencial para garantizar que la estructura cumpla con los requisitos de seguridad estructural establecidos en códigos y normativas de construcción.

La verificación estructural de un edificio implica varios pasos esenciales. En primer lugar, es necesario identificar las situaciones de dimensionado que resulten determinantes para la seguridad y estabilidad de la estructura. Seguidamente, se deben establecer las acciones relevantes. Posteriormente, se verifica que, para las situaciones de dimensionado correspondientes, no se superan los estados límite críticos. En estas verificaciones, se consideran los efectos del paso del tiempo, incluyendo acciones químicas, físicas y biológicas, así como acciones variables repetidas, que pueden afectar la capacidad portante y la aptitud al servicio a lo largo del periodo de servicio del edificio. Las situaciones de dimensionado deben abarcar todas las condiciones previsibles durante la ejecución y la utilización de la obra, considerando la probabilidad asociada a cada una. Además, se clasifican en situaciones persistentes las condiciones normales de uso, situaciones transitorias las condiciones aplicables durante un tiempo limitado, excluyendo acciones accidentales, y situaciones extraordinarias las condiciones excepcionales o acciones accidentales a las que puede estar expuesto el edificio. Este enfoque integral garantiza una comprobación exhaustiva de la estructura en diferentes escenarios y condiciones.

A continuación, se lleva a cabo un **análisis estático no lineal**, también denominado pushover. Este método nos permite obtener la curva de capacidad del edificio. La curva de capacidad relaciona el esfuerzo cortante total en la base del edificio y el desplazamiento de un nodo de control, normalmente situado en planta de cubierta. Para llevar a cabo este análisis se aplica una fuerza parametrizada que tiene la misma forma que la fuerza que provoca un terremoto en el edificio.

Finalmente, se lleva a cabo la **calibración del modelo**. La fase de calibración del modelo, que sigue a las etapas anteriores (análisis modal, OMA y análisis de acciones en la edificación), desempeña un papel crucial en la definición precisa del modelo estructural. La incertidumbre asociada al modelo inicial, derivada de la limitada información disponible sobre las características detalladas de los elementos estructurales, justifica la necesidad de llevar a cabo exhaustivos análisis previos. La calibración implica ajustes y refinamientos de las características de los elementos estructurales, previamente definidos. Las modificaciones suelen centrarse en la geometría de los elementos estructurales y, en ocasiones, incluso en las características del material constructivo. El objetivo fundamental es lograr una definición lo más realista y precisa posible de la masa, la rigidez y la capacidad resistente de la estructura, asegurando así una base sólida para los análisis subsiguientes.

Retrofitting

El proceso de *retrofitting* en un edificio, destinado a mejorar su capacidad portante, se lleva a cabo tras realizar exhaustivos análisis integrales de las diversas acciones a las que está expuesto el edificio. Estos análisis incluyen consideraciones de carga permanentes y variables, así como la evaluación por acción sísmica. La necesidad de aplicar métodos de *retrofitting* surge principalmente por la actualización de los códigos técnicos de edificación y las normativas de diseño sismorresistente, que pueden haber cambiado desde la construcción original del edificio.

Aplicar métodos de *retrofitting* implica introducir modificaciones estructurales con el objetivo de mejorar la capacidad de la edificación para resistir las solicitaciones a las que podría estar expuesta. Esto puede incluir medidas para aumentar la rigidez y resistencia de elementos estructurales clave, como vigas y soportes, con el fin de garantizar que el edificio cumpla con los requisitos actuales de seguridad y normativas vigentes.

Las acciones de *retrofitting* pueden variar según la naturaleza de las deficiencias identificadas en el análisis integral. Para los soportes y vigas, estas acciones pueden incluir el refuerzo con materiales más resistentes, la adición de elementos estructurales

adicionales, o la redistribución de cargas para mejorar la eficiencia estructural. Es esencial adaptar las medidas de *retrofitting* a las características específicas de la edificación y las condiciones identificadas durante el análisis.

El impacto económico del *retrofitting* dependerá de la magnitud de las intervenciones necesarias y la extensión de la mejora estructural requerida. Aunque el *retrofitting* puede implicar costes considerables, la inversión suele estar justificada por la mejora significativa en la seguridad estructural y la capacidad de resistencia sísmica del edificio. La decisión de llevar a cabo el *retrofitting* debe considerar tanto los aspectos económicos como los beneficios a largo plazo en términos de seguridad y sostenibilidad estructural.

Por todo lo mencionado anteriormente, las técnicas de *retrofitting* a aplicar pueden variar significativamente según una serie de factores que incluyen la ubicación geográfica del edificio, las características específicas de la región de estudio, así como las necesidades, la experiencia y las consideraciones del proyectista y el presupuesto disponible, entre otros.

3.2.3. Estimación del daño en un edificio de importancia especial

A partir del modelo estructural calibrado, se procede a definir la respuesta del edificio frente a acciones sísmicas mediante un análisis dinámico no lineales. Este método permite definir el desplazamiento máximo alcanzado por el edificio, considerando plastificación. Por lo tanto, es posible caracterizar el daño en el edificio. Para aplicar el método es necesario establecer las rótulas del edificio de estudio y asegurar así la ductilidad del mismo. Para definir las rótulas se deben considerar las normativas al respecto en base al material considerado.

El análisis dinámico no lineal implica la consideración de acelerogramas sintéticos compatibles con espectros de respuesta uniforme (UHS) adecuados al periodo de retorno específico para el tipo de estructura en cuestión. Estos espectros representan las características de la agitación sísmica que la estructura puede experimentar durante eventos sísmicos con distintas recurrencias. Para estructuras de tipo especial, según la NCSE-02, se considera un coeficiente de importancia especial de 1.3, cuyo papel es transformar la acción sísmica estimada para periodo de retorno de 475 años, que figura en el mapa de la normativa, a otra acción correspondiente a un periodo de retorno de 975 años, que es la que debe asumirse en el diseño sísmico de edificios de importancia especial. La normativa establece un periodo de retorno de 975 años para este tipo de edificios debido a la necesidad de garantizar una menor probabilidad de excedencia del movimiento sísmico. En el caso de edificios de importancia especial, la probabilidad de

excedencia que se asume es del 5% en 50 años, frente al 10% de probabilidad asumida en los edificios de importancia normal.

La realización del análisis no lineal proporciona información detallada sobre el comportamiento sísmico de la estructura. Este tipo de análisis permite evaluar la respuesta de la edificación ante cargas sísmicas significativas, teniendo en cuenta la no linealidad de los materiales y la posible redistribución de las fuerzas en la estructura. Los resultados de este análisis incluyen las respuestas de desplazamiento, velocidad y aceleración en diferentes puntos de la estructura a lo largo del tiempo. Además, se obtienen las demandas sísmicas en los elementos estructurales, como fuerzas y momentos en vigas y soportes.

**Capítulo 4. APLICACIÓN
METODOLÓGICA I. USO DE TÉCNICAS
GEOESPACIALES PARA LA
MODELIZACIÓN AUTOMÁTICA DE
EDIFICIOS**

Capítulo 4. APLICACIÓN METODOLÓGICA I. USO DE TÉCNICAS GEOESPACIALES PARA LA MODELIZACIÓN AUTOMÁTICA DE EDIFICIOS

En el marco de la presente investigación, se ha implementado el algoritmo ABM-indoor en dos conjuntos de datos de nubes de puntos específicos, cada uno proveniente de un escenario arquitectónico diferente. Estas nubes de puntos, obtenidas mediante técnicas de escaneo láser terrestre estático y dinámico, representan entornos estructuralmente variados y presentan desafíos distintos en términos de complejidad geométrica y distribución de elementos. La utilización del algoritmo ABM-indoor en estos conjuntos de datos ha permitido explorar su capacidad para adaptarse a diferentes contextos y proporcionar resultados precisos en la segmentación de elementos arquitectónicos y estructurales, así como en la modelización de elementos de contenido. A continuación, se presenta un análisis detallado de la aplicación del algoritmo en cada una de estas nubes de puntos, destacando sus contribuciones específicas en cada escenario particular.

Este capítulo se centra únicamente en implementar la aplicación de la metodología propuesta para la modelización de nubes de puntos de edificios de forma automática, ABM-indoor (metodología presentada en el capítulo 3.1). Por este motivo, los resultados que se incluyen en este apartado de la memoria hacen referencia únicamente a los dos entornos mencionados anteriormente: la oficina y el estacionamiento.

Los resultados de este capítulo han sido publicados en [Romero-Jarén y Arranz \(2021\)](#). Se pueden consultar más detalles sobre la publicación en el Anexo III. Además, Los resultados fueron parcialmente presentados en dos congresos de carácter internacional (Anexo IV), *17th World Conference on Earthquake Engineering, 7WCEE* y *XXIV ISPRS* ([Romero-Jarén et al., 2021](#)). Y en un congreso de carácter nacional “II Congreso de Ingeniería Geomática” ([Romero-Jarén et al., 2019](#)).

4.1. Fuente de datos

Se han empleado dos conjuntos de nubes de puntos provenientes del interior de edificaciones. Estas nubes de puntos provienen de dos tipos de sistemas LiDAR diferentes. Ambos sistemas consisten en un Escáner Láser Terrestre (ELS). Uno de los sistemas es estático y proporciona nubes de puntos organizadas. Aunque al fusionar en una única nube los datos provenientes de diferentes estacionamientos, se crea una estructura desorganizada. El otro sistema es dinámico, que genera nubes de puntos no organizadas. ABM-indoor no estructura la nube de puntos no organizada para evitar un aumento en el

tiempo de computación y en la memoria durante el preprocesamiento de la nube de puntos antes de la clasificación.

El uso de nubes de puntos organizadas y desorganizadas es una distinción importante de ABM-indoor con respecto a enfoques previos. Los datos procedentes de cada sistema de medida tienen una estructura diferente debido a la forma en que se adquieren. Para ELS estático, se conoce la posición del sensor y, por lo tanto, el punto focal del láser. El procedimiento de recolección de datos con este sistema estático implica múltiples escaneos, donde cada escaneo cubre una cierta área del espacio de interés y genera una nube de puntos "parcial". Estas nubes de puntos parciales se fusionan automáticamente en una única nube de puntos "global" que se procesa con ABM-indoor. En lo sucesivo, los datos obtenidos de este sistema estático se denominan "nube de puntos estática".

Al trabajar con un ELS dinámico no es posible conocer el punto focal del láser en cada toma de datos. Por este motivo, se necesitan algoritmos más complejos para procesar la información. La nube de puntos adquirida con el sistema dinámico se generó con el sistema NavVis M6. Este sistema es un MMS interior con un sistema *Simultaneous Localization And Mapping* (SLAM) de 6D (Surmann et al., 2004), seis cámaras que obtienen imágenes de 360° y cuatro escáneres láser ubicados estratégicamente a varias alturas y campos de visión. El sensor funciona como un dispositivo volumétrico. El sistema NavVis M6 está montado en un carro con ruedas que permite su movimiento a través de los espacios físicos estudiados. En lo sucesivo, los datos obtenidos de un sistema dinámico se denominan "nube de puntos dinámica".

La nube de puntos dinámica se corresponde con un estacionamiento interior, contiene aproximadamente 14 millones de puntos y cubre 1,000 m² (Figura 16.a). La nube de puntos estática es de una oficina que incluye aproximadamente 3 millones de puntos y que cubren 800 m² (Figura 16.b). Inicialmente se aplicó un método de Rejilla de Vóxeles para reducir el tamaño de la nube de puntos y eliminar información redundante (Orts-escolano y Cazorla, 2013), resultando en una resolución para ambas nubes de puntos de 5 cm.

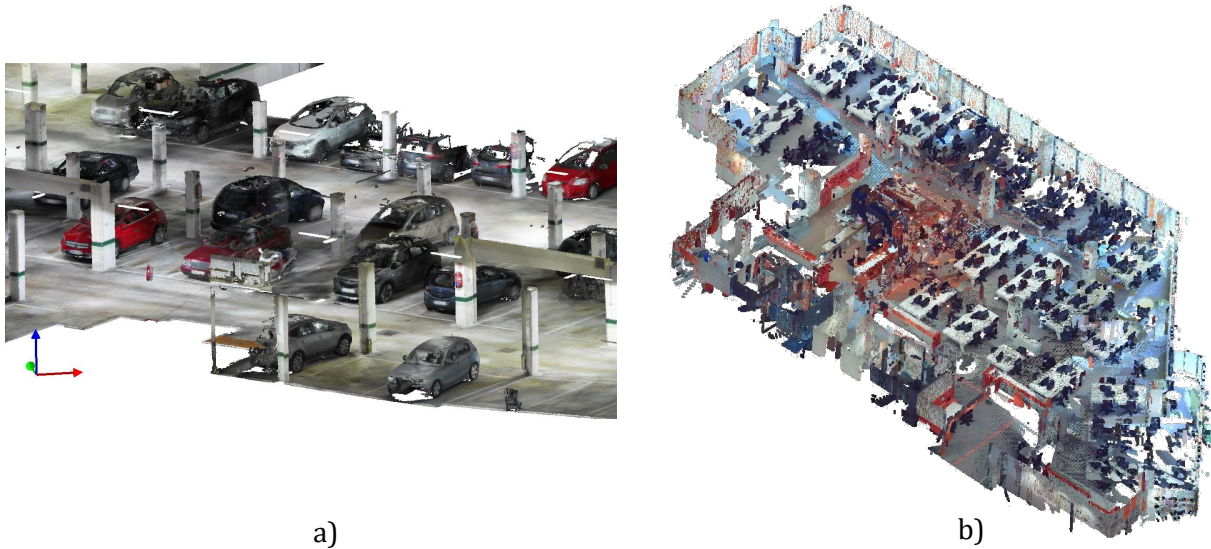


Figura 16: Imágenes a color de muestra de las nubes de puntos del estacionamiento (a) y oficina (B). Se eliminaron algunas paredes y techos de las nubes de puntos para facilitar la visualización de los elementos interiores.

4.2. Resultados experimentales y discusión

Clasificación de las nubes de puntos

La **Figura 17** presenta los elementos clasificados (paredes, suelos y soportes) del estacionamiento (a) y de la oficina (b). Como se explica en la introducción, ABM-indoor clasifica y modela soportes identificando su conexión con el piso y los techos. Una limitación de la versión actual de ABM-indoor es que el algoritmo no es capaz de modelar soportes anexos a paredes. La **Figura 18** muestra los elementos identificados en el suelo, que son principalmente automóviles y motocicletas en la nube de puntos del estacionamiento.

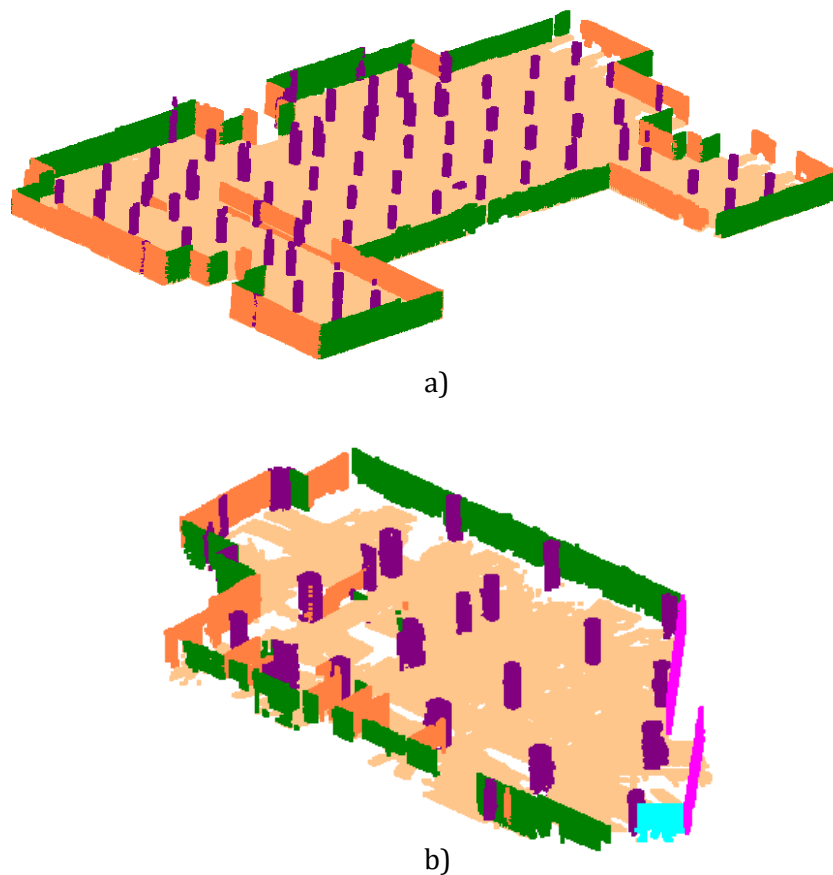


Figura 17: Clasificación de la nube de puntos del estacionamiento (a) y de la oficina (b). Se eliminó el techo para facilitar la visualización.

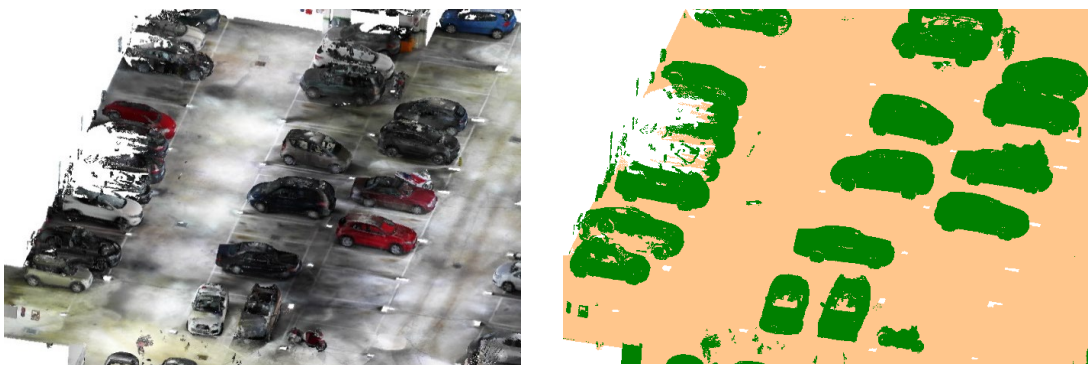


Figura 18: Muestra de resultados obtenidos para la segmentación automática en el estacionamiento. El color verde denota objetos ubicados en el suelo. Se eliminaron el techo y las paredes para facilitar la visualización.

La **Figura 19** muestra las tres direcciones detectadas en el estacionamiento y las cinco direcciones para la oficina. Los edificios pueden tener paredes orientadas en más de una dirección y también pueden existir oclusiones que pueden causar espacios o brechas lo suficientemente grandes como para dificultar la creación de superficies 3D precisas, lo que sugiere que la modelización de paredes requiere una consideración diferente en

comparación con la modelización de suelos y techos. En base a los resultados obtenidos, se puede considerar que ABM-indoor clasifica y modela nubes de puntos de edificios más allá de las suposiciones del *Manhattan World*, porque detecta paredes en más de las tres direcciones especiales.

El algoritmo desarrollado hasta la fecha clasifica y modela nubes de puntos, tal como se obtuvieron durante la toma de datos. Por este motivo, en la **Figura 19** se observa la ausencia de algunas paredes. Si los sistemas de medida no registran puntos en ciertas áreas, el algoritmo no crea manualmente superficies que asumimos deberían existir, ya que nuestra investigación se centra en contribuir a enfoques automáticos. Además, considerar la nube de puntos tal como se registró permite que ABM-indoor se utilice en aplicaciones de monitoreo de procesos de construcción o análisis de deformaciones y daños en edificios.

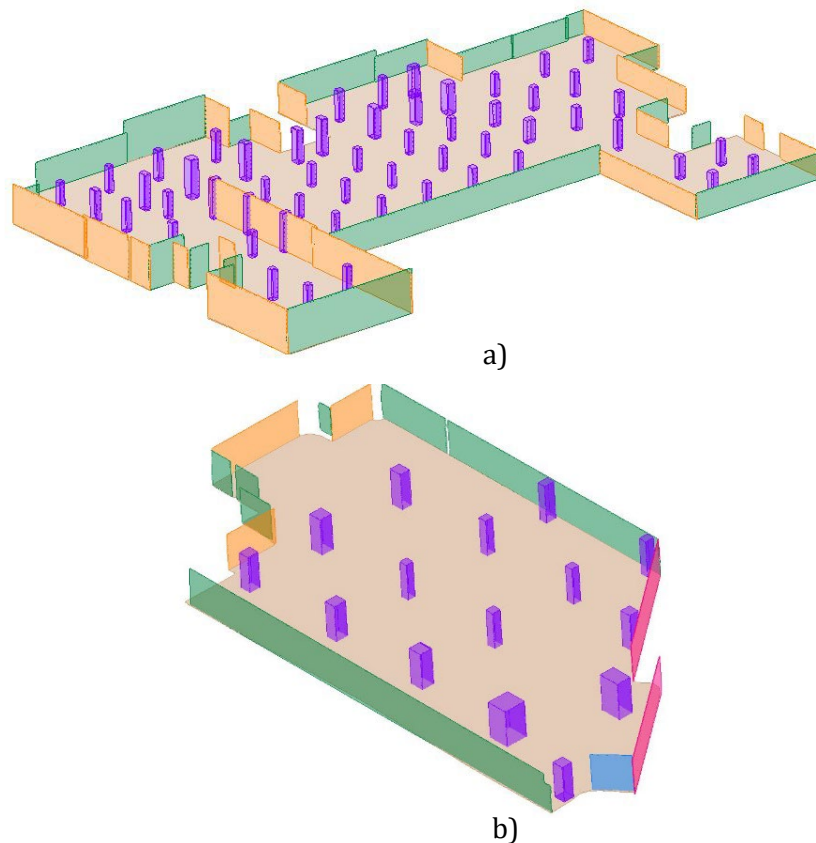


Figura 19: Direcciones principales en el estacionamiento (a): X en naranja, Y en verde, Z es altura; Y direcciones principales de la oficina (b): X en naranja, Y en verde, J en rosa, K en azul y Z es altura. Se eliminó el techo de la nube de puntos para facilitar la visualización.

Como se muestra en la **Figura 18**, los puntos pertenecientes a los automóviles y otros elementos ubicados en el suelo se clasifican como elementos individuales. La **Figura 20**

muestra un ejemplo de los resultados de “tetraedrización” en elementos aislados ubicados sobre el suelo.

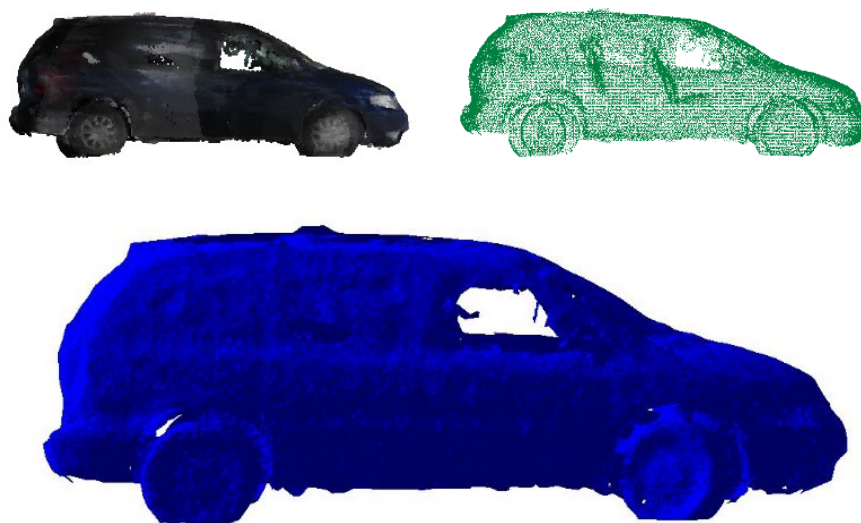


Figura 20: Resultados de una triangulación 3D para un automóvil de la nube de puntos del estacionamiento. Las dos imágenes superiores representan un conjunto clasificado como un automóvil (izquierda - color registrado y derecha - color de clase). La imagen inferior es el volumen del automóvil después de la tetraedrización

Precisión en la clasificación de la nube puntos

ABM-indoor clasificó las nubes de puntos en siete clases de objetos (OC). Para definir la precisión de las clasificaciones de la nube de puntos, ABM-indoor comparó los resultados entre la nube de puntos clasificada automáticamente ("predicha") y una nube de puntos clasificada manualmente ("real"). Del análisis comparativo, se extrajo la métrica que representa el número de puntos clasificados automáticamente de manera acertada con respecto a la clasificación manual. Esta métrica se representa mediante matrices de confusión y es fundamental para evaluar la eficacia y precisión del algoritmo ABM-indoor en la tarea de clasificación de nubes de puntos, proporcionando una medida cuantitativa de la concordancia entre las clasificaciones automática y manual. En una matriz de confusión de cuatro celdas, los términos comunes son verdaderos positivos (*True Positive*, TP), falsos positivos (*False Positive*, FP), verdaderos negativos (*True Negative*, TN) y falsos negativos (*False Negative*, FN). La disposición típica de una matriz de confusión con estas métricas es tal y como se muestra en la **Figura 21**.

	Clase real positiva	Clase real negativa
Clase predicha positiva	TP	FP
Clase predicha negativa	FN	TN

Figura 21: Disposición típica de matriz de confusión.

A continuación, se detalla cada elemento clave de la matriz de confusión indicado en la **Figura 21**, proporcionando un análisis de cada uno.

- TP: Número de puntos clasificados correctamente como positivos
- FP: Número de puntos clasificados incorrectamente como positivos, cuando en realidad son negativos
- TN: Número de puntos clasificados correctamente como negativos
- FN: Número de puntos clasificados incorrectamente como negativos, cuando en realidad son positivos

La suma de los cuatro valores proporciona el total de puntos clasificados. A partir de estos valores, se pueden calcular diversas métricas de evaluación del modelo, como la precisión, la sensibilidad, la especificidad y la tasa de error.

En la presente tesis se estiman las tasas de falsos positivos y verdaderos positivos y se representan en un gráfico ROC. Este gráfico permite evaluar cómo varía el equilibrio entre la capacidad de un modelo para detectar instancias positivas verdaderas y la propensión a clasificar incorrectamente tanto instancias negativas como positivas, a medida que ajustamos el umbral de decisión. Un modelo perfecto tendría una curva que se eleva rápidamente hacia la esquina superior izquierda, indicando alta sensibilidad y baja tasa de falsos positivos. A continuación, se muestran los dos indicadores de precisión estimados (matriz de confusión y gráfico ROC) para cada nube de puntos.

Por un lado, la **Tabla 2** incluye la matriz de confusión de los resultados de clasificación para la nube de puntos del estacionamiento. Por otro lado, la **Figura 22** muestra el gráfico ROC para dicha nube de puntos. En la nube de puntos del estacionamiento, las clases de objetos que se han clasificado con mayor precisión son las de suelos (0.01; 1.00) y techos (0.04; 0.97). En comparación, los resultados menos favorables corresponden a la entidad de otros objetos (1.00; 0.07). La nube de puntos del estacionamiento se clasificó con una precisión global del 94%.

Tabla 2: Matriz de confusión de la nube de puntos del estacionamiento. Los valores de la tabla representan número de puntos clasificados.

	Suelo real			Otros objetos reales	
Suelo predicho	4,568,092	30,690	Otros objetos predichos	7,290	16,106
	16,437	1,023		92,921	9,011
	Techo real			Objetos en el suelo reales	
Techo predicho	4,805,161	58,446	Objetos en el suelo predichos	1,566,980	242,745
	137,078	1,982		44,526	32,293
	Pared en dirección X real			Objetos en el techo reales	
Pared en dirección X predicha	733,829	59,262	Objetos en el techo predichos	859,490	255,737
	200,248	9,665		31,866	54,710
	Pared en dirección Y real			Soportes reales	
Pared en dirección Y predicha	653,581	21,843	Soportes predichos	574,826	42,269
	148,965	4,467		112,293	6,413

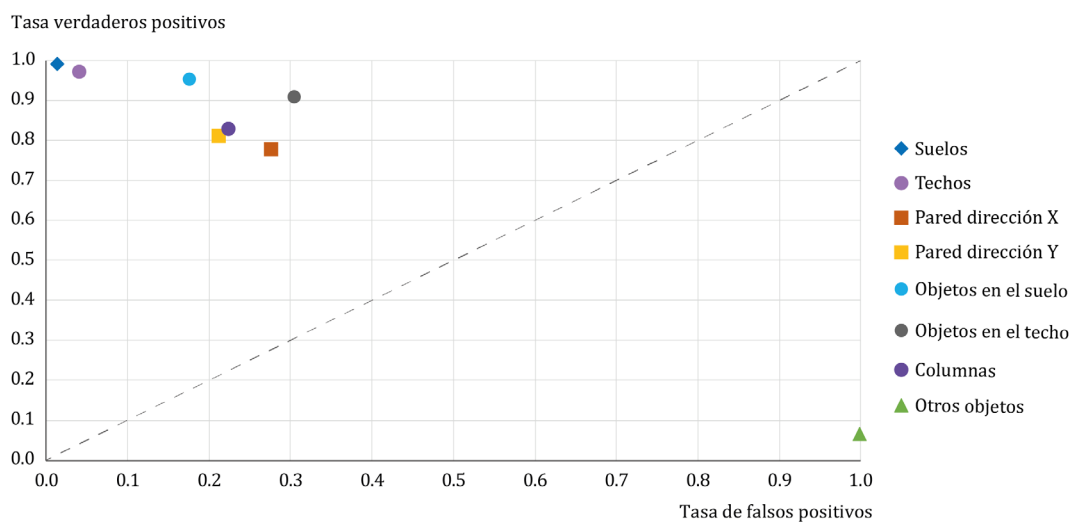


Figura 22: Gráfica ROC que muestra los clasificadores discretos a partir de la matriz de confusión del estacionamiento.

La matriz de confusión con los resultados de la nube de puntos de la oficina se incluyen en la **Tabla 3** y los clasificadores correspondientes a la gráfica ROC en la **Figura 23**. Las clases de objetos de la oficina que mejor se clasificaron fueron el suelo, el techo y las paredes en las direcciones J y K (paredes rosa y azul en la **Figura 17.b**), cada una de estas

clases con valores (0.00; 1.00) para el clasificador discreto. Por el contrario, en el escenario de la oficina, la clase de objeto con una clasificación menos favorable es para otros objetos, con un resultado de (0.88; 0.03). La nube de puntos de la oficina se clasificó con una precisión global del 90%.

Por último, se verifica la precisión y robustez de los resultados realizando un Ajuste de Mínimos Cuadrados (AMC) para definir el plano que mejor se ajusta a cada elemento segmentado. Los resultados del ajuste se incluyen en el Anexo I. El algoritmo se considera robusto ya que las desviaciones estándar del ajuste de todos los elementos de las tres nubes de puntos son inferiores a 3 cm, es decir, menos de 2/3 de la resolución de la nube de puntos, que es de 5 cm.

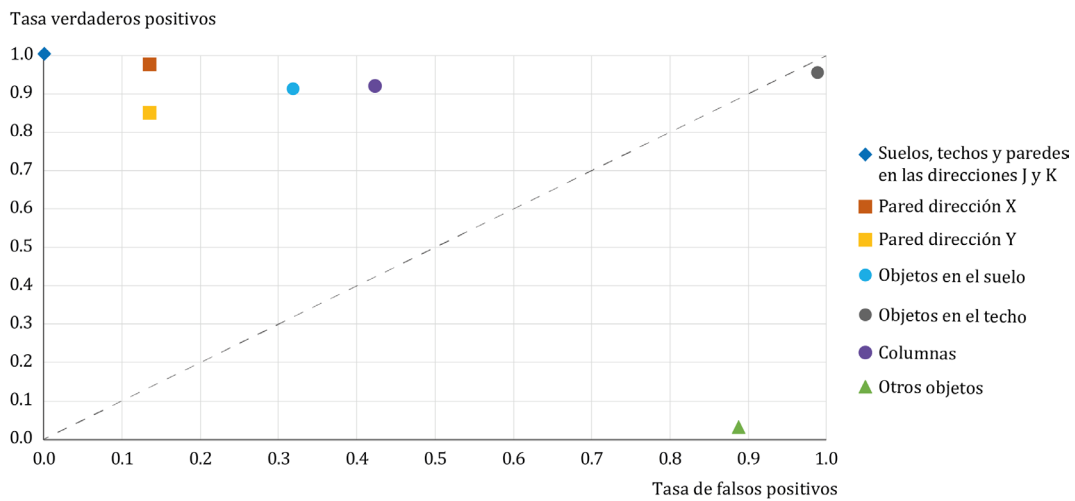


Figura 23: Gráfica ROC que muestra los clasificadores discretos a partir de la matriz de confusión de la oficina.

Tabla 3: Matriz de confusión de la nube de puntos de la oficina. Los valores de la tabla representan número de puntos clasificados.

	Suelo real			Pared en dirección K real	
Suelo predicho	365,930	0	Pared en dirección K predicha	5,863	0
	0	0		0	0
	Techo real			Otros objetos reales	
Techo predicho	784,713	0	Otros objetos predichos	3,555	2,023
	0	0		112,038	13,467
	Pared en dirección X real			Objetos en el suelo reales	
Pared en dirección X predicha	73,532	9,225	Objetos en el suelo predichos	300,901	83,653
	1,337	1		24077	2636
	Pared en dirección Y real			Objetos en el techo reales	
Pared en dirección Y predicha	132,278	3,622	Objetos en el techo predichos	2,238	2,307
	19,223	4,500		35	84
	Pared en dirección J real			Soportes reales	
Pared en dirección J predicha	68,930	0	Soportes predichos	103,608	43,659
	0	0		5,238	3,389

4.3. Resumen y conclusiones

En la presente tesis se ha desarrollado ABM-indoor, un algoritmo que realiza secuencialmente la segmentación automatizada de una nube de puntos y la creación de superficies 3D de los elementos que componen el entorno de la nube de puntos. En primer lugar, el proceso identifica, segmenta y modela los suelos y techos, seguido de las paredes, soportes y elementos de contenido, es decir, objetos ubicados dentro del edificio. Por un lado, el procedimiento de segmentación desarrollado se basa en una metodología de agrupamiento. Por otro lado, el proceso de creación de superficies 3D utiliza la triangulación de Delaunay. Además, se aplica un filtrado de polígonos para crear superficies útiles considerando la relación entre el perímetro de los polígonos y su área. Posteriormente, se aplica un suavizado de bordes mediante “Polígonos Paralelos Interiores”. De esta forma, se evitan concavidades y convexidades exageradas en las áreas.

ABM-indoor es un enfoque robusto que segmenta y modela automáticamente nubes de puntos no organizadas. El algoritmo funciona con datos LiDAR estáticos y dinámicos, es decir, organizados de manera diferente. Por lo tanto, el algoritmo es versátil ya que se puede aplicar a nubes de puntos de dispositivos móviles y estáticos, por lo que es un avance en el estado actual del arte. No se ha impuesto ninguna restricción de verticalidad u horizontalidad, lo que permite la determinación de inclinaciones o deformaciones en elementos que respaldan futuros estudios relacionados con deformaciones y desplazamientos, por ejemplo, evaluaciones de riesgo sísmico.

El algoritmo ABM-indoor sirve como una herramienta para optimizar la modelización geométrica de edificios en el ámbito de la ingeniería sísmica debido a su capacidad para segmentar y modelar automáticamente nubes de puntos no organizadas y organizadas. Al proporcionar una representación precisa de la geometría del edificio, incluyendo suelos, techos, paredes, soportes y elementos de contenido, el algoritmo facilita la generación de modelos 3D detallados que son fundamentales para realizar análisis de riesgo sísmico.

Sería altamente beneficioso que el algoritmo pudiera funcionar con edificios irregulares en planta y alzado. La capacidad de trabajar con edificios de formas y tamaños variados ampliaría significativamente la utilidad y aplicabilidad del algoritmo, permitiendo una evaluación más completa del riesgo sísmico en áreas urbanas y la implementación de medidas de mitigación a gran escala.

A pesar de sus ventajas, una limitación del algoritmo es su incapacidad para identificar y clasificar elementos ocultos, como soportes embebidos en muros. Esto significa que siempre puede existir la necesidad de una aportación manual para especificar la existencia de elementos ocultos durante el proceso de modelización. Si bien este aspecto requiere una intervención manual adicional, la precisión y eficiencia general del algoritmo no se ven significativamente comprometidas, ya que sigue siendo capaz de proporcionar modelos detallados y precisos de los edificios.

**Capítulo 5. APLICACIÓN
METODOLÓGICA II. ESTIMACIÓN DE
RIESGO SÍSMICO EN UN EDIFICIO DE
IMPORTANCIA ESPECIAL**

Capítulo 5. APLICACIÓN METODOLÓGICA II. ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN UN EDIFICIO DE IMPORTANCIA ESPECIAL

La aplicación propuesta en este capítulo de la tesis doctoral se centra en la estimación del riesgo sísmico de un edificio de importancia especial que actualmente se encuentra construido y operativo. El edificio es la Escuela de Topografía, Geodesia y Cartografía de la UPM, localizada en Madrid. Sin embargo, la peligrosidad en Madrid es muy pequeña y el mapa de la norma vigente NCSE-02 proporciona una aceleración básica ab inferior a 0.04 g. Por lo tanto, la norma no prescribe la necesidad de diseño sismorresistente en Madrid y el estudio de riesgo sísmico del edificio en esta ubicación real carece de interés. Se considera entonces una ubicación genérica del edificio en una zona de peligrosidad sísmica más elevada, con influencia tanto de sismos próximos como lejanos. La zona elegida es la región de Cádiz donde se ubica la central portuaria de Los Barrios. En esta ubicación se ha desarrollado un estudio particular de la peligrosidad sísmica por la empresa Geolyder S.L. en la que se enmarca este doctorado industrial. Este estudio ha contado con la participación de la doctoranda. Una particularidad de la investigación desarrollada en esta tesis es la consideración de que el edificio se erige en una región con una peligrosidad sísmica más elevada que la región para la cual originalmente fue diseñado. Esta particularidad implica la necesidad de adaptar primero el edificio a los criterios de diseño que rigen en la normativa actual NCSE-02 en la nueva ubicación en la que se supone construido. Se deben considerar así las actualizaciones de las normativas y códigos técnicos de edificación que sean aplicables en la región actual. El edificio se supone entonces construido con los espectros de diseño que prescribe la normativa vigente para el emplazamiento de Los Barrios en el que se considera ubicado. Para adaptar el edificio a las nuevas condiciones del entorno, es necesario aplicar técnicas de *retrofitting*. Este enfoque integral aborda los desafíos específicos asociados con la ubicación del edificio en una zona de mayor peligrosidad sísmica, garantizando así una evaluación precisa y actualizada del riesgo sísmico del edificio en el emplazamiento genérico.

Los resultados de este capítulo han sido parcialmente presentados en dos congresos de carácter internacional, 17th *World Conference on Earthquake Engineering*, 17WCEE y XXIV ISPRS (Romero-Jarén et al., 2021).

5.1. Estimación de la peligrosidad sísmica

5.1.1. Introducción

La caracterización de la peligrosidad sísmica se ha llevado a cabo en el contexto del proyecto “Estudio de caracterización sísmica y evaluación del riesgo sísmico en el

emplazamiento de la futura planta de almacenamiento de hasta 10,000 m³ de GNL a ser construida en la terminal portuaria de los Barrios Endesa Generación S.A.", en adelante denominado proyecto "Los Barrios", desarrollado por la empresa Geolyder S.L. El área de estudio se sitúa en el municipio de Los Barrios (Cádiz, España). Concretamente, en la Terminal portuaria de Los Barrios Endesa generación S.A (**Figura 24**).

Esta fase crucial se enmarca dentro de la naturaleza de doctorado industrial de la presente tesis, estableciendo una colaboración estrecha entre la investigación académica y las aplicaciones profesionales en el ámbito de la Ingeniería sísmica y Geomática. El proyecto Los Barrios ha proporcionado tanto el contexto industrial necesario, como valiosos datos y recursos para la formulación de la peligrosidad sísmica en determinados escenarios característicos de una determinada región del suroeste de la Península Ibérica.

Se ha optado por utilizar el estudio de peligrosidad sísmica de Los Barrios para caracterizar una de las componentes del riesgo sísmico y así analizar dicho riesgo en un edificio de importancia especial supuestamente construido en una zona con mayor peligrosidad sísmica que la región para la cual fue inicialmente diseñado.

Como resultado de este estudio, se obtendrá un conjunto de espectros de respuesta que representarán los movimientos esperados en el emplazamiento donde se considera situado el edificio a analizar, de los cuales se derivará la curva de demanda a incluir como uno de los datos de entrada del cálculo del riesgo sísmico.

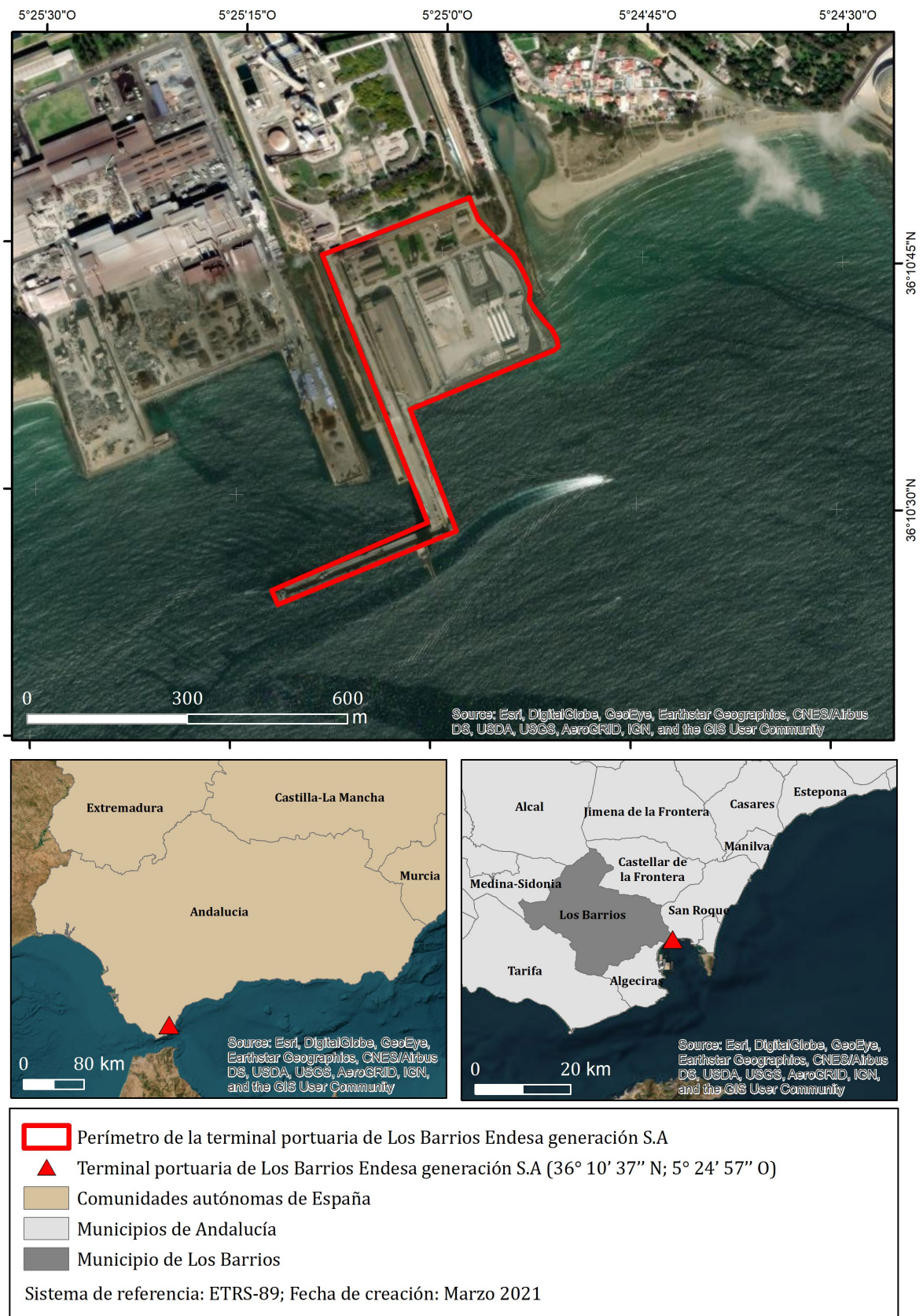


Figura 24: Mapa de localización de la Terminal portuaria de Los Barrios Endesa generación S.A, donde se considera ubicado el edificio de estudio.

Para el proyecto Los Barrios se obtuvieron dos familias de espectros. Una primera familia que incluye espectros (UHS) para los periodos de retorno de 475 y 975 años. Posteriormente, se obtuvo la segunda familia de espectros específicos a partir de los sismos de control obtenidos por desagregación de los resultados de peligrosidad sísmica. Ambas familias de espectros incluyen el efecto local derivado de un estudio específico realizado *in situ* en Los Barrios, considerando las características geotécnicas y geofísicas del emplazamiento.

Además, para el desarrollo de la investigación, se han comparado los espectros generados a partir del estudio de peligrosidad sísmica (UHS y específicos) con los propuestos por la norma de diseño sismorresistente de España, NCSE-02 ([Ministerio de Fomento, 2009b](#)).

5.1.2. Análisis probabilista de la peligrosidad sísmica

En virtud de los objetivos y alcances establecidos para esta tesis doctoral, no se proporcionará un detalle exhaustivo del desarrollo de la estimación de la peligrosidad sísmica. Sin embargo, se incluye un resumen del proceso, destacando los resultados obtenidos en el marco del proyecto de doctorado industrial con la empresa Geolyder S.L. Estos resultados se utilizan como base para el desarrollo de la tesis, siendo detalladamente discutidos en el apartado correspondiente de la memoria.

Para llevar a cabo la estimación de la peligrosidad sísmica, se han cubierto las siguientes fases: elaboración del catálogo sísmico, caracterización de las fuentes sísmicas involucradas en el estudio, selección de modelos de movimiento fuerte y propuesta de árbol lógico para el cálculo PSHA. A continuación, se detallan brevemente cada una de ellas.

Elaboración del catálogo sísmico

El catálogo sísmico para el estudio de peligrosidad del proyecto de Los Barrios se definió a partir del catálogo elaborado para la “Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012” ([Instituto Geográfico Nacional y Universidad Politécnica de Madrid, 2013](#)). La información se actualizó hasta octubre de 2020, eliminándose sismos con profundidades mayores a 65 km y eventos con magnitudes menores a M_w 3.0. De esta forma, se consideraron sismos relevantes para la peligrosidad sísmica del área de estudio, incluyendo resultados de diversas fuentes de información españolas en las que se estimaba específicamente el tamaño de algunos terremotos históricos ([Hamdache et al., 2010](#); [Instituto Geográfico Nacional y Universidad Politécnica de Madrid, 2013](#); [Martínez y Mezcua, 2002](#)) y revisiones del catálogo de agencias internacionales ([Cabañas et al., 2015](#)).

El catálogo sísmico resultante fue sometido a procesos de homogeneización y depuración. La homogeneización se realizó utilizando la escala de magnitud momento (M_w), aplicando correlaciones definidas en el proyecto del Mapa de Peligrosidad Sísmica de España 2012, usando regresiones lineales *Reduced Major Axis* (RMA) (Isobe et al., 1990). Posteriormente, se llevó a cabo una depuración del catálogo para eliminar eventos repetidos, réplicas y premonitores, con el fin de garantizar la independencia de eventos requerida en el método zonificado que se aplicará en el cálculo (Cornell, 1968). Para ello, se usaron ventanas espacio-temporales en torno a los sismos principales y se eliminaron los eventos incluidos en ellas (Cabañas et al., 2015; Gardner y Knopoff, 1974). Además, se aplicó un método de Montecarlo para incorporar incertidumbres asociadas a la magnitud M_w , mediante la simulación de 1,000 catálogos sintéticos. De esta manera, se calculó la frecuencia de cada sismo catalogado como réplica, aplicando las ventanas espacio-temporales anteriormente definidas.

Por último, se llevó a cabo un análisis de completitud para determinar los años de referencia a partir de los cuales el catálogo podría considerarse completo para diferentes rangos de magnitud (Stepp, 1972). Este análisis permitió establecer la tasa de ocurrencia de sismos y estimar el número hipotético de terremotos ocurridos durante el periodo de estudio.

El resultado final es un catálogo sísmico depurado y homogeneizado, esencial para el estudio de peligrosidad sísmica en la zona de la terminal portuaria. El catálogo está compuesto por 8,230 terremotos ocurridos entre 1 de enero de 1048 y el 15 de octubre del 2020. Los terremotos del catálogo tienen una M_w mínima de 3.0 y máxima de 8.5 y una profundidad máxima de 65 km.

Caracterización de las fuentes sísmicas

Tal y como se ha explicado en el capítulo 3.2.1, la metodología clásica zonificada emplea modelos de zonas sismogénicas para representar las fuentes sísmicas.

La asunción de un modelo zonificado implica que los terremotos ocurren dentro de zonas sismogénicas definidas, con un potencial sísmico homogéneo. Esto significa que existe una distribución aleatoria espacial y temporal de la sismicidad dentro de cada zona. La subdivisión del territorio en zonas sismogénicas se denomina zonificación y su delimitación se basa en agrupar fallas o estructuras geológicas con patrones similares de sismicidad.

En el presente estudio, se ha adoptado el modelo de zonas sismogénicas de la Península Ibérica y territorios de influencia (ZESIS) desarrollado por García-Mayordomo en 2015 (García-Mayordomo, 2015), considerado el modelo oficial del IGME.

Para incorporar las fuentes sísmicas al cálculo de peligrosidad, se ha caracterizado su patrón de sismicidad, la ley de recurrencia y la magnitud máxima que cada fuente puede generar. Este análisis se ha realizado para las zonas dentro de un área de influencia de 320 km de radio a partir del centro del emplazamiento de estudio. El emplazamiento de interés, donde se sitúa la terminal portuaria, se encuentra localizado en la zona que comprende el estrecho de Gibraltar y la parte continental y marina tanto española como marroquí (Arco de Gibraltar). Esta zona sismogénica es una zona de mecanismo focal predominante de desgarre y tiene asociada una peligrosidad relativa alta (García-Mayordomo, 2015).

Tras seleccionar la zonificación y caracterizar las zonas sismogénicas para el área de influencia, se superpusieron las zonas con el catálogo de proyecto. A continuación, se procedió a estimar las leyes de recurrencia y parámetros sísmicos de las zonas sismogénicas. Para calcular la ley de recurrencia, se adoptó el modelo de Gutenberg-Richter modificado, ajustando la recta con los sismos de cada zona y considerando su distribución de incertidumbres mediante el método de mínimos cuadrados. El modelo de Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1944) establece una relación lineal entre el logaritmo neperiano del número de terremotos (N) y la magnitud (m), tal y como se muestra en la ecuación 5-8. La magnitud mínima para el cálculo de la tasa fue M_w 4.0 para todas las zonas.

$$\ln N = \alpha - \beta \cdot m \quad 5-8$$

Donde:

α es un coeficiente que representa el número de terremotos que superan una magnitud mínima;

β representa la proporción entre terremotos grandes y pequeños.

Ambos coeficientes son constantes que se calculan en el ajuste de los datos. Los parámetros que caracterizan el patrón de sismicidad de cada zona y configuran su ley de recurrencia, necesarios para el cálculo de la peligrosidad, son: las magnitudes máxima y mínima, M_{max} y M_{min} , la tasa de ocurrencia de sismos, $\dot{N}(M_{min})$, por encima de la magnitud mínima considerada, la pendiente de la relación de Gutenberg-Richter, β , con su desviación estándar, $\sigma\beta$. La definición de los distintos valores de magnitud necesarios para el cálculo de la tasa de las zonas se presenta en (Instituto Geográfico Nacional y

Universidad Politécnica de Madrid, 2013) .Como ya se ha indicado, la magnitud mínima (M_{min}) establecida para el cálculo de la tasa ha sido de M_w 4.0 para todas las zonas. Por su parte, la definición de la magnitud máxima (M_{max}) de cada zona es clave en todo estudio de peligrosidad. Este valor se identifica con la magnitud del máximo sismo creíble y conlleva notable incertidumbre. A partir del catálogo sísmico se puede deducir la magnitud máxima observada en la zona, pero esta puede ser inferior a la del sismo máximo que pueda ser generado en las fallas existentes dentro de la zona. De hecho, el catálogo sísmico suele no cubrir ciclos completos de fallas y, por tanto, la magnitud del máximo sismo potencial puede ser superior a la M_{max} observada en el catálogo. Para tener en cuenta esta incertidumbre sobre la M_{max} de cada zona, se ha considerado una distribución Gaussiana definida por los siguientes parámetros:

- $M1$: magnitud máxima observada en la zona, derivada del catálogo sísmico, que corresponde al umbral inferior de la distribución de M_{max} .
- $M2$: magnitud máxima acorde con la tectónica de la zona, que corresponde al umbral superior de la distribución de M_{max} .
- $M_{max}(media)$: magnitud máxima esperada, que corresponde a la M_{max} que se considera más probable.
- σ : desviación estándar de la distribución de M_{max} .

Para establecer la magnitud máxima esperada en las fuentes que contienen las fallas activas estudiadas, se han evaluado las magnitudes máximas posibles de todas las fallas a partir de su geometría y se han ajustado a una distribución de Gauss. Para ello, tomando como valores extremos los de $M1$ y $M2$, se toma el valor medio de la distribución M_{max} [$M_{max}(media)$], como más probable. El valor de sigma se establece como el intervalo entre la $M_{max}(media)$ y la M_{max} observada ($M1$). En las zonas que no contienen fallas, la magnitud máxima fue establecida como la magnitud máxima observada en el catálogo en esa zona, más la mitad de la incertidumbre asociada a esa magnitud. En la **Tabla 4** se muestran los parámetros resultantes de aplicar el modelo Gutenberg-Richter para cada zona.

Tabla 4. Parámetros de la recta Gutenberg-Richter y magnitudes máximas para las zonas sismogénicas del modelo de ZESIS (García-Mayordomo, 2015).

Zona	$\dot{N}(4.0)$	β	$\sigma(\beta)$	M1	M2	Mmax(media)	$\sigma Mmax$	Mmin
10	0.276	2.165	0.256	5.7	6.6	6.6	0.4	4.0
11	0.068	2.703	0.527	5.9	6.1	6.1	0.2	4.0
12	0.111	2.824	0.585	4.9	5.1	5.1	0.3	4.0
13	0.154	2.553	0.332	6.0	6.5	6.5	0.2	4.0
28	0.243	2.771	0.260	6.3	6.7	6.7	0.2	4.0
29	0.209	2.643	0.279	6.2	6.6	6.6	0.4	4.0
30	0.09	2.906	0.845	4.6	5.0	5.0	0.4	4.0
33	0.133	2.601	0.424	5.4	5.8	5.8	0.4	4.0
34	0.234	2.462	0.246	6.3	6.6	6.6	0.3	4.0
35	0.567	2.616	0.157	6.5	6.8	6.8	0.3	4.0
36	0.145	2.429	0.318	6.2	6.6	6.6	0.4	4.0
37	0.376	2.353	0.235	5.4	6.8	6.8	0.2	4.0
38	0.367	2.242	0.175	6.5	6.7	6.7	0.2	4.0
39	0.094	2.076	0.709	4.9	6.7	6.7	0.1	4.0
40	0.171	2.502	0.311	6.0	6.5	6.5	0.3	4.0
41	0.124	2.606	0.619	4.7	6.5	6.5	0.4	4.0
42	0.212	2.123	0.281	6.5	6.8	6.8	0.3	4.0
43	0.81	2.197	0.152	6.3	7.0	7.0	0.2	4.0
44	0.292	1.957	0.269	6.0	6.4	6.4	0.4	4.0
45	0.533	1.914	0.154	6.8	7.3	7.3	0.5	4.0
50	1.585	2.427	0.108	8.5	8.7	8.7	0.2	4.0
51	1.007	2.583	0.157	6.6	6.8	6.8	0.3	4.0
52	0.21	2.423	0.352	6.2	6.4	6.4	0.2	4.0
53	0.156	2.127	0.477	5.5	5.7	5.7	0.2	4.0
54	0.13	2.404	0.311	6.5	6.9	6.9	0.4	4.0
55	0.505	2.022	0.136	6.6	6.7	6.7	0.3	4.0

Selección de modelos de movimiento fuerte y creación del árbol lógico

Una vez definidas las características de las zonas sismogénicas y sus parámetros de recurrencia, se requiere conocer el movimiento esperado del terreno por los sismos ocurridos dentro de dichas fuentes. Para ello, se aplican modelos de movimiento fuerte o leyes de atenuación, también conocidas como ecuaciones de predicción del movimiento o *Ground Motion Prediction Equations* (GMPEs). Estos modelos estiman el

movimiento en un emplazamiento específico causado por la actividad sísmica de una fuente a una cierta distancia.

La estimación de leyes de atenuación conlleva cierta incertidumbre debido a la dispersión de los datos ajustados en los modelos. Los modelos actuales incorporan variables dependientes del tipo de suelo y mecanismo focal, reduciendo dicha incertidumbre. Dado que en la Península Ibérica se han desarrollado pocos modelos de atenuación por la ausencia de datos acelerométricos para magnitudes superiores a 5.1 M_w , para el presente estudio se ha empleado un modelo propio para magnitudes de 3.5 a 5.1 M_w , combinado con modelos extranjeros para magnitudes mayores a 5.1 M_w , elegidos por la afinidad tectónica entre la zona origen de los datos del modelo con la zona de aplicación.

Entre los modelos propuestos en la NGA-West 2⁷, se han seleccionado para el estudio modelos actualizados, desarrollados a escala mundial y que cumplen con las características de magnitud y distancia del catálogo de estudio. Los modelos seleccionados han sido:

- [Abrahamson et al., 2013](#). Denominado en el presente estudio como ASK13 y usado para periodos cortos;
- [Campbell y Bozorgnia, 2014](#). Denominado en el presente proyecto como CB14 y usado para periodos cortos;
- [Chiou y Youngs, 2014](#). Denominado en el presente proyecto como CY14 y usado para largos periodos;
- Además de estos modelos, se incluyó el modelo propio de [Ruiz et al. \(2012\)](#), válido hasta M_w 5.1 (denominado MP11) y se complementó con el modelo de [Akkar y Bommer de 2010](#), desarrollado para Europa y para magnitudes mayores a M_w 5.1 (denominado AB10). La combinación de los dos modelos anteriores se ha denominado AB10MP11.

Finalmente, se desarrolló un árbol lógico para incluir diferentes combinaciones entre los modelos de atenuación, abordando las incertidumbres epistemológicas inherentes a los modelos utilizados (**Figura 25**). El árbol consta de tres nodos de datos de entrada relacionados con el catálogo actualizado, el método zonificado propuesto con el modelo de zonas asumido y las cuatro ramas con los diferentes modelos de atenuación

⁷ La NGA-West 2 (*Next Generation Attenuation for the Western United States*) es un proyecto de investigación que se centra en desarrollar y mejorar modelos de atenuación del movimiento fuerte para el oeste de los Estados Unidos

seleccionados. Las ramas del árbol se ponderaron de manera equitativa, siendo los pesos adoptados para cada rama los números que figuran entre paréntesis en la **Figura 26**. La suma de pesos de cada rama debe ser 1, por lo que en aquellos nodos en los que solo se contempla una rama, correspondientes al catálogo y a la zonificación, la opción adoptada es ponderada con la unidad.

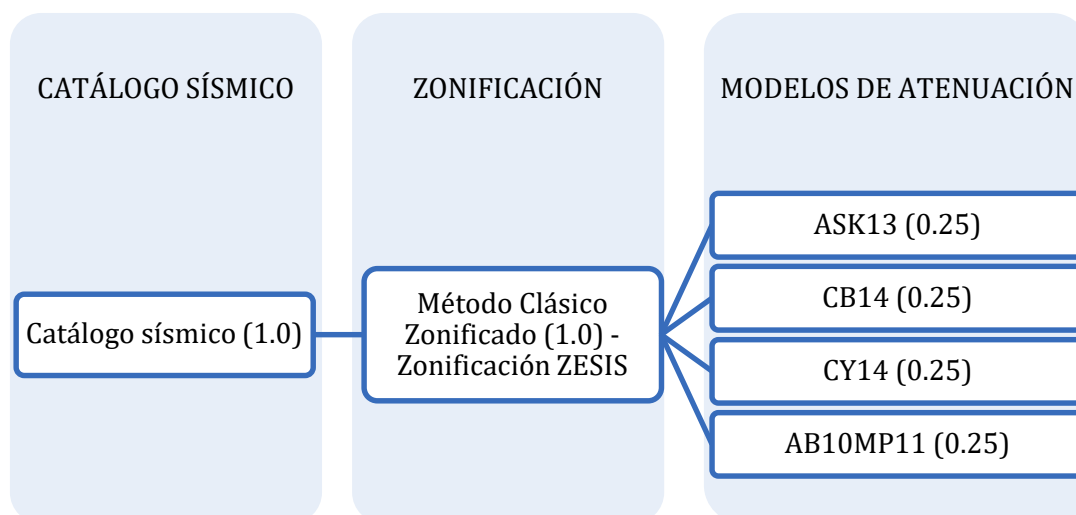


Figura 25: Esquema de árbol lógico empleado en el cálculo de peligrosidad sísmica. Los pesos asignados a cada rama se indican en paréntesis.

5.1.3. Resultados experimentales y discusión

Curvas de peligrosidad sísmica y espectros UHS

La peligrosidad sísmica se ha estimado en términos de los siguientes parámetros de movimiento: aceleración pico (PGA) y aceleraciones espectrales SA (T) para 14 periodos estructurales $T = 0.02, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ y 3.0 segundos, todas ellas expresadas en unidades de g. Las aceleraciones se estiman con probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años (PR 475 años) y del 5% en 50 años (PR 975 años).

En una primera fase del cálculo, se ha estimado la peligrosidad sísmica considerando emplazamientos genéricos en roca, es decir, integrando solo el efecto de la fuente y la trayectoria, sin incluir el efecto local. Posteriormente, se han superpuesto los resultados en roca a funciones de transferencia obtenidas tras la realización de un estudio del efecto local del terreno mediante métodos geofísicos.

El cálculo se ha efectuado de manera puntual en el emplazamiento de estudio, obteniendo en dicho punto las curvas de peligrosidad sísmica y, en consecuencia, los espectros de respuesta uniforme (UHS) para los periodos de retorno indicados (**Figura 26**). No obstante, dado que el edificio que se somete al estudio de riesgo es de importancia especial, la acción sísmica que debe considerarse corresponde a un periodo

de retorno PR de 975 años, ya que la probabilidad de excedencia que se asume en 50 años para este tipo de edificaciones es de 5%. Por ello, de los dos UHS calculados, tomamos en los cálculos subsecuentes el de PR 975 años, que obviamente es más conservador que el de 475 años.

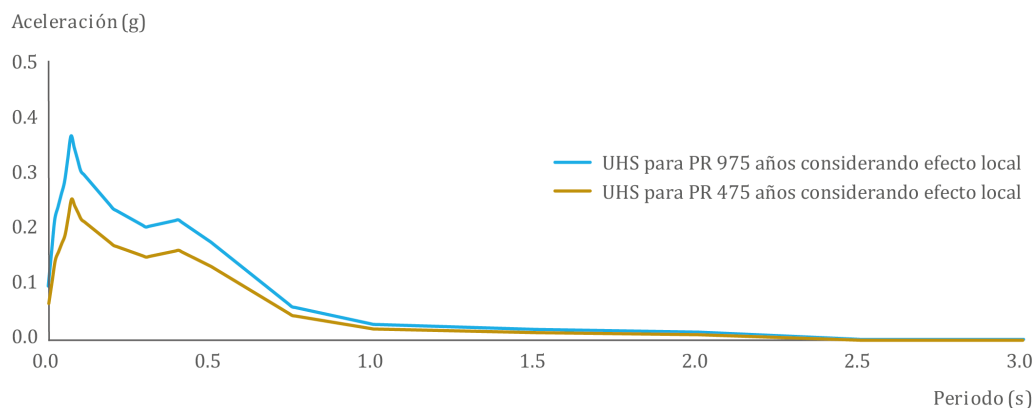


Figura 26. Espectros de respuesta uniforme (UHS) con efecto local obtenidos tras el estudio de peligrosidad sísmica en el proyecto de Los Barrios para los periodos de retorno 475 y 975 años.

Desagregación de la peligrosidad e identificación de los sismos de control

Para el presente estudio, se ha realizado la desagregación para los parámetros de movimiento resultantes del análisis de peligrosidad para PR 975 años. Concretamente se han tomado como movimientos objeto los resultados obtenidos para la aceleración pico (PGA) y la aceleración espectral SA(2s) para el citado periodo de retorno con el fin de encontrar los sismos que más contribuyen al corto y largo periodo del movimiento. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5: Sismos de control obtenidos por desagregación de los resultados de peligrosidad sísmica en el proyecto de Los Barrios.

Periodo de retorno	Ordenada espectral	Magnitud (M_w)	Distancia R (km)
975 años	PGA	4.5-5.0	0-20
	2 s	6.5-7.0	120-140
	2 s	6.0-6.5	80-160

Tras el análisis de los resultados de la desagregación, se han establecido tres sismos de control en base al conjunto de valores de las variables M, R y ϵ , que presentan mayor contribución a la peligrosidad. Para todos los sismos de control se ha considerado un ϵ igual a 3.

- Sismo de control 1 asociado a PGA: M_w 6.5-7.0 a distancia de 120-140 km
- Sismo de control 2 asociado a SA(2s): M_w 4.5-5.0 a distancia de 0-20 km
- Sismo de control 3 asociado a SA(2s): M_w 6.0-6.5 a distancia de 80 a 160 km

Definición de los escenarios sísmicos

Para definir los escenarios sísmicos específicos, se han asociado los sismos de control identificados, a fuentes sísmicas concretas compatibles con las condiciones de magnitud y distancia que caracterizan dichos sismos. Los escenarios sísmicos resultantes se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6: Escenarios sísmicos identificados para los sismos de control resultantes de la desagregación.

	Localización	Magnitud (M_w)	Distancia R (km)
Escenario 1	Falla Tofiño Bank	7.0	120
Escenario 2	Falla del Mapa Neotectónico	5.0	15
Escenario 3	Falla El Acebuchal	6.4	80

Para el escenario 1 y 3 se ha considerado la información geométrica y cinemática conocida según la base de datos de Fallas cuaternarias de la Península Ibérica QAFI ([Instituto Geológico y Minero de España, 2015](#)). El primer escenario, asociado al sismo de control 1, se ha situado en la falla activa de Tofiño Bank, ya que cumple con los criterios de distancia y magnitud de dicho sismo de control. Se trata de una falla capaz de generar sismos de hasta M_w 7.1, de acuerdo a su geometría ([Álvarez-Gómez et al., 2011](#)). El tercer escenario, asociado al sismo de control 3, se fija en la falla activa El Acebuchal. Se trata de una falla normal cuya traza mide 11 km. La magnitud máxima asociada a la falla es de 6.4 M_w ([Insua-Arévalo, 2008](#); [Insua-Arévalo et al., 2012](#)).

Para el caso del segundo escenario, asociado al sismo de control 2, con distancia de 0 a 20 km, no se han documentado fallas activas con información geométrica y cinemática conocidas según la base de datos de Fallas cuaternarias de la Península Ibérica QAFI. Por lo tanto, se ha recurrido al Mapa Neotectónico de España ([Instituto Geológico y Minero de España y ENRESA, 1998](#)), en el que se identifican diversas fallas dentro del área de estudio que son compatibles con el sismo de control asociado al escenario 2. Las fallas tienen carácter direccional inverso y están clasificadas como cuaternarias. La magnitud del escenario 2 se ha establecido en M_w 5.0 por ser la magnitud máxima registrada en el catálogo sísmico dentro de la zona sismogénica en la que se sitúa el emplazamiento de estudio. En la **Figura 27** se muestra la localización de los sismos de control asociados a los tres escenarios específicos.

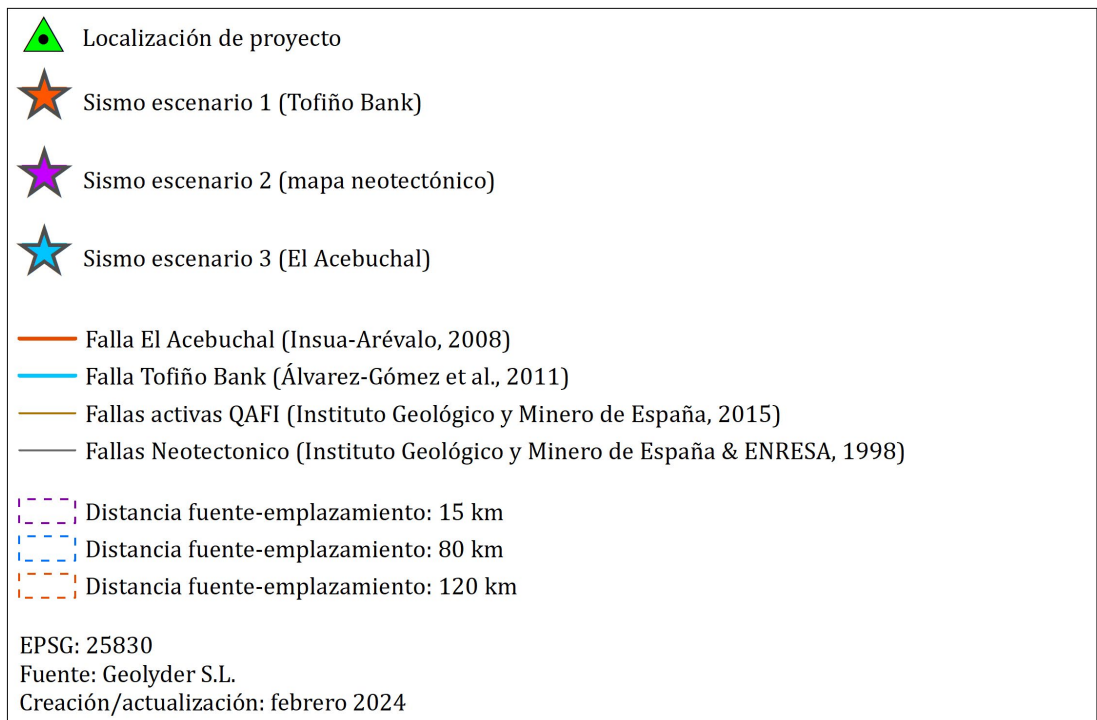
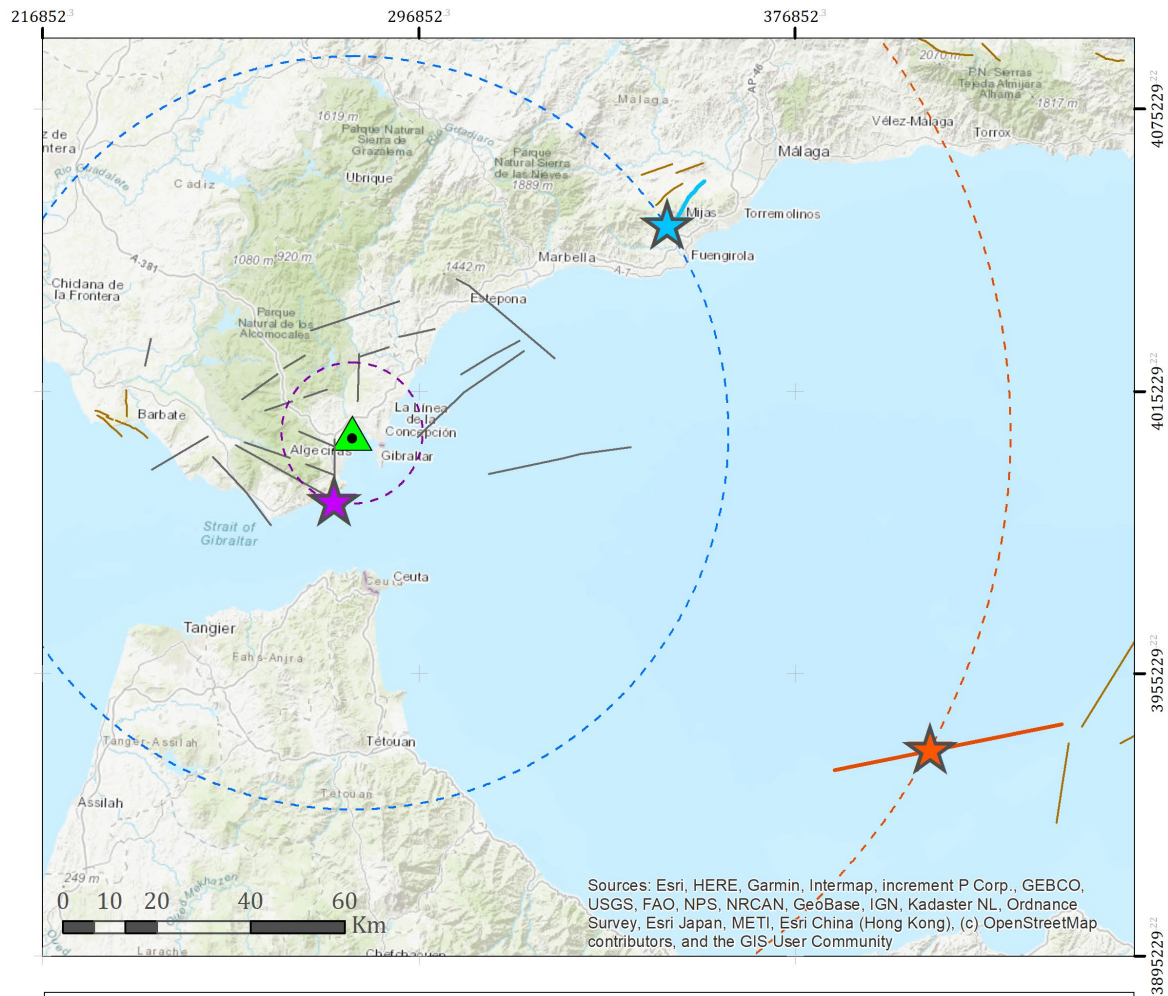


Figura 27. Localización de los sismos asociados a los escenarios específicos derivados del estudio de desagregación de la peligrosidad sísmica.

Espectros de respuesta específicos para los escenarios sísmicos

Se han estimado tres espectros de respuesta en base a los tres escenarios establecidos tras la desagregación. Los espectros resultantes se han comparado con el espectro de la norma de diseño sismorresistente vigente en España NCSE-02, siendo la aceleración sísmica básica para el municipio de Los Barrios 0.04g, que debe ser multiplicada por el coeficiente de importancia de 1.3, según lo establecido en la NCSE-02 para edificaciones de importancia especial. A continuación, se presentan los espectros estimados para el emplazamiento de estudio.

Espectro escenario 1 (E1). El escenario 1 se caracteriza por una magnitud M_w 7.0 y una distancia fuente-emplazamiento de 120 km. La **Figura 28** muestra el espectro obtenido a partir de los modelos de transferencia estimados en la campaña de medidas geofísicas y su comparación con el espectro NCSE-02. Para elaborar el espectro NCSE-02 se ha considerado un coeficiente del terreno igual a 2⁸ y un factor de importancia de 1.3, correspondiente a un PR de 975 años.

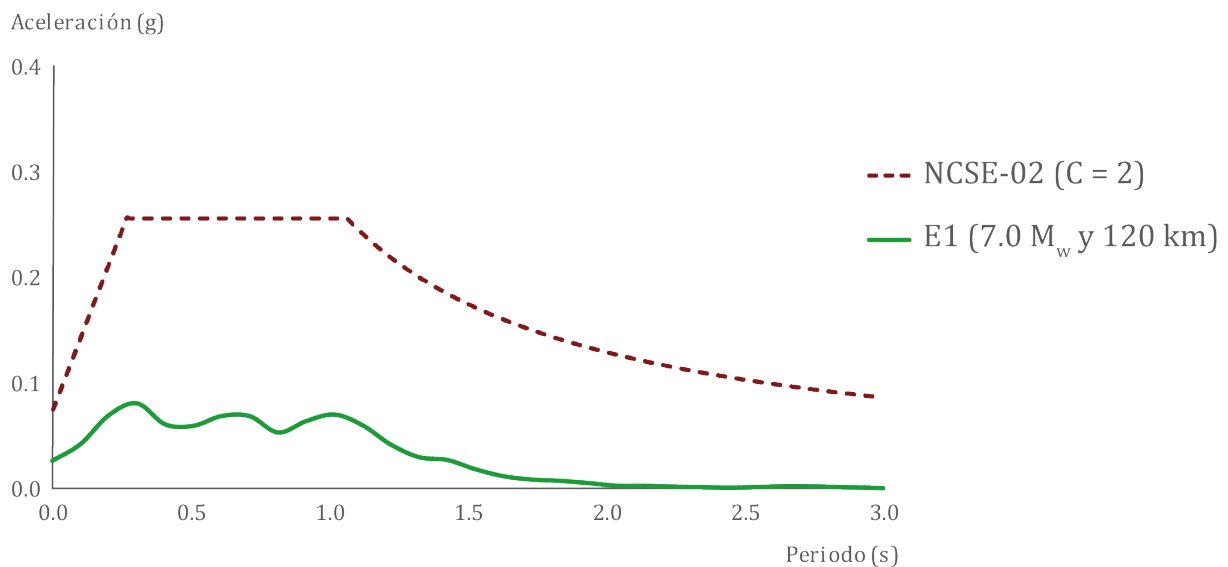


Figura 28: Espectro específico para el escenario 1 (PR 975 años) estimados en base al estudio probabilista de la peligrosidad sísmica (verde) y espectro según NCSE-02 (granate).

Espectro escenario 2 (E2). El escenario 2 se caracteriza por una magnitud M_w 5.0 y una distancia fuente-emplazamiento de 15 km. La **Figura 29** muestra el espectro obtenido a partir de los modelos de transferencia estimados en la campaña de medidas geofísicas y su comparación con el espectro de la norma NCSE-02.

⁸ Los dos modelos geotécnicos obtenidos tras el análisis de la peligrosidad en el área de estudio definen un valor del coeficiente C del terreno igual a 2.

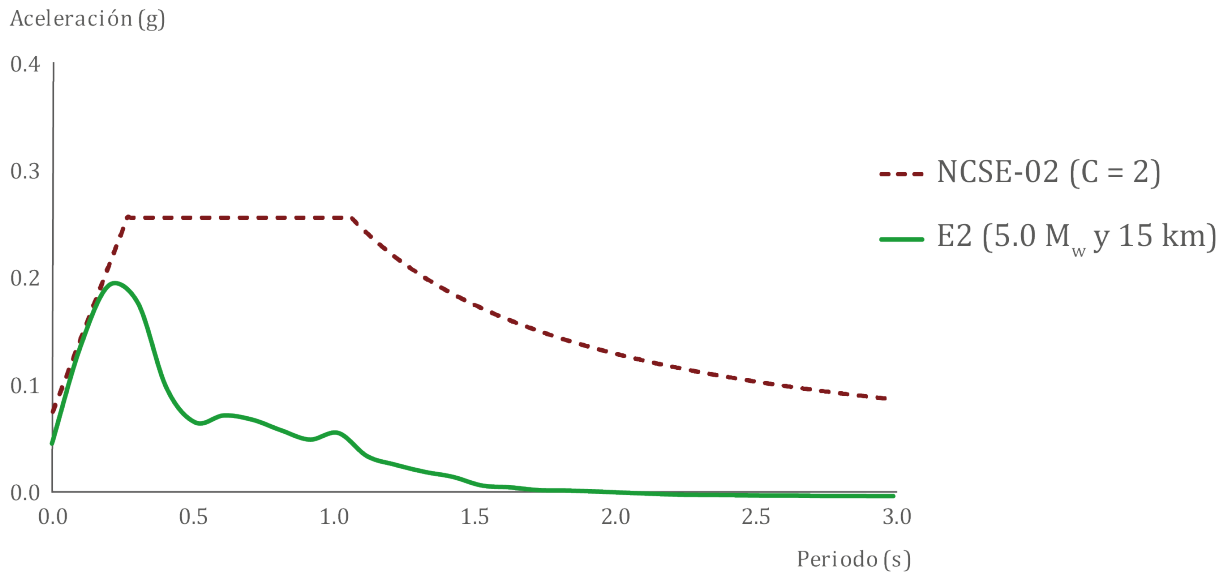


Figura 29: Espectro específico para el escenario 2 (PR 975 años) estimados en base al estudio probabilista de la peligrosidad sísmica (verde) y espectro según NCSE-02 (granate).

Espectro escenario 3 (E3). El escenario 3 se caracteriza por una magnitud M_w 6.4 y una distancia fuente-emplazamiento de 80 km. La **Figura 30** muestra el espectro obtenido a partir de los modelos de transferencia estimados en la campaña de medidas geofísicas y su comparación con el espectro de la norma NCSE-02.

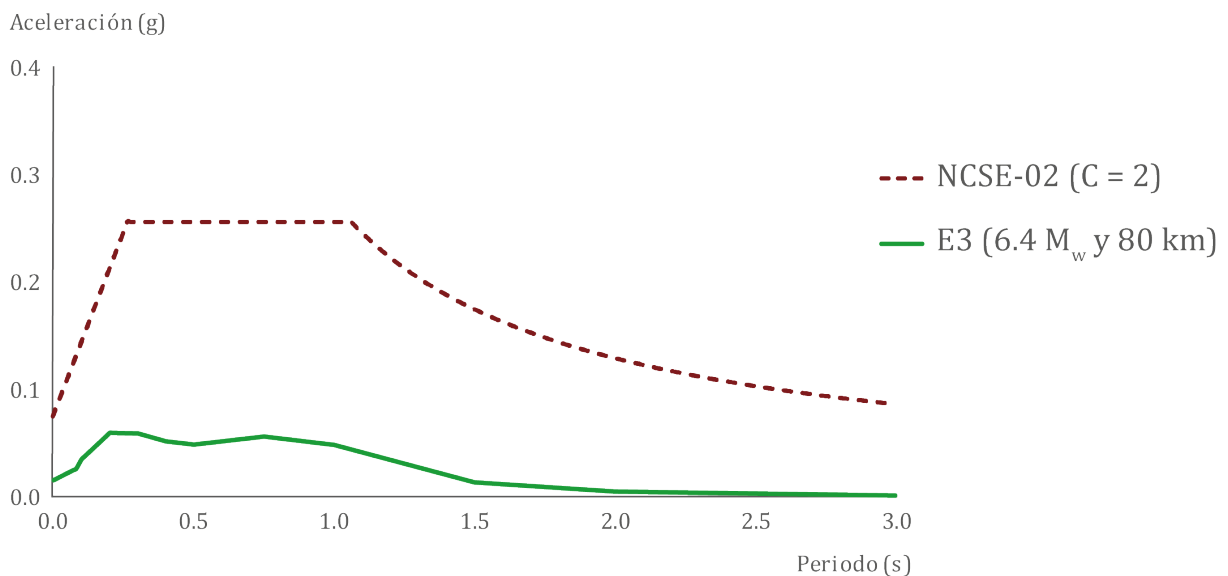


Figura 30: Espectro específico para el escenario 2 (PR 975 años) estimados en base al estudio probabilista de la peligrosidad sísmica (verde) y espectro según NCSE-02 (granate).

5.1.4. Resumen y conclusiones

Como resumen de los resultados obtenidos en el análisis de la peligrosidad sísmica del proyecto Los Barrios, se han obtenido cinco espectros de respuesta: dos espectros UHS (PR 475 y 975 años) y tres espectros específicos derivados del estudio de desagregación. Todos ellos se han obtenido tanto para suelo rocoso como considerando el efecto local tras la campaña de medidas geofísicas. En la **Figura 31**, se muestran los cuatro espectros estimados considerando el efecto local que se asocian a PR 975 años (el espectro UHS para PR 975 años y los 3 específicos) y el espectro según NCSE-02 para un coeficiente de importancia especial de 1.3 (PR 975 años) y un coeficiente de terreno $C = 2$. Se considera únicamente el PR 975 años por ser el que se corresponde con una probabilidad de excedencia del 5% en 50 años, que se asume habitualmente para el diseño de edificaciones de importancia especial, como es el caso de la presente investigación.

Para interpretar correctamente estos resultados, conviene recordar que el espectro de la normativa es el que se considera que ha servido de base para el diseño de la edificación en el emplazamiento de Los Barrios, mientras que los demás espectros representan la acción sísmica que cabe esperar según el estudio reciente desarrollado *ad hoc* para el emplazamiento en el que se considera ubicada la edificación. De estos últimos espectros se deriva la curva de demanda para el posterior cálculo del riesgo.

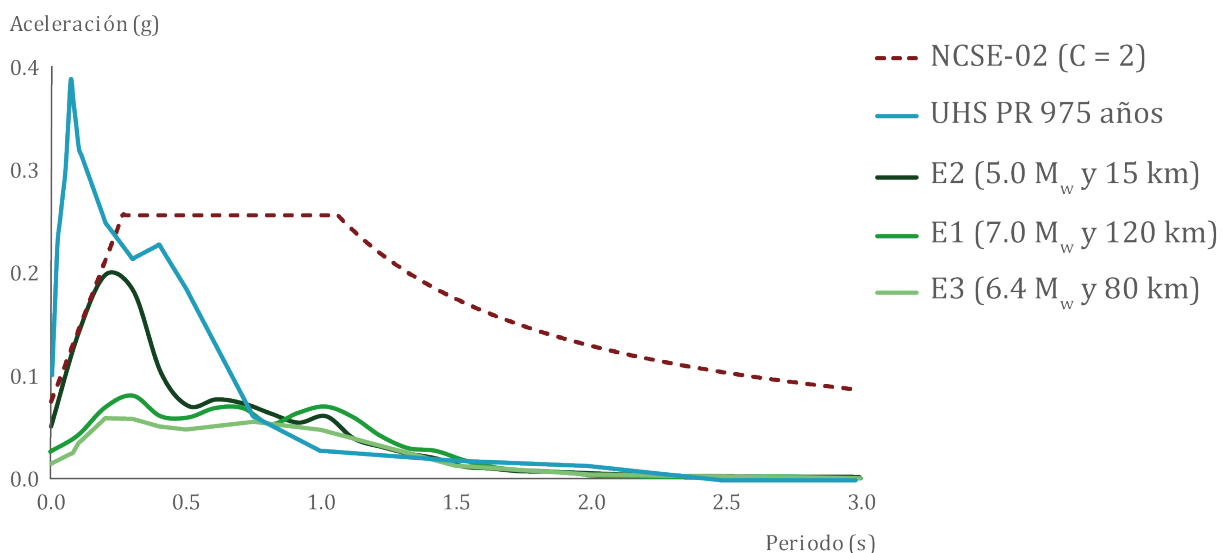


Figura 31. Espectro UHS para PR 975 años y específicos para los tres escenarios sísmicos derivados del estudio de peligrosidad sísmica en Los Barrios.

Considerando tanto los espectros específicos como los de respuesta uniforme, se observa que el espectro UHS para PR 975 años (en adelante denominado espectro UHS 975) es el que proporciona los valores mayores de aceleración. Los espectros específicos quedan siempre por debajo del espectro según NCSE-02.

Sin embargo, el espectro UHS para PR 975 años queda por encima del espectro NCSE-02 para cortos periodos ($T \leq 0.20$ s). El espectro del escenario 2 tiene asociados valores de aceleración mayores a los asociados a los espectros de los escenarios 1 y 3 para periodos inferiores a 0.5 s. El escenario 2 esta asociado a un sismo de menor magnitud, pero es el sismo mas cercano al emplazamiento de interés. En este caso, se puede observar que la distancia fuente-emplazamiento es de gran importancia a la hora de considerar la peligrosidad de una región. Sin embargo, los escenarios asociados a los sismos más lejanos tienen menores valores de aceleración en los cortos periodos, pero mayor en los largos periodos.

Considerando tanto los espectros específicos como los de respuesta uniforme, se observa que el espectro UHS para PR 975 años (en adelante denominado espectro UHS 975) es el que proporciona los valores mayores de aceleración. En la **Figura 32**, se muestra el espectro UHS para PR 975 años y el espectro según NCSE-02 generado para el coeficiente de importancia especial 1.3, asociado a un PR de 975 años, y para un coeficiente del terreno igual a 2.

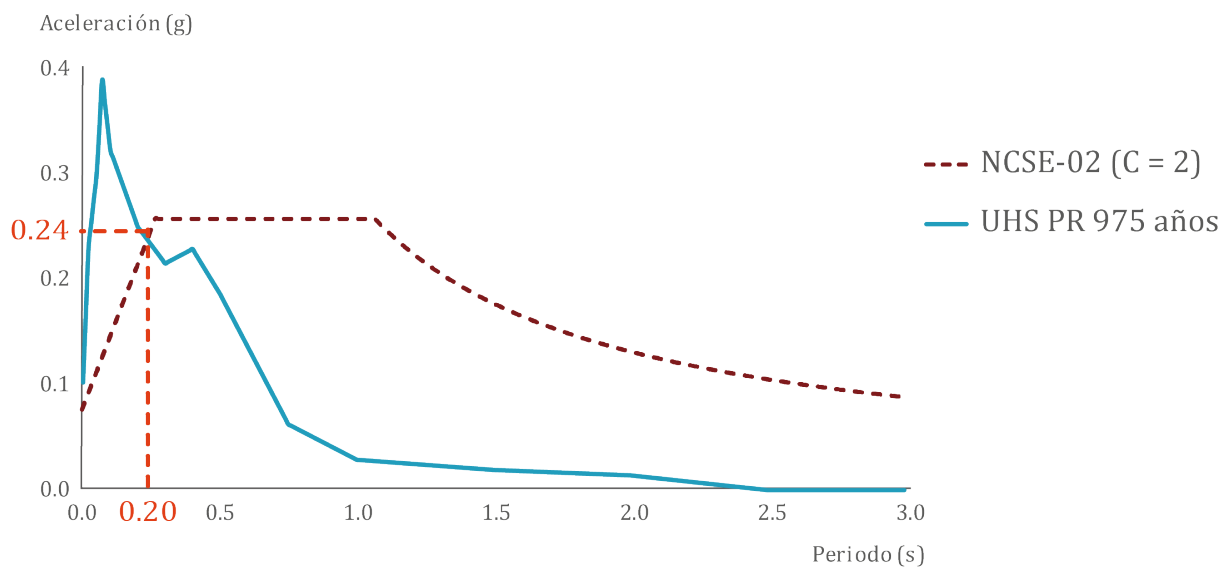


Figura 32: Espectro UHS para PR 975 años y espectro según NCSE-02 para un coeficiente de importancia especial de 1.3 y un coeficiente del terreno igual a 2.

Para definir correctamente el espectro que se debe considerar en el estudio de riesgo sísmico, se tiene en cuenta un requerimiento presentado en la NCSE-02: *las ordenadas espectrales en ningún caso serán menores que las obtenidas con el procedimiento general descrito por la norma*. Por ello, a partir del periodo de cruce entre ambos espectros, debe considerarse el espectro general de la norma. Por lo tanto, se considera como espectro representativo del movimiento en el emplazamiento para el periodo de retorno requerido por la importancia de la estructura (PR 975 años, $\rho = 1.3$) la envolvente de los espectros mostrados (**Figura 33**). Este espectro se identificará con la curva de demanda en el

posterior estudio de riesgo sísmico y representará la acción sísmica que cabe esperar en el emplazamiento del edificio a analizar (con la probabilidad requerida), según el estudio *ad hoc* realizado en el emplazamiento.

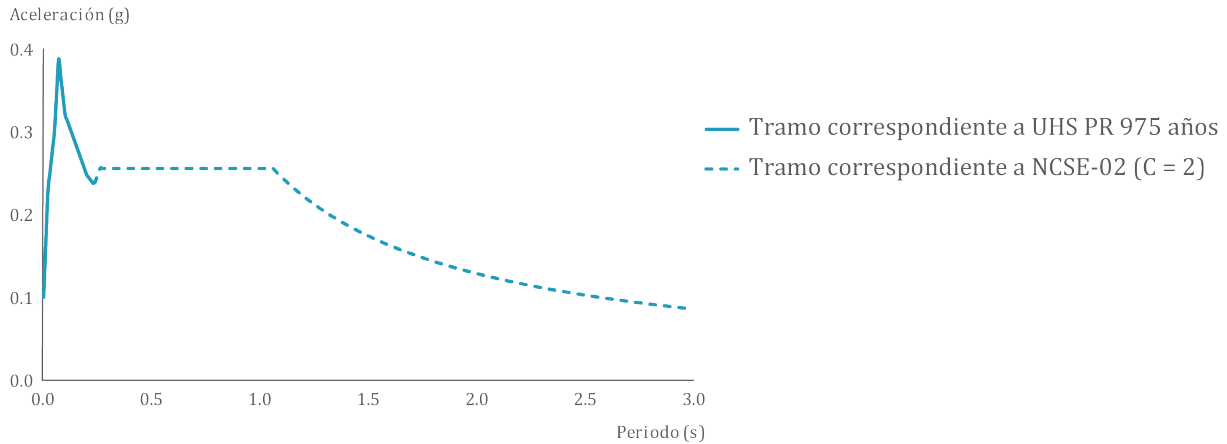


Figura 33: Espectro considerado para el estudio de riesgo sísmico asociado a un PR 975 años e incluyendo el efecto local.

5.2. Estimación del riesgo sísmico en un edificio de importancia especial. Modelización manual

La presente sección aborda la estimación del riesgo sísmico en un contexto particular: un edificio de importancia especial. A lo largo de esta sección, se detallan los procesos seguidos para la modelización manual y la definición de la vulnerabilidad sísmica y riesgo sísmico asociados al escenario sísmico presentado en la sección anterior.

5.2.1. Definición de la vulnerabilidad sísmica

Definición del modelo del edificio de forma manual

A continuación se describen los pasos llevados a cabo para la creación manual del modelo estructural del edificio. El objeto de estudio consiste en el edificio ETSITGC, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid (**Figura 34**). Se trata de un edificio de acero que fue construido en 1977, abarca seis alturas sobre rasante y cuenta con una superficie construida de 9,645 m². La estructura está dividida por dos juntas de dilatación estratégicamente ubicadas, lo que hace que el edificio esté compuesto por cuatro módulos. Como elementos rigidizantes, se localizan riostras en dos de sus fachadas de mampostería. La cimentación está compuesta por losas de hormigón superficial bajo soportes.



Figura 34. Fotografía exterior del edificio de la ETSITGC de la UPM.

La creación del modelo estructural se ha fundamentado en la integración de tres fuentes de datos: los planos arquitectónicos originales (Anexo II), el informe detallado sobre el estado del edificio emitido en 2019 y los datos recopilados durante varias campañas de campo. Los planos arquitectónicos han servido como punto de partida esencial, ofreciendo detalles precisos sobre la disposición y características geométricas fundamentales del edificio. El informe del estado del edificio en 2019 ha aportado información valiosa sobre algunos detalles estructurales. Por último, la campaña de campo ha complementado todos los datos anteriores para definir los materiales de construcción y dimensiones de los elementos estructurales.

La **Tabla 7** muestra fotografías de ciertas partes o elementos del edificio que han facilitado la definición de las características geométricas y de los materiales de construcción del mismo. Las dimensiones de los elementos estructurales y los materiales se han definido a partir de la información disponible, las observaciones, el conocimiento experto y en base a las técnicas constructivas de la época del edificio.

Como se ha indicado anteriormente, el edificio consiste en una estructura de seis alturas. La planta denominada sótano no está bajo tierra, sino que es una planta sobre rasante. Por lo tanto, las seis alturas están sobre rasante. La estructura principal del edificio son pórticos de acero laminado. Los soportes tienen una altura de 415 centímetros y son perfiles doble UPN en cajón de diferentes dimensiones en función de la planta (**Tabla 7**). Las vigas son perfiles IPE450 y forjados unidireccionales de espesor 20 centímetros. El edificio está compartimentado interiormente por muros de ladrillo con rasillones de espesor de 15 centímetros. Además, las fachadas son de mampostería. En concreto las

fachadas este y oeste se caracterizan por contar con cruces de San Andrés que funcionan como elementos de arriostramiento.

Tabla 7. Resumen de detalles estructurales del edificio ETSITGC que se utilizaron para caracterizar el modelo del mismo

SOPORTE		
		<p>Características del elemento</p> <p>Material: acero laminado Perfil: doble UPN en cajón Altura: 415 cm por planta Dimensiones por planta. Sótano: 26*18*1.4 cm; Cero: 24*17*1.3 cm, Primera: 22*16*1.25 cm; Segunda: 22*16*1.25 cm; Tercera: 20*15*1.5 cm; Cuarta: 20*15*1.5 cm</p>
VIGA		
	<p>Características del elemento</p> <p>Material: acero laminado Perfil: IPE450 Dimensiones: 45*17 cm</p>	
JUNTA DE DILATACIÓN		
		<p>Características del elemento</p> <p>Dos juntas de dilatación que dividen al edificio en cuatro módulos.</p>

La modelización detallada del edificio se ha ejecutado utilizando dos herramientas informáticas: AutoCAD y SAP2000. Mediante AutoCAD se ha elaborado el modelo preciso

de distribución de elementos estructurales. Dicho modelo se ha utilizado posteriormente como base sólida para el modelado estructural. Se ha utilizado SAP2000 para llevar a cabo una integración de la geometría y las características de materiales de todos los elementos estructurales. Esta plataforma de análisis estructural avanzado ha posibilitado la generación de un modelo tridimensional completo (**Figura 35**). Para definir la curva de capacidad de la estructura desnuda (*bare structure*) y estimar el daño por sismo en los elementos estructurales, se han considerado la existencia de rótulas plásticas en:

- Soportes. Las rótulas plásticas en estos elementos permiten considerar los efectos de interacción entre axil y momento en sus dos direcciones
- Vigas. Las rótulas plásticas en las vigas permiten definir el efecto del momento en su dirección de máxima inercia
- Diagonales de acero. Las rótulas plásticas en las diagonales permiten definir el efecto de axiles.

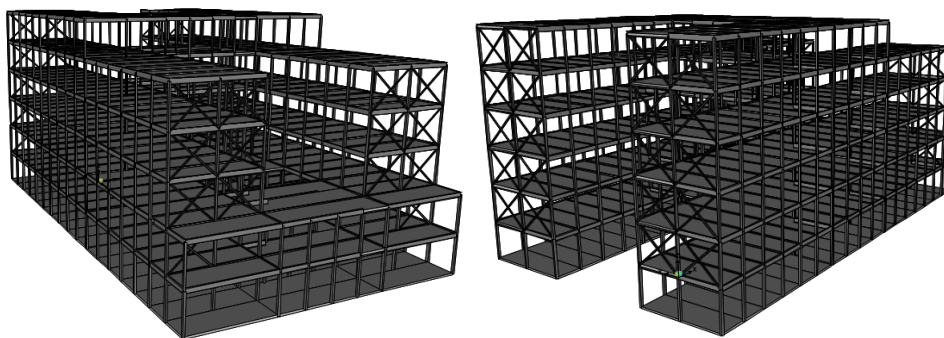


Figura 35: Modelo estructural del edificio ETSITGC creado en SAP2000. A la izquierda, se muestra la fachada este (fachada principal del edificio) y, a la derecha, la fachada oeste (fachada trasera del edificio).

Análisis integrados para la elaboración y calibración del modelo del edificio

El objeto de estudio es un edificio que tiene dos juntas de dilatación. Por este motivo, se considera que el edificio está dividido en cuatro módulos (**Figura 36**). Se recomienda realizar el análisis integral de cada módulo de forma independiente. Este enfoque permite considerar las características y comportamientos individuales de cada parte del edificio. Después de realizar los análisis por separado, se debe tener en cuenta la interacción entre los módulos para obtener una evaluación más completa del comportamiento sísmico global del edificio. A pesar de la preferencia por realizar un análisis integral del edificio considerando todas sus partes al final del proceso, la presente tesis se centra específicamente en el análisis detallado de un módulo individual. De esta manera, se

profundiza en la comprensión del comportamiento sísmico de una sección particular del edificio, explorando sus características estructurales y su respuesta ante cargas sísmicas de manera específica, lo que es crucial para el desarrollo de estrategias de diseño y mitigación de riesgos sísmicos en estructuras similares.

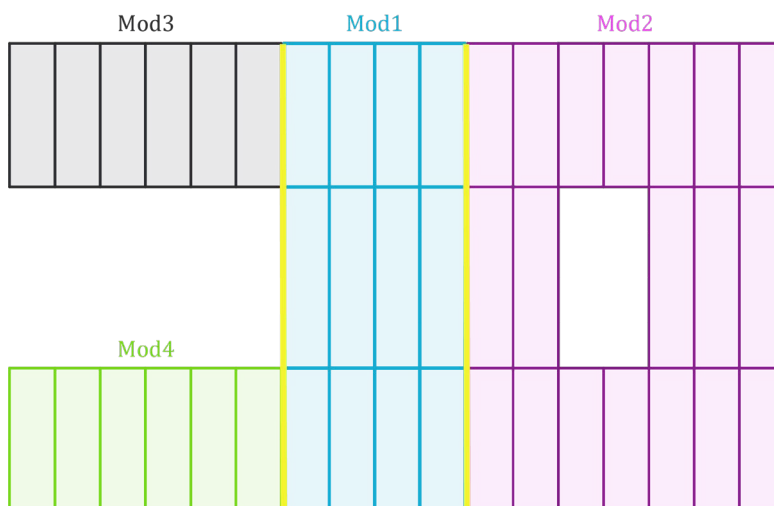


Figura 36. Vista en planta del edificio donde se muestran los cuatro módulos y las juntas de dilatación (amarillo).

Para la presente tesis, se ha seleccionado el módulo central del edificio ETSITGC (módulo azul en la **Figura 36**), en adelante denominado Mod1 (**Figura 37**), por varios motivos. Por un lado, debido a su posición central, interactúa con los demás módulos del edificio. Por lo tanto, su comportamiento impacta directamente en la respuesta sísmica global de la estructura. Por otro lado, este módulo, a pesar de su esbeltez, carece de elementos de arriostramiento, como diagonales, muros de cortante o cruces de San Andrés, que desempeñan un papel fundamental en la estabilidad lateral de una estructura. Cuando un edificio esbelto carece de estos elementos, su capacidad para resistir fuerzas horizontales, como las producidas por vientos fuertes o movimientos sísmicos, puede disminuir, lo que podría afectar a la integridad estructural y funcional del edificio. Esto se debe a que los elementos de rigidización y resistencia frente a tales fuerzas horizontales mejoran la capacidad de respuesta sísmica del edificio.

Por último, se considera un módulo característico, entre todos los módulos del edificio, porque la luz entre soportes varía desde tres metros hasta 9.5 metros. En otros módulos del edificio, la luz entre soportes es prácticamente equidistante (4.75 metros). En el contexto de la ingeniería estructural, la luz entre soportes es crucial para determinar la capacidad de carga y la estabilidad de la estructura, ya que afecta la distribución de cargas y las fuerzas internas dentro de los elementos estructurales.

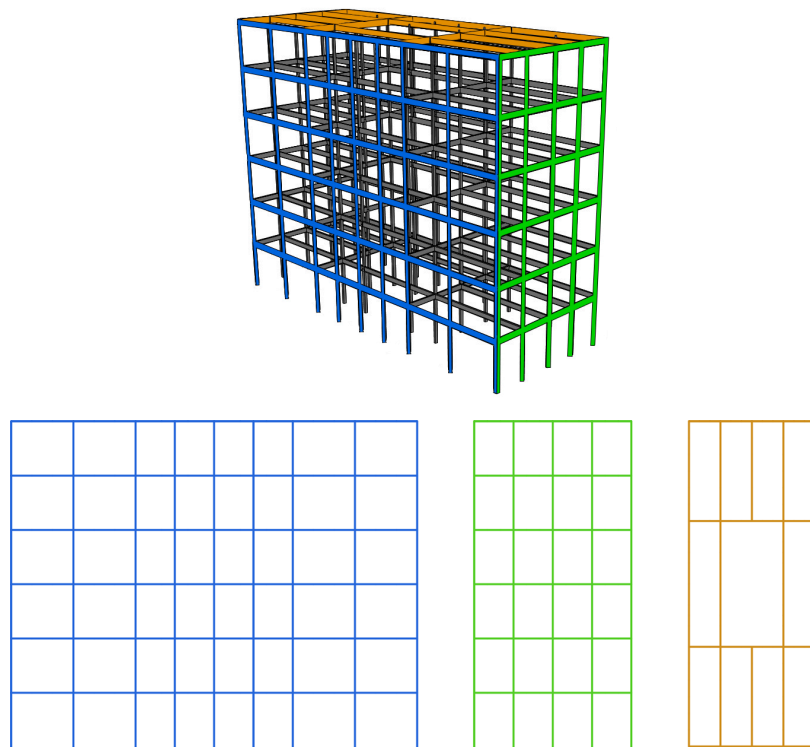


Figura 37. Vistas de Mod1: arriba se muestra la vista 3D; abajo se muestran los alzados, fachada oeste en azul y fachada sur en verde; y la planta en naranja.

En el capítulo 3.2.2, se ha introducido una metodología que propone una secuencia de análisis, la cual posibilita evaluar la necesidad de calibración del modelo estructural diseñado. Estos análisis se consideran fundamentales debido a la incertidumbre inherente a la fase de elaboración del modelo: distribución de elementos estructurales y definición de perfiles y materiales de construcción. A continuación, se incluyen los resultados experimentales obtenidos en cada uno de los análisis y la discusión de los mismos.

Resultados experimentales y discusión

Primero, se lleva a cabo el análisis modal de un modelo en el que se considera la estructura desnuda del edificio ETSITGC, descomponiendo sus modos de vibración característicos. Para el análisis modal se consideran, teniendo en cuenta las indicaciones de la NCSE-02, el 100% de las masas permanentes y el 60% del resto de masas. Los resultados obtenidos para el módulo Mod1 revelan un periodo de vibración de 2.4 segundos en la dirección X, para el segundo modo de vibración y con una contribución de masa significativa del 70%. De manera análoga, en la dirección Y se ha obtenido un periodo de 2.7 segundos, para el primer modo de vibración y una contribución de masa del 71% (**Figura 38**). Estos valores de periodo y las correspondientes contribuciones de masa son indicadores esenciales del comportamiento dinámico de la estructura ante excitaciones sísmicas.

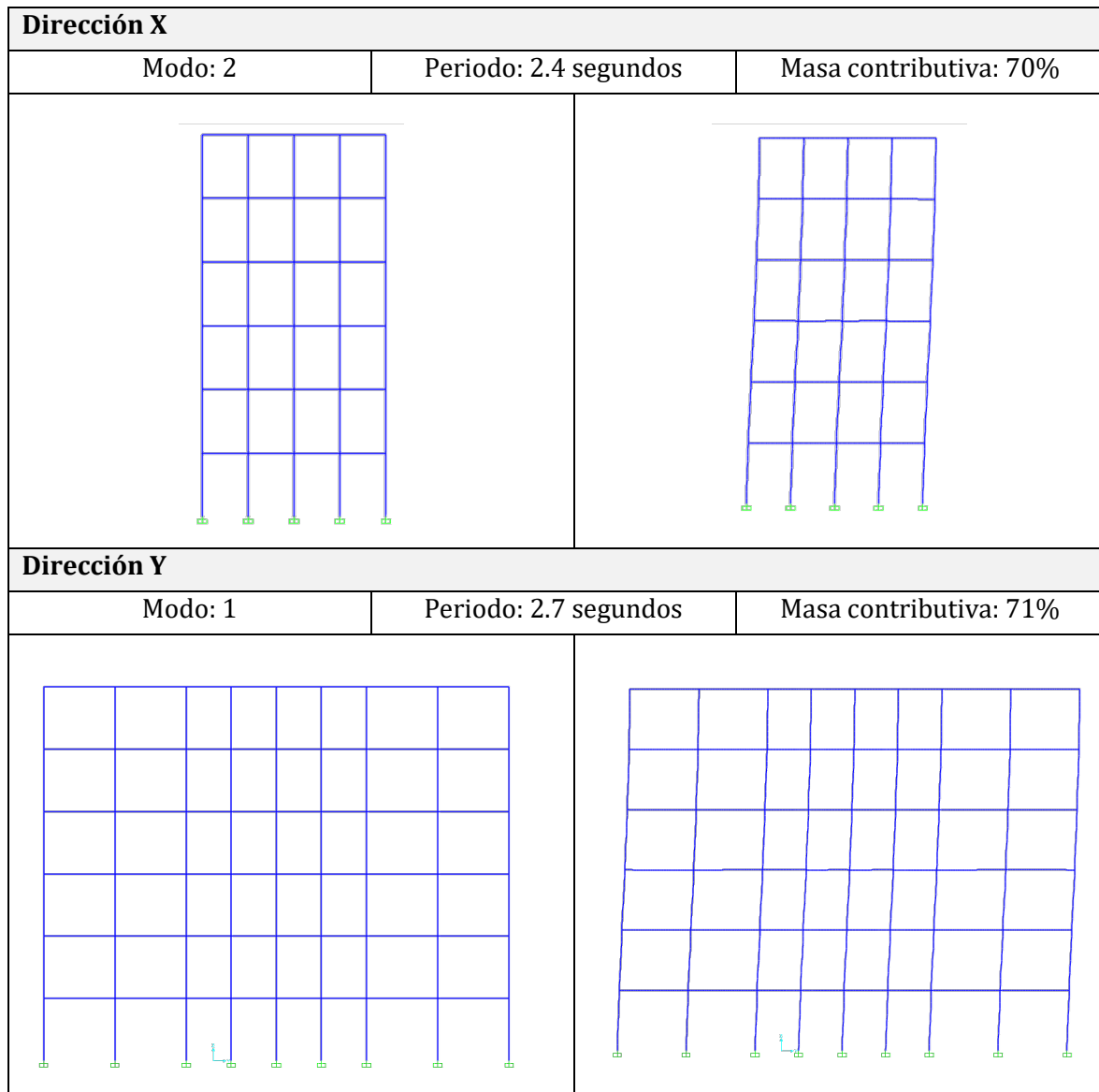


Figura 38. Vista en alzado de Mod1 mostrando los modos de vibración principales para cada una de las direcciones horizontales.

Los modos de vibración identificados reflejan exclusivamente la respuesta de los elementos estructurales del edificio, ya que el Mod1 se ha generado considerando únicamente dichos elementos. La inclusión de elementos no estructurales (muros interiores, muros de fachada, equipamientos pesados, etc.) aumentaría la rigidez global del edificio. El periodo de vibración de un edificio es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del cociente entre la rigidez efectiva de la estructura y la masa involucrada. A medida que la rigidez aumenta, la frecuencia natural de vibración aumenta, lo que se traduce en un periodo de vibración más corto.

Aunque los modos de vibración anteriores proporcionan información valiosa sobre la rigidez y masa efectivas de la estructura desnuda, no capturan la respuesta en condiciones reales de excitación sísmica o dinámica incluyendo los elementos no estructurales. Por

este motivo, se lleva a cabo un OMA. Este análisis es una herramienta esencial para comprender cómo la estructura responde a las cargas dinámicas en tiempo real, considerando la interacción compleja entre los elementos estructurales y no estructurales. Para llevar a cabo el OMA, se ha realizado una campaña de campo que ha implicado la medición de la vibración ambiental mediante el uso de un sensor de velocidad portátil 3D Tromino.



Figura 39. Imagen de la campaña de campo de medidas de vibración ambiental utilizando un sensor de velocidad portátil 3D Tromino.

Se registraron datos de vibración durante diez minutos en un total de 10 puntos estratégicamente distribuidos por todas las plantas del edificio (**Figura 40**). Es importante destacar que estos puntos de medición fueron ubicados de manera consistente en la misma posición horizontal en todas las plantas.

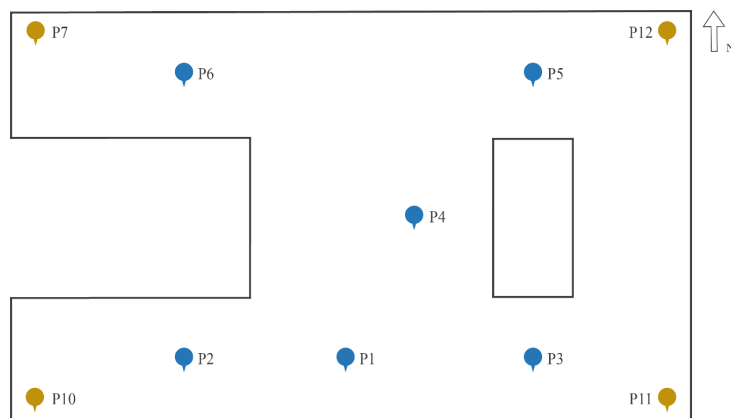


Figura 40. Distribución de los puntos de medida de vibración ambiental.

Para analizar los resultados y obtener las frecuencias fundamentales, se ha aplicado la metodología “Standard Spectral Ratio, SSR” ([Castellaro, 2016](#)). Es un método ampliamente aceptado y utilizado para evaluar la respuesta de vibración ambiental de un edificio. El método define la respuesta del edificio como la relación entre los espectros de amplitud de Fourier de las oscilaciones del suelo registradas en un sitio determinado y en

un sitio rocoso cercano, proveniente del mismo terremoto y componente de movimiento (Borcherdt, 1970). Se recomienda realizar mediciones simultáneas en todos los puntos de interés ya que, de esta forma, es posible obtener información de fase con mayor precisión. La caracterización del edificio Mod1 se ha llevado a cabo con una sola estación, dado que no se disponía del instrumental necesario para realizar mediciones simultáneas. A pesar de esta limitación, se han tomado todas las precauciones y consideraciones necesarias (Castellaro, 2016; Castellaro et al., 2017; Prati et al., 2020) para garantizar la validez del método de medida empleado. La principal medida de precaución tenida en cuenta es realizar las mediciones el mismo día para asegurar igualdad en las condiciones de ruido del edificio (ocupación y viento). Por lo tanto, se puede asumir que las respuestas de amplitud máximas son las mismas entre mediciones y se puede asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos en términos de periodos fundamentales de vibración del edificio.

Por un lado, la **Tabla 8** muestra los resultados de frecuencias y periodos obtenidos tras la aplicación del método SSR para todos los puntos medidos en el edificio ETSITGC. El módulo 1 presenta periodos similares en ambas direcciones. Por otro lado, el módulo 2 exhibe una variación significativa entre los periodos de sus puntos, señalando posibles diferencias en la rigidez y comportamiento dinámico dentro de este módulo. Se trata del módulo con mayor irregularidad en planta. Por último, los módulos 3 y 4 muestran gran variabilidad en la dirección UY. Los puntos con menor periodo son los que están localizados en las esquinas de estos dos últimos módulos. Este hecho podría estar relacionado con la posible influencia de la rotación en la respuesta dinámica, algo que debería contrastarse con un análisis modal más detallado para estos módulos. Las esquinas de un edificio suelen ser zonas críticas en términos de distribución de tensiones y deformaciones.

Tabla 8. Frecuencias (Hz) y periodos (s) obtenidos tras el análisis SSR del edificio ETSITGC. Los puntos están organizados en la tabla por módulos para facilitar la interpretación de los resultados.

		Frecuencia SSR (Hz)		Periodo SSR (s)	
		UX	UY	UX	UY
Mod1	Punto 1	2.16	2.47	0.46	0.41
	Punto 4	2.15	2.49	0.46	0.41
Mod2	Punto 3	2.17	2.47	0.41	0.46
	Punto 5	2.17	2.47	0.41	0.46
	Punto 11	3.18	3.00	0.31	0.33
	Punto 12	3.02	3.02	0.33	0.33
Mod3	Punto 6	2.19	2.47	0.46	0.41
	Punto 7	3.02	3.57	0.33	0.28
Mod4	Punto 2	2.16	2.50	0.46	0.40
	Punto 10	3.02	3.50	0.33	0.29

Por otro lado, la **Tabla 9** muestra los resultados obtenidos específicamente para el módulo de estudio (Mod1) en base al análisis modal operacional, calculado aplicando SSR, al análisis modal llevado a cabo con SAP2000 y al estimado en base a la NCSE-02 y el EC8. Se observa que los periodos más altos se han obtenido tras el análisis modal aplicado al modelo estructural diseñado. Los periodos obtenidos tras el análisis modal son hasta 2.5 veces mayores que los obtenidos a partir de los registros del OMA. Esta definición del periodo fundamental del edificio se debe a dos factores. Por un lado, a la rigidez del edificio. Por ejemplo, el tipo de fijación de la base del edificio estimado, la no consideración de elementos no estructurales o la definición de elementos estructurales con cierta incertidumbre, entre otros, implican un aumento o disminución de la rigidez en el modelo estructural diseñado. Dado que el periodo es inversamente proporcional a la rigidez, si esta aumenta, disminuye el periodo. Por otro lado, la definición del periodo fundamental también se debe a la masa estimada para el edificio. Si aumenta mucho la masa considerada para el cálculo de resistencia del edificio, también lo hace el periodo, dado que ambos valores son directamente proporcionales entre sí.

Tabla 9. Periodos (s) obtenidos tras el análisis SSR y el análisis modal del módulo Mod1.

Periodo (s)					
SSR		Análisis modal		NCSE-02	EC8
UX	UY	UX	UY	-	-

Las diferencias observadas entre los resultados obtenidos mediante el OMA y los análisis modales estructurales son consistentes con investigaciones previas en la literatura. En [Barghi y Azadbakht \(2011\)](#), se estudió la influencia de los muros no estructurales en edificios de pórticos de acero. Al considerar distintas distribuciones de muros interiores, los autores encontraron que los periodos calculados considerando elementos no estructurales eran notablemente más bajos en comparación con aquellos que solo tenían en cuenta elementos estructurales. Este hallazgo respalda la idea de que la inclusión de detalles no estructurales puede afectar significativamente la respuesta dinámica de la estructura. Asimismo, el estudio de [Aras y Karapinar \(2021\)](#) proporciona una perspectiva adicional al explorar el efecto de la temperatura en un edificio de acero. Identificaron la falta de tabiques divisorios en el modelo numérico como la principal razón de las discrepancias entre propiedades dinámicas obtenidas experimental y numéricamente. La omisión de muros interiores en el modelo numérico condujo a frecuencias menores (periodos mayores) en comparación con los resultados del OMA. En [Aras \(2016\)](#) se compararon periodos fundamentales calculados según la normativa ASCE-7 y la metodología propuesta por Uang y Smith con resultados experimentales. Los periodos obtenidos numéricamente resultaron ser significativamente mayores, superando en algunos casos el doble de los periodos experimentales (OMA), lo cual respalda la variabilidad que puede surgir entre los métodos y subraya la importancia de considerar el contexto específico de cada estructura.

En conjunto, estos estudios respaldan la validez de las diferencias observadas en los resultados obtenidos para la presente tesis, proporcionando contextos similares en los cuales las discrepancias entre los resultados obtenidos mediante OMA y análisis modales estructurales son de causa conocida y han sido documentadas. Estas diferencias se atribuyen a la omisión de detalles y elementos no estructurales en los modelos numéricos, lo cual es coherente con la complejidad inherente de las respuestas dinámicas de las estructuras reales.

Por último, se lleva a cabo el análisis de acciones sobre la edificación en dos fases. En la primera fase, se consideran la normativa de diseño sismorresistente vigente en la época de construcción del edificio (1977) y para la región en la cual se construyó (Madrid). Es decir, se consideran las condiciones de diseño del edificio en la época y lugar en la que realmente fue diseñado (año 1977, en Madrid). En la segunda fase, se consideran las normativas y códigos técnicos vigentes en el momento del presente estudio (2021) y para la región de estudio (Los Barrios). De esta forma se trata de "trasladar" el edificio espacial y temporalmente y adecuarlo a las normas de diseño en el escenario hipotético que se asume (año 2021, en Los Barrios, Cádiz). Para ganar claridad en las descripciones posteriores, denominamos en adelante ER1 al escenario contemplado en la fase 1 (1977, Madrid) y ER2 al contemplado en la fase 2 (2021, Los Barrios).

Las normativas consideradas en la primera fase del estudio (ER1) de análisis de acciones sobre la edificación han sido:

- PDS-1 ([Ministerio de Planificación y Desarrollo, 1974](#))
- Norma Básica de edificación MV 101-1962 y MV 103-1972 ([Ministerio de la Vivienda, 1963](#); [Ministerio de la Vivienda, 1973](#))

La **Tabla 10** incluye los parámetros considerados para las acciones permanentes y accidentales que intervienen en el análisis de acciones sobre la edificación en Mod1. Estos parámetros consisten en pesos propios de los elementos estructurales, valor característico de la sobrecarga de uso y coeficientes de simultaneidad por la ocurrencia de acciones variables.

En base a todos los parámetros mencionados anteriormente se establecen casos de cargas que abarcan tanto acciones permanentes como variables y que se basan en el método del Estado de Límite Último del edificio (ELU). La **Tabla 13** muestra los casos de cargas establecidos para el análisis de cargas sobre la edificación.

Tabla 10. Parámetros considerados en el análisis de acciones sobre la edificación de Mod1 según MV 101-1962, MV 103-1975 y PDS-I 1974. Escenario ER1.

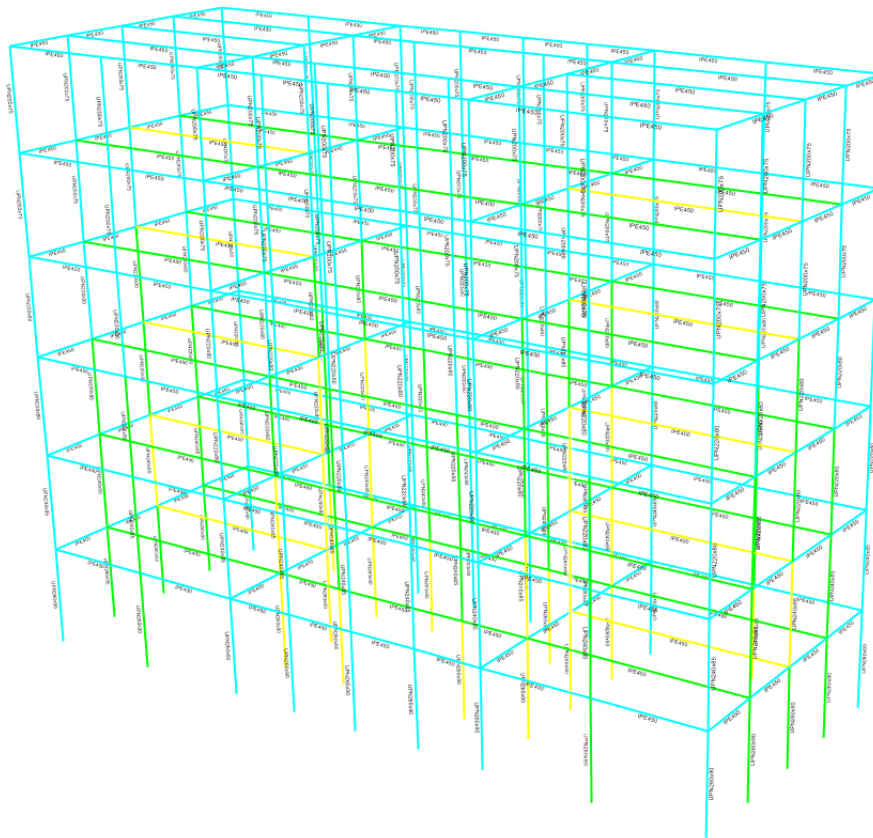
Documento	Parámetro	Definición	Valor	Unidad
MV 101-1962	Valor por sobrecarga de uso	Edificios docentes: escaleras y accesos	4	kN/m ²
MV 101-1962	Peso específico de elementos constructivos	Cerramientos de hoja de albañilería exterior y tabique interior; grueso total < 0.25 m	7	kN/m
		Tabicón de ladrillo hueco (9 cm)	1	kN/m ²
		Losa aligerada de hormigón armado de 20 cm de canto con bloque cerámico de 5 cm	2.7	kN/m ²
		Baldosa hidráulica o cerámica: grueso total, incluso relleno, 5 cm	0.8	kN/m ²
MV 103-1972	Coeficientes parciales de seguridad para verificar la resistencia en situación desfavorable	Acción permanente	1.33	-
		Acción variable (uso y viento)	1.33	-
PDS-I (1974)	Coeficientes de simultaneidad	Sobrecarga de uso	0.9	-
	Aceleración sísmica básica	Municipio Madrid (Madrid)	0.019	g

Tabla 11. Casos de cargas establecidos para el análisis de acciones en la edificación de Mod1 según MV 101-1962, MV 103-1975 y PDS-I 1974. Escenario ER1.

Caso de carga	Nombre de la carga	Factor de escala
ELU predominancia uso	Muerta	1.33
	Cerramiento	1.33
	Particiones	1.33
	Forjado	1.33
	Uso	1.5
	Viento en dirección X e Y	1.33
ELU predominancia viento	Muerta	1.33
	Cerramiento	1.33
	Particiones	1.33
	Forjado	1.33
	Uso	1.19
	Viento en dirección X e Y	1.5

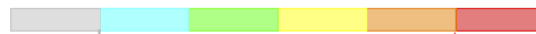
La **Figura 41** muestra los resultados obtenidos tras el análisis de acciones en la edificación para el escenario ER1. La figura muestra cada elemento estructural con un color asociado. Dicho color se corresponde con un índice de aprovechamiento del elemento (ratio). Las ratios asignadas a cada elemento de la estructura indican la relación entre la solicitación máxima que experimenta ese elemento y su capacidad de resistencia. En otras palabras, es una medida de la "seguridad estructural" del componente en cuestión. Una ratio igual o cercana a 1 indica que el elemento está siendo solicitado al límite de su capacidad de resistencia, lo que podría significar una zona crítica que requiere mayor atención en términos de diseño o refuerzo.

Se observa que todos los elementos estructurales tienen asociada una ratio por debajo de la unidad. Por lo tanto, se considera que, en términos generales, los perfiles de los elementos empleados en la modelización estructural son congruentes con las especificaciones de diseño vigentes durante el período de construcción y cuyas cargas aplicadas no exceden su capacidad resistente teórica. Por lo tanto, se acepta el modelo definido y se continua con el resto de análisis integrales de Mod1.



Índice de aprovechamiento del elemento (ratio)

0.0 0.5 0.7 0.9 1.0



Límite capacidad mínima

Límite capacidad máxima

Figura 41. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1 considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 1977 con el edificio situado en Madrid: MV 101-1962, MV 103-1975 y PDS-I 1974. Escenario ER1.

Dado el interés de evaluar la capacidad sísmica de un edificio en una región para la cual no fue originalmente diseñado, se lleva a cabo la segunda fase del análisis de acciones sobre la edificación. En esta ocasión, se repite el análisis, trasladando el edificio al escenario ER2, considerando entonces las normativas de diseño sismorresistente y códigos técnicos de edificación vigentes en la nueva región de estudio. Se realiza una adaptación del edificio en su nueva ubicación, como si hubiera sido diseñado siguiendo los criterios de las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 y para Los Barrios (Cádiz). Esto garantiza que los resultados obtenidos reflejen de manera precisa y actualizada las condiciones sísmicas a las que estará expuesto el edificio en su nueva ubicación.

El análisis del edificio en el escenario ER2 ha sido objeto de la segunda fase del estudio. En el análisis de acciones sobre la edificación, se han considerado las siguientes normativas y códigos técnicos:

- Norma de Construcción Sismorresistente de España, NCSE-02 ([Ministerio de Fomento, 2009b](#))
- Código Estructural, CE ([Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021](#))
- Documento Básico de Seguridad Estructural Acciones en la Edificación, DB SE AE ([Ministerio de Fomento, 2009a](#)). Este documento es parte del Código Técnico de Edificación (parcialmente derogado)

En la **Tabla 12**, se muestran los parámetros considerados para las acciones permanentes y accidentales que intervienen en el análisis de acciones sobre la edificación en Mod1 en el escenario ER2. Estos parámetros consisten en pesos propios de los elementos estructurales, valor característico de la sobrecarga de uso y coeficientes de simultaneidad por la ocurrencia de acciones variables (uso, viento y sismo).

Para considerar la respuesta del edificio ante acciones sísmicas y poder verificar la seguridad estructural también por acción de sismo, se define el espectro de respuesta en régimen estático lineal equivalente para el municipio de Los Barrios y el edificio de importancia especial de pórticos de acero laminado (**Figura 42**). En la **Tabla 12** se muestran los parámetros considerados para la elaboración del espectro indicado.

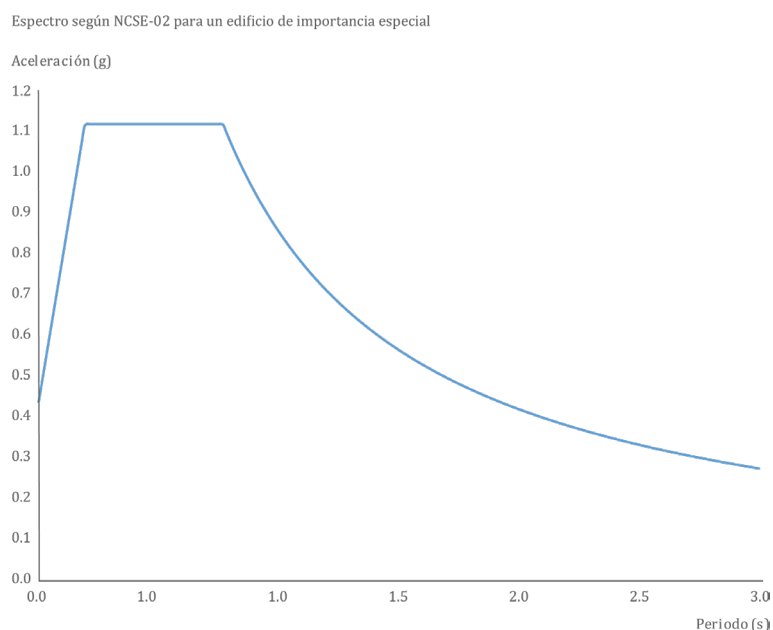


Figura 42. Espectro de respuesta en régimen estático lineal equivalente, modificado por amortiguamiento y ductilidad, para el municipio de Los Barrios según la NCSE-02. Considerando un edificio de importancia especial de pórticos de acero laminado. Escenario ER2.

Tabla 12. Parámetros considerados en el análisis de acciones sobre la edificación de Mod1. Escenario ER2.

Documento	Parámetro	Definición	Valor	Unidad
DB SE AE	Valor por sobrecarga de uso	Categoría C3: zona de acceso al público sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas	5	kN/m ²
DB SE AE	Peso específico de elementos constructivos	Cerramientos de hoja de albañilería exterior y tabique interior; grueso total < 0.25 m	7	kN/m
		Particiones de tabiques de ladrillo hueco de 90 mm de espesor	1	kN/m ²
		Forjado unidireccional de 20 cm de espesor	4	kN/m ²
		Pavimento cerámico de < 0.05 m de espesor	1	kN/m ²
CE	Coeficientes parciales de seguridad para verificar la resistencia en situación desfavorable	Acción permanente	1.35	-
		Acción variable (uso y viento)	1.5	-
CE	Coeficientes de simultaneidad	Sobrecarga de uso	0.7	-
		Viento	0.6	-
		Sismo	0.6	-
NCSE-02	Aceleración sísmica básica	Municipio Los Barrios (Cádiz)	0.04	g
	Coeficiente de contribución		1.2	-
	Coeficiente del terreno		1.6	-
	Factor de importancia	Importancia especial	1.3	-
	Amortiguamiento	Valor crítico	5	%
	Ductilidad	Edificio de pórticos de acero laminado con forjados unidireccionales	2	-

En base a todos los parámetros mencionados anteriormente se establecen casos de cargas que abarcan tanto acciones permanentes como variables y que se basan en el método del

estado de límite último del edificio (ELU)⁹. La **Tabla 13** muestra los casos de cargas establecidos para el análisis de cargas sobre la edificación.

Tabla 13. Casos de cargas establecidos para el análisis de acciones en la edificación de Mod1. Escenario ER2.

Caso de carga	Nombre de la carga	Factor de escala
ELU predominancia uso	Muerta	1.35
	Cerramiento	1.35
	Particiones	1.35
	Forjado	1.35
	Uso	1.5
	Viento en dirección X e Y	0.9
ELU predominancia viento	Muerta	1.35
	Cerramiento	1.35
	Particiones	1.35
	Forjado	1.35
	Uso	1.05
	Viento en dirección X e Y	1.5
Sismo en dirección X	Componente horizontal 1	1
	Componente horizontal 2	0.3
	Componente vertical	0.21
Sismo en dirección Y	Componente horizontal 1	0.3
	Componente horizontal 2	1
	Componente vertical	0.21

La **Figura 43** representa los resultados obtenidos tras el análisis de acciones en la edificación en el escenario ER2, mostrando cada elemento estructural con el valor del índice de aprovechamiento del elemento (ratio). Se han identificado un total de 27 soportes y 10 vigas con un valor de ratio superior a 1. Este hallazgo puede explicarse en gran medida por la variabilidad en la distancia entre soportes, que oscila entre tres metros y 9.5 metros.

⁹Según DB SE ([Ministerio de Fomento, 2019](#)): Los estados límite últimos son los que, de ser superados constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo.

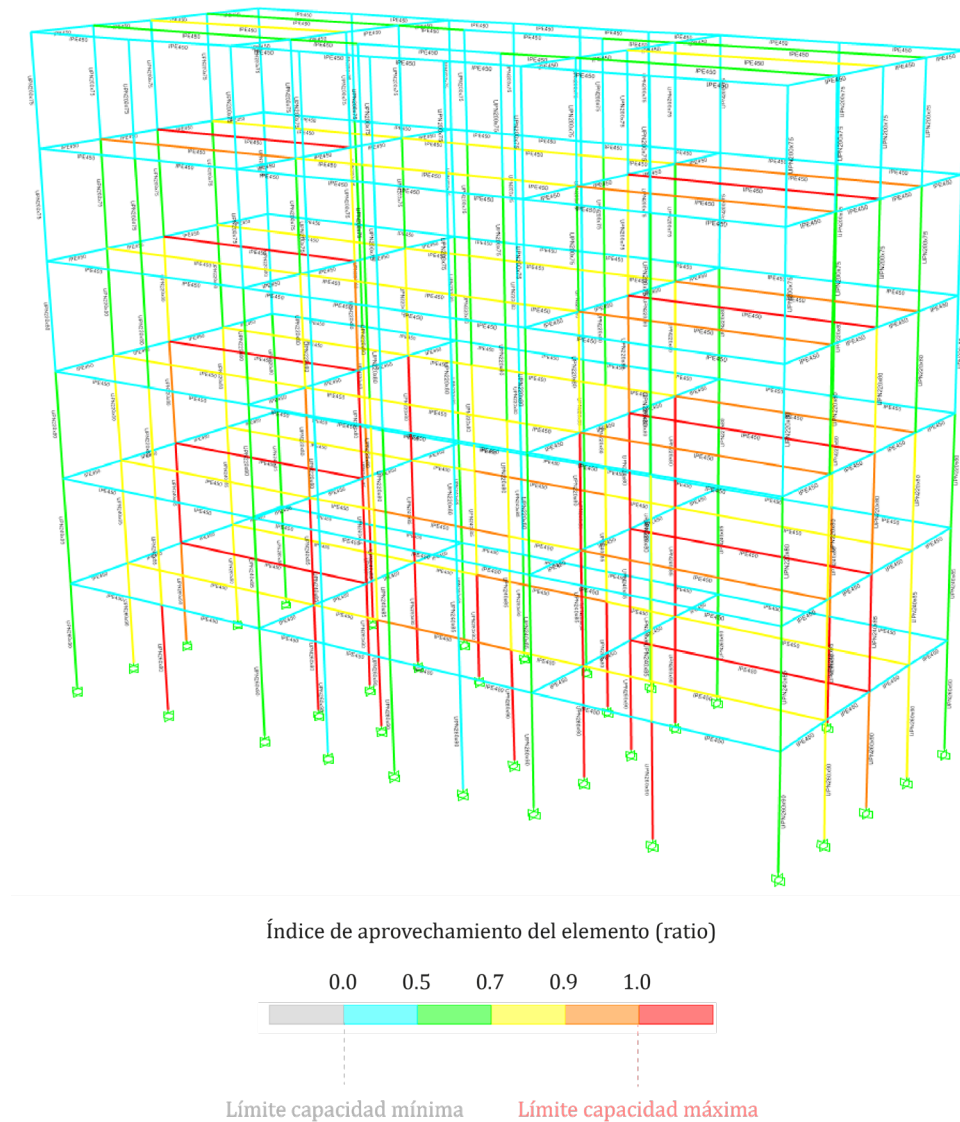


Figura 43. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1 considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE. Escenario ER2.

Por último, se ha llevado a cabo un análisis estático no lineal, conocido como pushover, para evaluar la capacidad de resistencia sísmica del edificio. Este tipo de análisis proporciona la curva de capacidad, que da información sobre el comportamiento estructural del edificio frente a una carga horizontal incremental. El análisis se ha realizado sobre el edificio en el escenario ER2 (Mod1 de la **Figura 43**). La curva de capacidad (**Figura 44**) refleja la capacidad estructural de Mod1 en términos de resistencia y rigidez ante cargas sísmicas crecientes, para una sollicitación asociada a la NCSE-02, normativa de diseño sismorresistente distinta a la que estaba en vigor en el momento de construcción del edificio. La principal diferencia entre las dos curvas de capacidad radica en la ductilidad inherente del edificio en cada una de las

direcciones evaluadas. El edificio es más dúctil en la dirección Y. Además, en la curva de capacidad, se ha indicado el punto de desempeño. El punto de desempeño se representa por un valor de desplazamiento (D en metros) y un valor de cortante basal (V en kilonewton) y se utiliza para determinar la seguridad y la capacidad de carga de una estructura durante un evento sísmico y es fundamental para el diseño y la evaluación del riesgo sísmico.

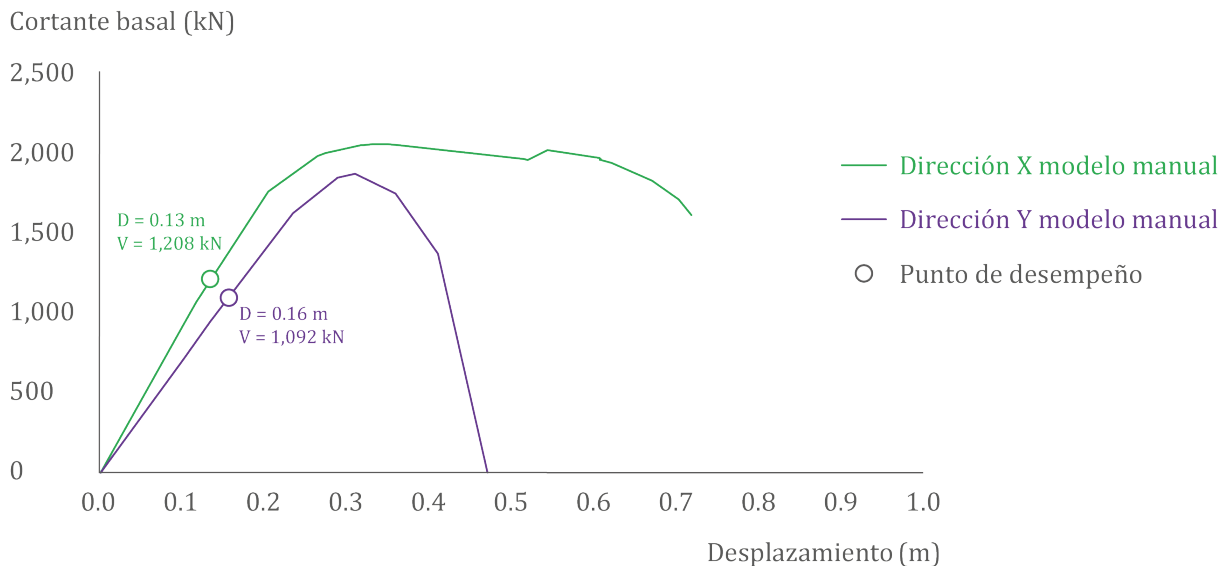
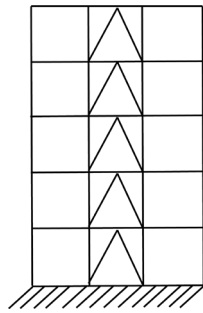


Figura 44. Curva de capacidad del modelo Mod1 sobre el escenario ER2 (2021, Los Barrios).

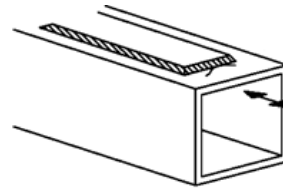
Retrofitting

Tras la realización del análisis integral de Mod1, se procede a implementar técnicas de *retrofitting* con el objetivo de modificar la capacidad portante y resistencia ante cargas permanentes y transitorias de la edificación. Los resultados obtenidos durante el análisis integral han permitido identificar de manera precisa las secciones y regiones específicas que requieren un refuerzo estructural. En este contexto, las técnicas de *retrofitting* se aplican de manera estratégica, adaptándose a las necesidades particulares de cada área de la estructura.

La selección de la solución de *retrofitting* adecuada varía significativamente dependiendo de varios factores: el conocimiento y experiencia del profesional a cargo del proyecto, el presupuesto disponible para las mejoras o los materiales y las técnicas de construcción regionales, entre otros. Por lo tanto, no se propone un enfoque único y estándar de *retrofitting*. En la presente tesis, se ha aplicado una técnica de *retrofitting* específica para reforzar el edificio mediante diagonales en dos direcciones con nudos articulados y chapas de acero soldadas transmisoras de fuerza (**Figura 45**).



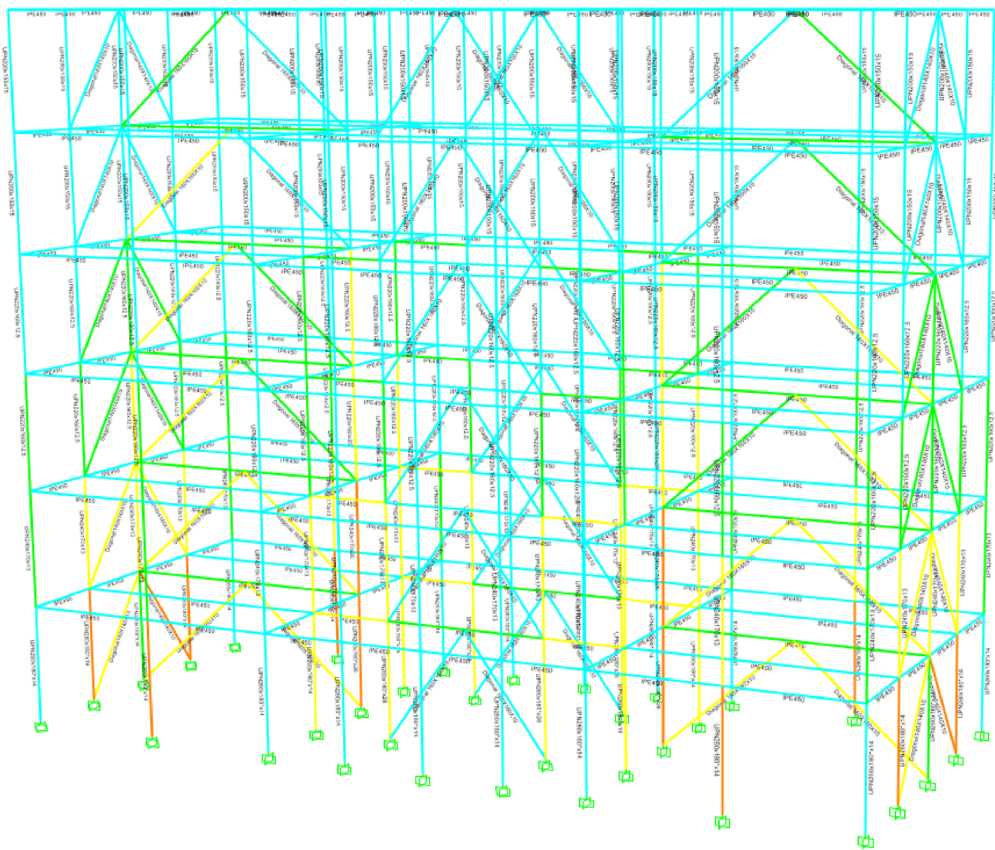
Pórticos arriostrados con diagonales con nudos articulados



Chapas de acero soldadas transmisoras de fuerza

Figura 45. Elementos de refuerzo considerados como técnicas de *retrofitting* para mejorar la capacidad y resistencia de Mod1 ([Ministerio de Fomento, 2012](#)).

Una vez aplicadas las dos técnicas de *retrofitting* consideradas, se procede a realizar de nuevo el análisis de resistencia de Mod1. Como resultado de este análisis, se obtiene un modelo de Mod1 calibrado en el que todos los perfiles muestran una relación entre la capacidad resistente y las demandas de carga inferior a 1. Como se observa en la **Figura 46** el color asociado a los elementos estructurales es azul, verde, amarillo y naranja. Este indicador es crucial ya que refleja la capacidad de la estructura para resistir las fuerzas externas y garantiza su estabilidad y seguridad estructural en diversas condiciones de carga. Por último, se lleva a cabo el análisis del edificio frente a deformaciones. Según la NCSE-02 la máxima deformación que puede considerarse como aceptable para el edificio Mod1 es de 9 cm. Tras el análisis de deformaciones, se obtiene un valor de deformación de 3.4 cm en la dirección X y 1 cm en la dirección Y. Ambos valores de deformación son inferiores al máximo permitido y, por lo tanto, se consideran adecuados.



Índice de aprovechamiento del elemento (ratio)

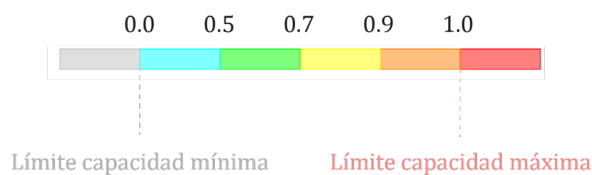


Figura 46. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1, tras aplicar *retrofitting*, considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE.

5.2.2. Estimación del riesgo sísmico

A continuación, se estima el riesgo sísmico del edificio adaptado al escenario ER2 y reforzado según lo indicado en el apartado anterior. Para ello, se considera la acción sísmica resultante del estudio de peligrosidad (apartado 5.1). Esto supone estimar el riesgo de una edificación supuestamente diseñada con los criterios de la normativa vigente en el emplazamiento de los Barrios, expuesta a un movimiento resultante de un estudio de peligrosidad llevado a cabo para el edificio de importancia especial.

La situación de realizar un estudio propio de peligrosidad de un emplazamiento para determinar el movimiento que puede someter a riesgo a una cierta edificación, es una práctica habitual cuando se quiere valorar la seguridad de estructuras de importancia especial, dado que la normativa se propone esencialmente para edificaciones convencionales, aunque luego se adapta a otro tipo de edificaciones. Por ejemplo, para puentes, presas, aeropuertos, etc. es bastante común realizar estudios específicos en sus emplazamientos.

Por lo tanto, este es el procedimiento que se sigue a continuación: someter el edificio a la acción sísmica del estudio *ad hoc* en su emplazamiento, y valorar su comportamiento, aun cuando se supone diseñado con la norma vigente que, por otra parte, tiene más de 20 años de existencia.

Para ello, se ha realizado un análisis dinámico no lineal utilizando un acelerograma sintético compatible con el espectro de respuesta resultante del estudio de peligrosidad. Como se ha explicado anteriormente, el espectro está compuesto por una primera rama que coincide con el UHS para PR 975 años y una segunda rama de acuerdo a la NCSE-02 para un coeficiente del terreno igual a 2 y un coeficiente de importancia de 1.3 en Los Barrios, Cádiz (espectro mostrado en la **Figura 33**). El análisis dinámico no lineal proporciona información detallada sobre la respuesta estructural del edificio frente a la excitación sísmica realista representada por el acelerograma (**Figura 47**).

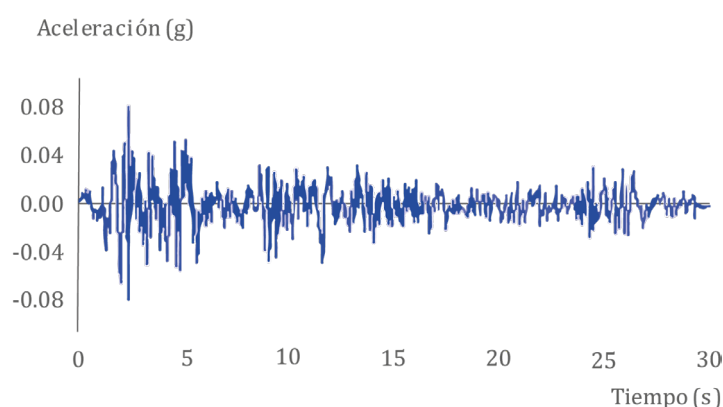


Figura 47. Acelerograma sintético compatible con el espectro de respuesta resultante del estudio de peligrosidad (mostrado en **Figura 33**).

La **Figura 48** muestra los resultados de daño obtenidos tras realizar el análisis dinámico no lineal para el edificio Mod1 creado de forma manual, habiendo sido reforzado y considerando las normativas y códigos técnicos de construcción vigentes en 2024 para la región de estudio (Los Barrios).

Por un lado, se observa la presencia de daño leve (puntos verdes) en algunas de las diagonales que fueron objeto del proceso de *retrofitting*. Este daño leve puede manifestarse en forma de grietas o deformaciones que no afectan la integridad estructural del edificio. Por otro lado, se aprecia daño severo en dos soportes de uno de los laterales del edificio Mod1 (puntos rojos). Es importante prestar especial atención a estos elementos y considerar en futuros estudios la posibilidad de aplicar técnicas de retrofitting sobre los mismos ya que el daño severo supone la necesidad de prevenir el colapso de los elementos en cuestión.

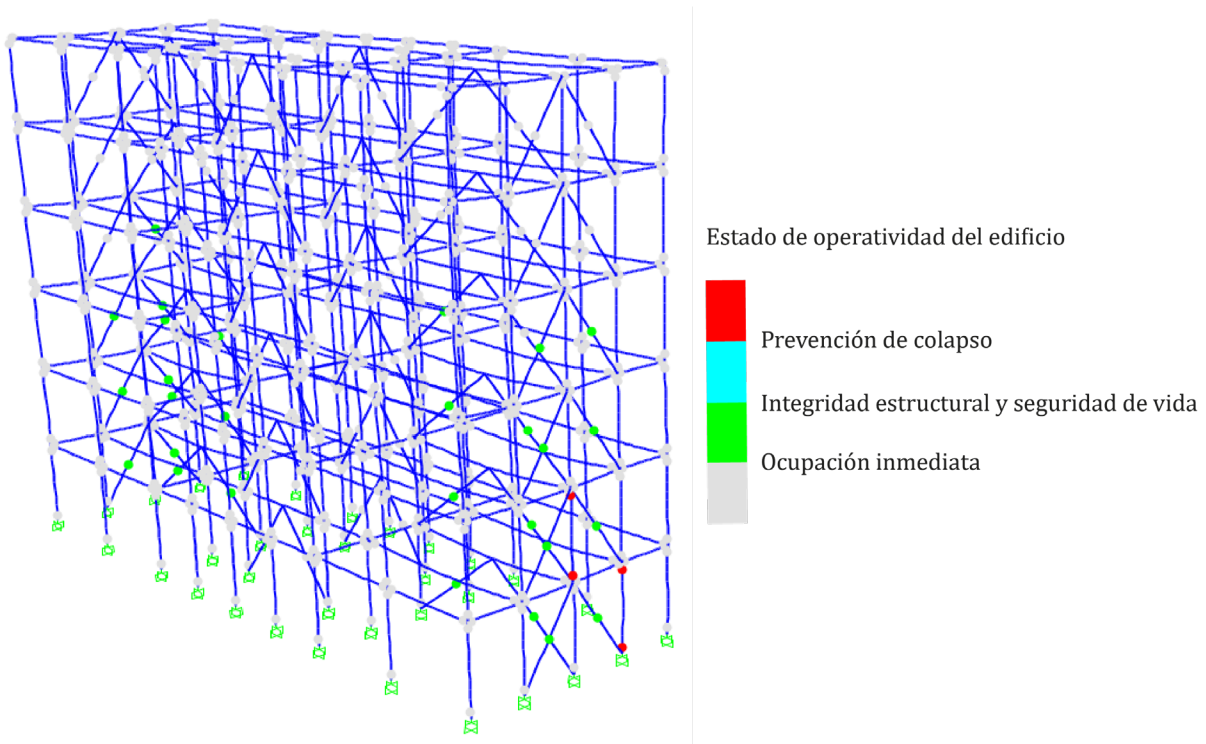


Figura 48. Resultados de daño obtenidos tras realizar el análisis dinámico no lineal para el edificio Mod1 creado de forma manual, habiendo sido reforzado y considerando las normativas y códigos técnicos de construcción vigentes en 2024 para la región de estudio (Los Barrios).

5.2.3. Resumen y conclusiones

Los resultados tras los análisis integrales para la calibración del modelo del edificio destacan la importancia de considerar elementos no estructurales, detalles locales y la masa representativa en los análisis dinámicos para obtener evaluaciones más precisas de la respuesta estructural. Además, se demuestra que los métodos operacionales y SSR ofrecen una perspectiva más completa de la dinámica real del edificio, incluso cuando difieren significativamente de los resultados normativos.

En conjunto, los resultados obtenidos en estudios previos que llevan a cabo OMA en edificios de acero, respaldan la validez de las diferencias observadas en los resultados

obtenidos para la presente tesis en cuanto a los periodos de vibración (**Tabla 9**). Los estudios previos proporcionan contextos similares en los cuales las discrepancias entre OMA y análisis modales estructurales son de causa conocida y han sido documentadas. Estas diferencias deben atribuirse a la omisión de detalles y de elementos no estructurales en los modelos numéricos y al valor de la masa considerada, lo cual es coherente con la complejidad inherente a las respuestas dinámicas de las estructuras reales.

En el contexto de un análisis modal y OMA, donde se determinan los periodos fundamentales para cada dirección horizontal, la convención más conservadora es considerar el periodo fundamental más desfavorable para la estructura en su conjunto. Esto significa que se selecciona el periodo más bajo entre los obtenidos en las distintas direcciones. La razón detrás de esta elección radica en que el periodo más corto representa la frecuencia natural dominante de la estructura y es crucial para evaluar su respuesta sísmica. Al considerar el periodo más bajo, se asegura que el análisis de diseño y evaluación de la respuesta estructural se realiza teniendo en cuenta la condición más crítica. Por lo tanto, en el presente caso de estudio, se considera el periodo fundamental de 0.41 segundos como el valor representativo para la estructura en su conjunto, ya que es el periodo más bajo entre los obtenidos en las direcciones horizontales. En la **Figura 49**, se muestran el espectro de respuesta considerado para el estudio (resultante del análisis previo de peligrosidad), el periodo fundamental considerado para Mod1 obtenido tras el análisis SSR, que tiene un valor de aceleración asociado de 0.26 g (naranja en la **Figura 49**) y el periodo fundamental obtenido tras el análisis modal, que tiene un valor de aceleración asociado de 0.10 g (morado en la **Figura 49**).

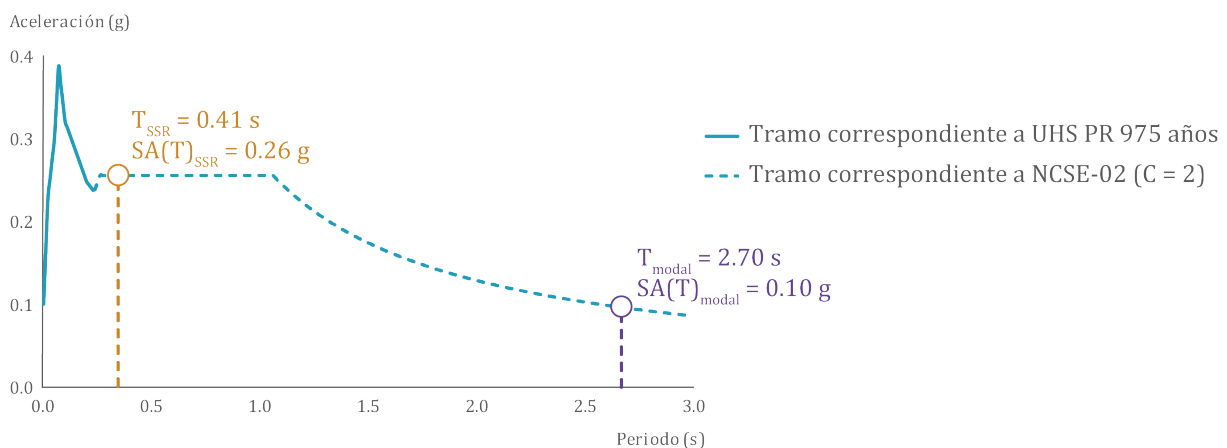


Figura 49. Periodo fundamental de Mod1 y su valor de aceleración en base al espectro considerado para el estudio.

En el estudio específico de Mod1, el edificio se encuentra del lado de la seguridad, ya que el valor de aceleración asociado a los periodos fundamentales de vibración calculados coincide con el valor proporcionado por el espectro según la NCSE-02. Sin embargo, es

importante tener en cuenta que, si se tratara de un edificio con menos plantas, lo que implicaría periodos fundamentales de vibración más cortos (inferiores a 0.20 s), los valores de aceleración de nuestro espectro serían mayores a los estipulados por NCSE-02. El edificio estaría expuesto a valores de aceleración asociados al primer tramo del espectro de estudio (**Figura 49**), superiores a los de la normativa. Esto destaca la importancia de realizar estudios de peligrosidad detallados para la zona de interés, especialmente cuando se trata de edificios de importancia especial, con el fin de garantizar la seguridad estructural y la adecuación a los requerimientos normativos correspondientes.

Con respecto a los resultados obtenidos tras realizar el análisis de acciones en la edificación para las normativas vigentes en el momento de construcción del edificio (1977), se considera que las cargas estimadas aplicadas al modelo estructural satisfacen los requisitos de resistencia establecidos por dichas normativas. Es importante destacar que el propósito principal de la evaluación estructural es analizar la conformidad de la estructura con las normativas y códigos aplicables en el momento de su construcción. Además, se considera que los perfiles utilizados en la modelización estructural se ajustan en su mayoría a las normativas de diseño aplicables en el momento de la construcción. Por lo tanto, se concluye que los perfiles establecidos para Mod1 son coherentes con la época de construcción y la región para la cual fue diseñado (escenario ER1). Sin embargo, como se puede observar en la **Figura 43**, no resultan apropiados para una zona de mayor sismicidad a la que se considerada originalmente. Por ese motivo, ha sido necesario modificar la estructura incrementando su rigidez a través de sistemas de arriostramiento, a fin de adaptarla al escenario ER2.

El enfoque integral desde el análisis del modelo del edificio hasta la implementación de medidas de *retrofitting* asegura una mejora sustancial en la integridad estructural y la seguridad del edificio. Sin embargo, los resultados del análisis de riesgo revelan elementos con daño leve y moderado, aun cuando la estructura se ha adaptado a las exigencias normativas del escenario ER2. Si bien el *retrofitting* ha mejorado la capacidad de resistencia sísmica del edificio, todavía existen áreas que podrían beneficiarse de una mayor atención o refuerzo teniendo en cuenta los resultados del estudio de peligrosidad y riesgo realizados.

**Capítulo 6. APLICACIÓN
METODOLÓGICA III. ESTIMACIÓN DE
RIESGO SÍSMICO EN UN EDIFICIO DE
IMPORTANCIA ESPECIAL MODELADO
DE FORMA SEMIAUTOMÁTICA**

Capítulo 6. APLICACIÓN METODOLÓGICA III. ESTIMACIÓN DE RIESGO SÍSMICO EN UN EDIFICIO DE IMPORTANCIA ESPECIAL MODELADO DE FORMA SEMIAUTOMÁTICA

En este capítulo, se persigue el objetivo fundamental de validar toda la metodología propuesta en el Capítulo 3. Dicha metodología se ha aplicado por separado anteriormente. En el Capítulo 4 se ha llevado a cabo la modelización automática de dos escenarios distintos mediante el uso de ABM-indoor. Y en el Capítulo 5 se ha implementado el flujo para la estimación del riesgo sísmico de un edificio de importancia especial.

Este apartado presenta los resultados derivados de aplicar la metodología ABM-indoor y el flujo de trabajo para la estimación del riesgo sísmico mediante análisis integrados para la calibración del modelo del edificio en el emplazamiento de estudio, Mod1. En adelante, se denomina ER3 al escenario derivado de toda la aplicación metodológica. El algoritmo ABM-indoor se ha aplicado en esta fase de la investigación como una herramienta para obtener de forma semiautomática la geometría del modelo del edificio Mod1. Una vez definida la geometría del edificio, se han considerado las propiedades de los materiales de construcción y la definición de los perfiles de los elementos estructurales en base a la investigación realizada en el propio edificio (**Tabla 7**).

El propósito fundamental de esta aplicación es la obtención de un modelo del edificio de estudio, similar al obtenido en el apartado 5.2, pero mediante técnicas semiautomáticas, obtener los resultados de riesgo sísmico para dicho modelo y compararlos con los resultados de riesgo obtenidos para el modelo del edificio Mod1 generado de forma manual. De este modo, se pueden analizar las diferencias y similitudes entre el enfoque manual y el semiautomático en términos de modelización y estimación del daño, tiempos de cómputo y costes.

En el presente capítulo, se ha tomado en consideración la información relativa a la peligrosidad sísmica estimada en el apartado 5.1. Esta información ha servido como base fundamental para llevar a cabo la evaluación de riesgo sísmico del edificio objeto de estudio.

6.1. Definición del modelo del edificio de forma semiautomática

Para la aplicación de ABM-indoor al edificio objeto de estudio se ha considerado la nube de puntos del exterior del edificio ETSITGC. La nube de puntos cubre aproximadamente un área de 3,100 m² y tiene aproximadamente de 4 millones de puntos (**Figura 50**).

El uso del edificio ETSITGC se considera fundamental para evaluar y validar: 1) la eficacia del algoritmo ABM-indoor en entornos exteriores y en la integración de la información

capturada en ambientes más amplios; y 2) la robustez de la metodología propuesta para la estimación de riesgo sísmico en edificios de importancia especial.

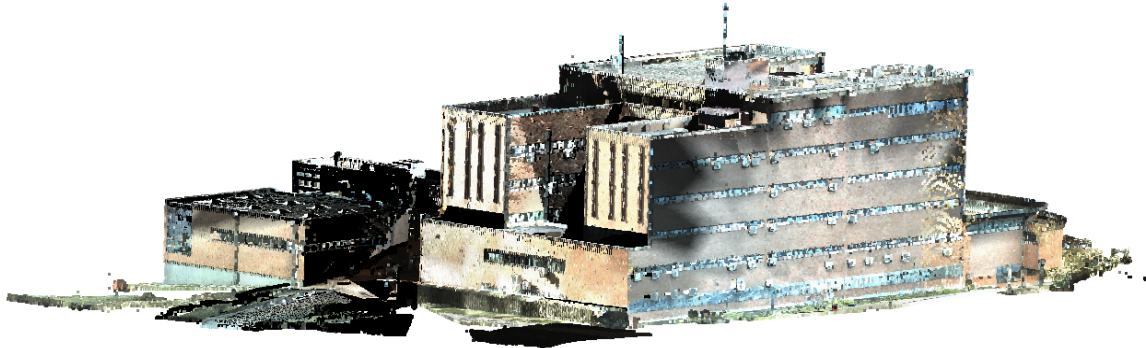


Figura 50: Nube de puntos a color de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid.

Tras aplicar ABM-indoor a la nube de puntos del edificio ETSITGC se obtienen los planos verticales y horizontales que componen la envolvente del edificio: techos y paredes (**Figura 51**). A partir de esos planos, se obtiene el contorno exterior del edificio, que define la planta del mismo (**Figura 52**).

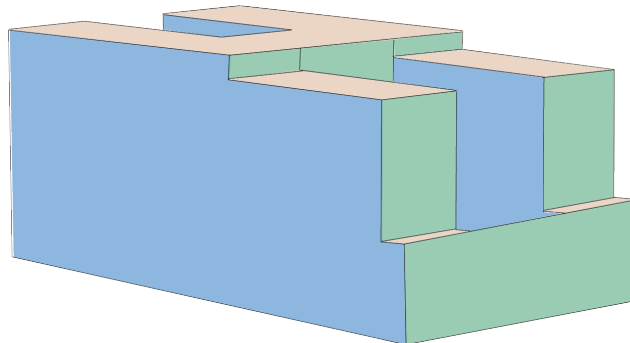


Figura 51. Planos exteriores del edificio ETSITGC: X en azul, Y en verde, Z es altura.

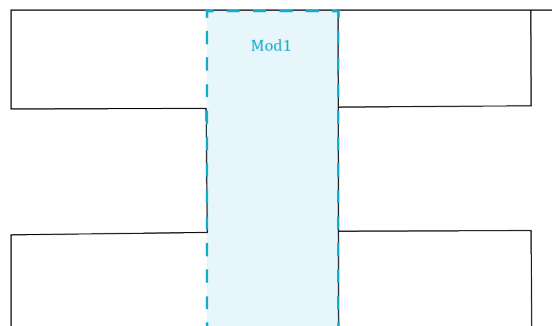


Figura 52. Plano de la planta del edificio ETSITGC.

Además, como complemento al proceso de clasificación y de delineado del edificio, se ha desarrollado un código en lenguaje Python para obtener la distribución de los elementos estructurales dentro del edificio objeto de estudio, Mod1. Este código permite una representación detallada de la disposición de vigas, columnas y otros elementos, brindando una visión más completa de la estructura (**Figura 53**).

El modelo geométrico obtenido de forma semiautomática se ha utilizado posteriormente como base para el modelado estructural. De forma análoga al proceso llevado a cabo en el Capítulo 5, se ha utilizado SAP2000 para crear el modelo estructural. Se ha llevado a cabo una integración de la geometría y las características de materiales de todos los elementos estructurales definidos en la **Tabla 7**. Para definir la curva de capacidad de la estructura desnuda (*bare structure*) y estimar el daño por sismo en los elementos estructurales, se han considerado la existencia de rótulas plásticas, tal y como se ha considerado para el modelo creado de forma manual.

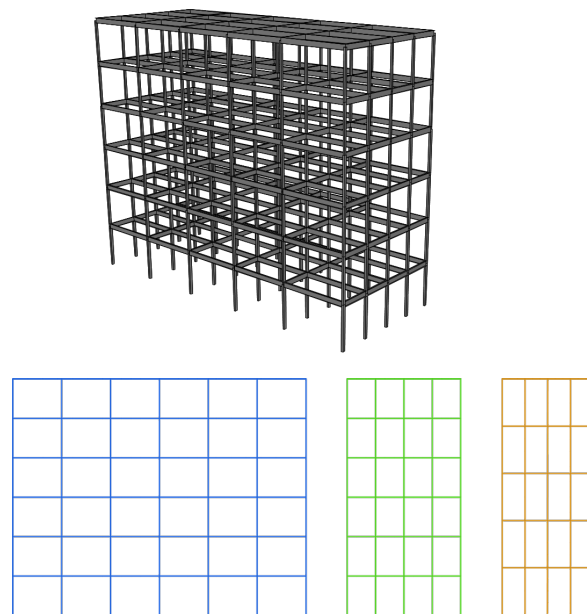


Figura 53. Modelo geométrico del edificio Mod1 obtenido de forma semiautomática tras aplicar ABM-indoor.

Finalmente, se ha aplicado el flujo de trabajo de análisis integrales para la definición de un modelo calibrado del edificio, conforme se ha detallado en el Capítulo 3 y Capítulo 4. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de este proceso para el escenario ER3.

6.2. Resultados experimentales y discusión

Primero, se lleva a cabo el análisis modal de un modelo en el que se considera la estructura desnuda del edificio ETSITGC generado mediante ABM-indoor, descomponiendo sus modos de vibración característicos. Para el análisis modal se consideran, teniendo en cuenta las indicaciones de la NCSE-02, el 100% de las masas permanentes y el 60% del resto de masas. Los resultados obtenidos para el módulo Mod1 revelan un periodo de vibración de 2.2 segundos en la dirección X, para el segundo modo de vibración y con una contribución de masa significativa del 71%. De manera análoga, en la dirección Y se ha obtenido un periodo de 2.9 segundos, para el primer modo de vibración y una contribución de masa del 72% (**Figura 54**).

La masa considerada para Mod1 obtenido de forma manual, modelo usado en los escenarios ER1 y ER2, es de 29,400 kN. Sin embargo, la masa considerada para el modelo semiautomático, modelo usado para el escenario ER3, es de 32,000 kN. Al aumentar la masa para el modelo semiautomático aumenta igualmente el periodo fundamental.

Al comparar los resultados del análisis modal con los valores obtenidos para el análisis OMA (**Tabla 14**), se observa una similitud notable con los resultados obtenidos para el modelo del edificio generado manualmente. Sin embargo, es importante destacar que los periodos resultantes del OMA son considerablemente más pequeños que los del análisis modal. Esta disparidad se atribuye a diferencias en la masa y la rigidez consideradas en el cálculo del análisis modal en comparación con las condiciones reales consideradas en el OMA.

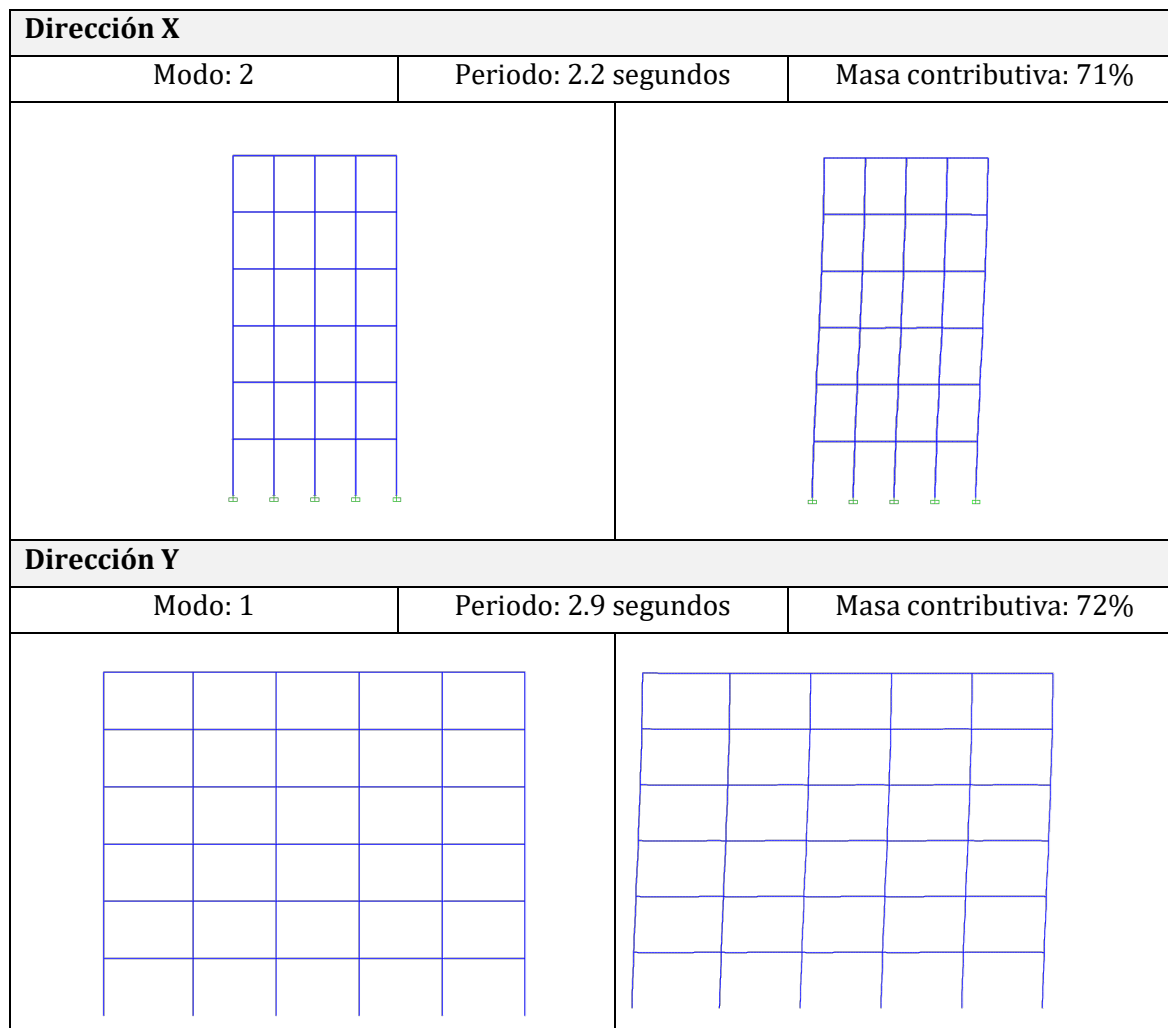


Figura 54. Vista en alzado de Mod1 semiautomático mostrando los modos de vibración principales para cada una de las direcciones horizontales.

Tabla 14. Periodos (s) obtenidos tras el análisis SSR y el análisis modal del módulo Mod1 creado de forma semiautomática.

Periodo (s)					
SSR		Análisis modal		NCSE-02	EC8
UX	UY	UX	UY	-	-
0.46	0.41	2.2	2.9	0.66	0.75
0.46	0.41				

A continuación, se lleva a cabo el análisis de acciones sobre la edificación para el escenario ER3, considerando las normativas y códigos técnicos de edificación actualmente vigentes en España para Los Barrios: NCSE-02, CE y DB SE AE.

Los parámetros considerados para el cálculo de resistencia se recogen en la **Tabla 12** y la **Tabla 13**. Además, para considerar la respuesta del edificio ante acciones sísmicas y poder verificar la seguridad estructural también por acción de sismo, se considera el espectro de respuesta en régimen estático lineal equivalente para el municipio de Los Barrios y el edificio de importancia especial de pórticos de acero laminado (**Figura 42**).

La **Figura 55** muestra los resultados obtenidos tras el análisis de acciones en la edificación al edificio Mod1 modelado de forma semiautomática. La figura muestra un total de 40 soportes con un valor de ratio superior a 1. Por este motivo, se procede a implementar técnicas de *retrofitting* con el objetivo de modificar la capacidad portante y resistencia ante cargas permanentes y transitorias de la edificación. De forma análoga al procedimiento llevado a cabo en el Capítulo 5, se ha aplicado una técnica de *retrofitting* específica para reforzar el edificio mediante diagonales en dos direcciones con nudos articulados y chapas de acero soldadas transmisoras de fuerza (**Figura 45**).

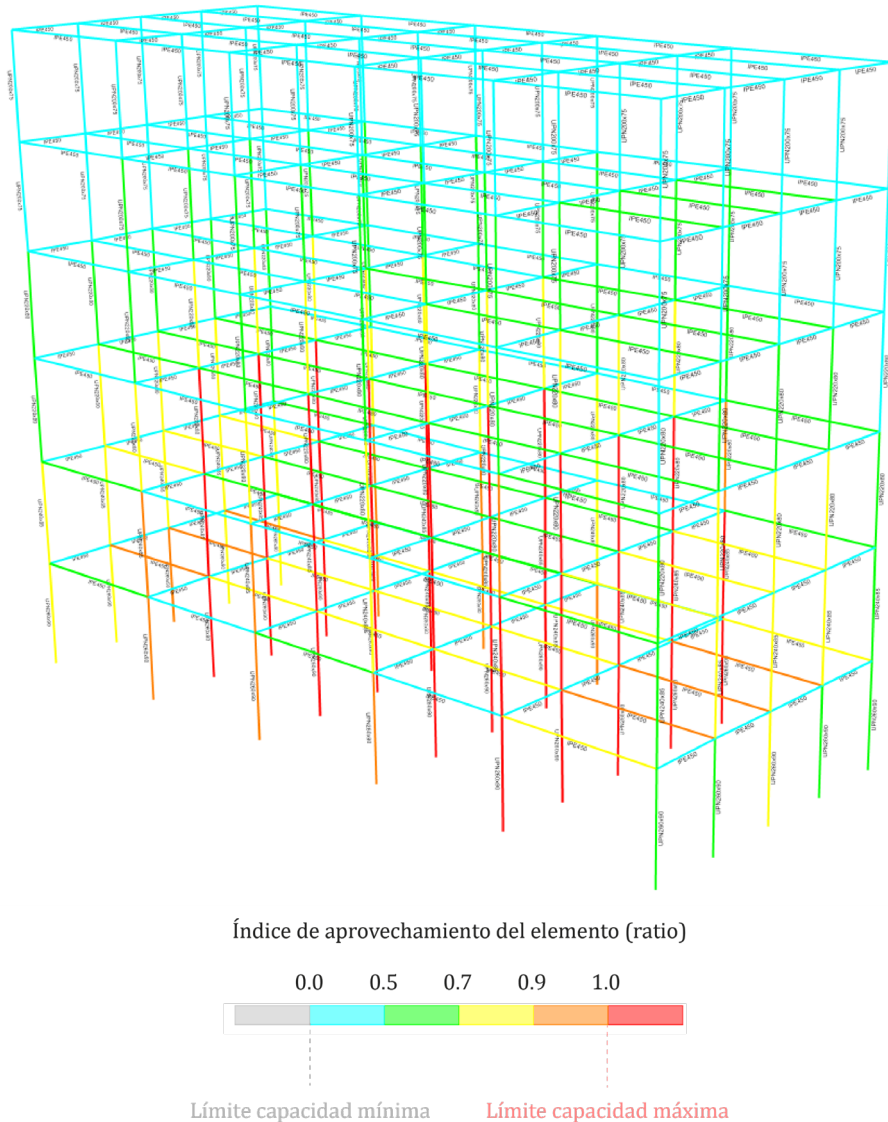


Figura 55. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1 considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE. Edificio modelado utilizando ABM-indoor. Escenario ER3.

Por último, se ha llevado a cabo un análisis estático no lineal para obtener la curva de capacidad del edificio Mod1 generado mediante la aplicación de ABM-indoor. El análisis se ha realizado sobre el edificio antes de ser reforzado (Mod1 de la **Figura 55**). La curva de capacidad (**Figura 56**) refleja la capacidad estructural de Mod1 creado con ABM-indoor en términos de resistencia y rigidez ante cargas sísmicas crecientes, para una solicitud asociada a la NCSE-02, normativa de diseño sismorresistente distinta a la que estaba en vigor en el momento de construcción del edificio. La principal diferencia entre las dos curvas de capacidad radica en la ductilidad inherente del edificio en cada una de las direcciones evaluadas. El edificio es más dúctil en la dirección Y. Además, en la curva

de capacidad se ha indicado el punto de desempeño. El punto de desempeño se utiliza para determinar la seguridad y la capacidad de carga de una estructura durante un evento sísmico y es fundamental para el diseño y la evaluación del riesgo sísmico.

En la **Figura 56** se han incluido las curvas de capacidad obtenidas para el edificio Mod1 creado de forma manual con colores más claros para facilitar la comparación de los resultados obtenidos para ambos modelos del edificio, el manual y el automático. Los valores del cortante basal y del desplazamiento tienen el mismo orden de magnitud para ambos modelos. Sí mismo, la tendencia de las curvas es similar para la dirección Y del edificio y también para la dirección X hasta desplazamientos del orden de 0.5 m.

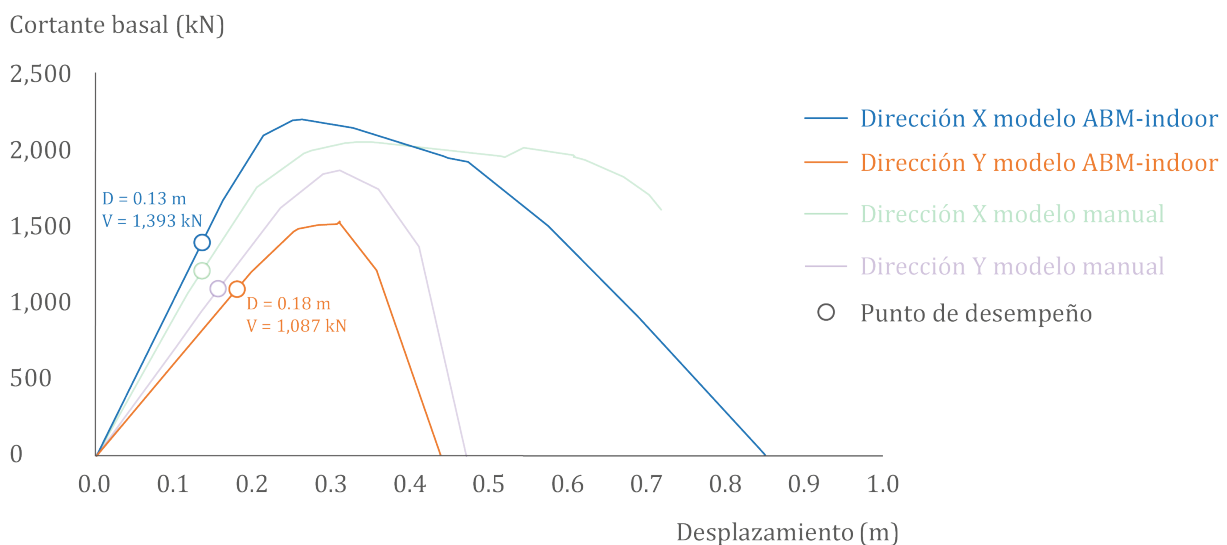


Figura 56. Curva de capacidad de Mod1 obtenido de forma semiautomática antes de ser reforzado. La curva de capacidad se ha obtenido considerando la NCSE-02.

Una vez aplicadas las dos técnicas de *retrofitting* consideradas, se procede a realizar de nuevo el análisis de resistencia de Mod1 generado de forma semiautomática. Como resultado de este análisis, se obtiene un modelo de Mod1 calibrado en el que todos los perfiles muestran una relación entre la capacidad resistente y las demandas de carga inferior a 1. Como se observa en la **Figura 57** el color asociado a los elementos del modelo es azul, verde, amarillo y naranja. Por último, se lleva a cabo el análisis del edificio frente a deformaciones. Según la NCSE-02 la máxima deformación que puede considerarse como aceptable para el edificio Mod1 es de 9 cm. Tras el análisis de deformaciones, se obtiene un valor de deformación de 3.2 cm en la dirección X y 0.9 cm en la dirección Y. Ambos valores de deformación son inferiores al máximo permitido y, por lo tanto, se consideran adecuados.

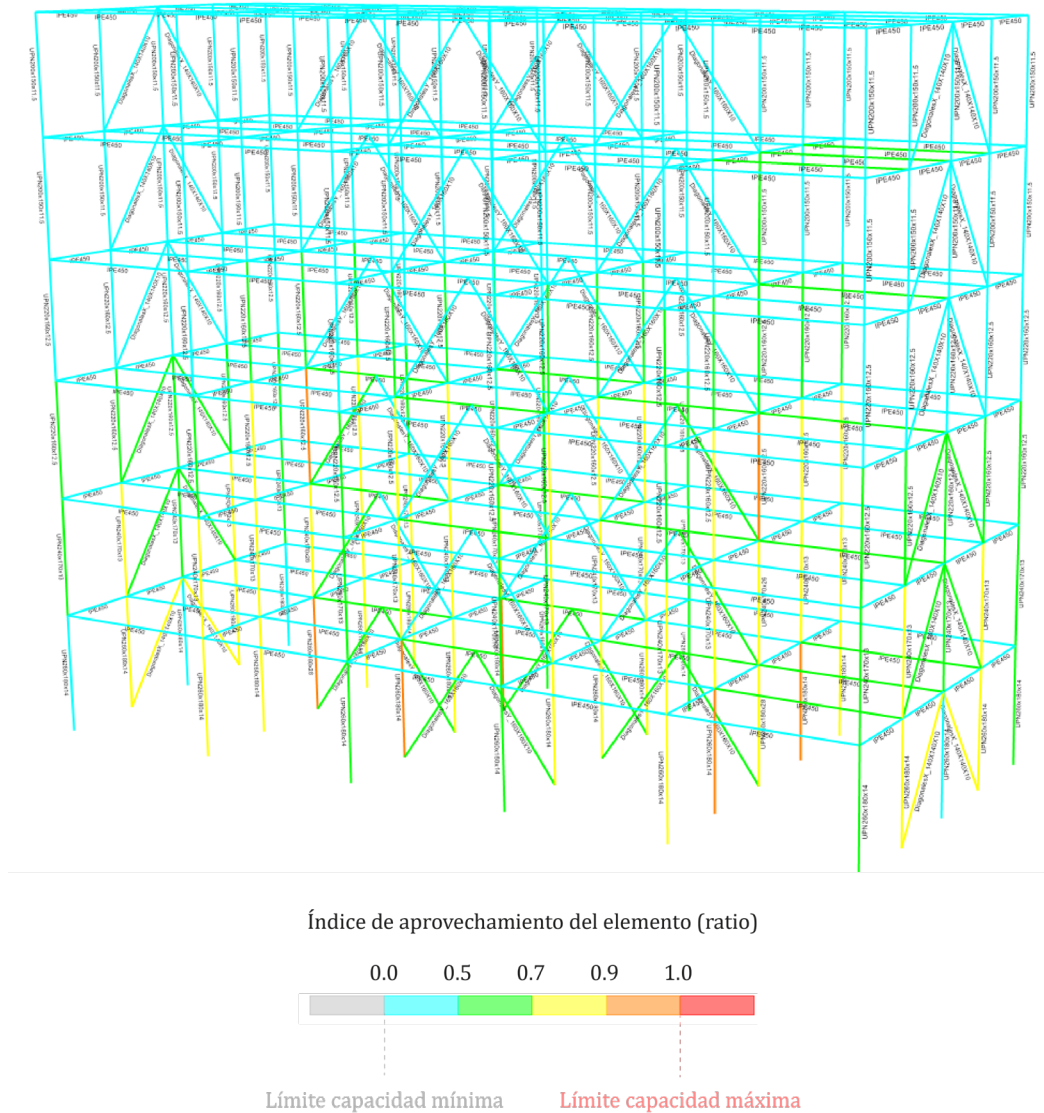


Figura 57. Resultados obtenidos tras el análisis de acciones de la edificación para Mod1, tras aplicar *retrofitting*, considerando las normativas y códigos técnicos vigentes en 2024 con el edificio situado en Los Barrios: NCSE-02, DB SE AE y CE. Edificio modelado utilizando ABM-indoor. Escenario ER3.

Una vez se dispone del modelo del edificio calibrado, se procede a la estimación del riesgo sísmico. Se ha realizado un análisis dinámico no lineal utilizando el mismo acelerograma sintético aplicado en el apartado 5.2.2 (**Figura 47**) La **Figura 58** muestra los resultados de daño obtenidos para el edificio Mod1 obtenido de forma semiautomática, habiendo sido reforzado y considerando las normativas y códigos técnicos de construcción vigentes en 2024 para la región de estudio (Los Barrios). Por un lado, se observa la presencia de daño leve (puntos verdes) en algunas de las diagonales que fueron objeto del proceso de *retrofitting*. Este daño leve puede manifestarse en forma de grietas o deformaciones que

no afectan la integridad estructural del edificio. Por otro lado, se aprecia daño severo en dos soportes de uno de los laterales del edificio Mod1 (puntos rojos). Es importante prestar especial atención a estos elementos y considerar en futuros estudios la posibilidad de aplicar técnicas de retrofitting sobre los mismos ya que el daño severo supone la necesidad de prevenir el colapso de los elementos en cuestión.

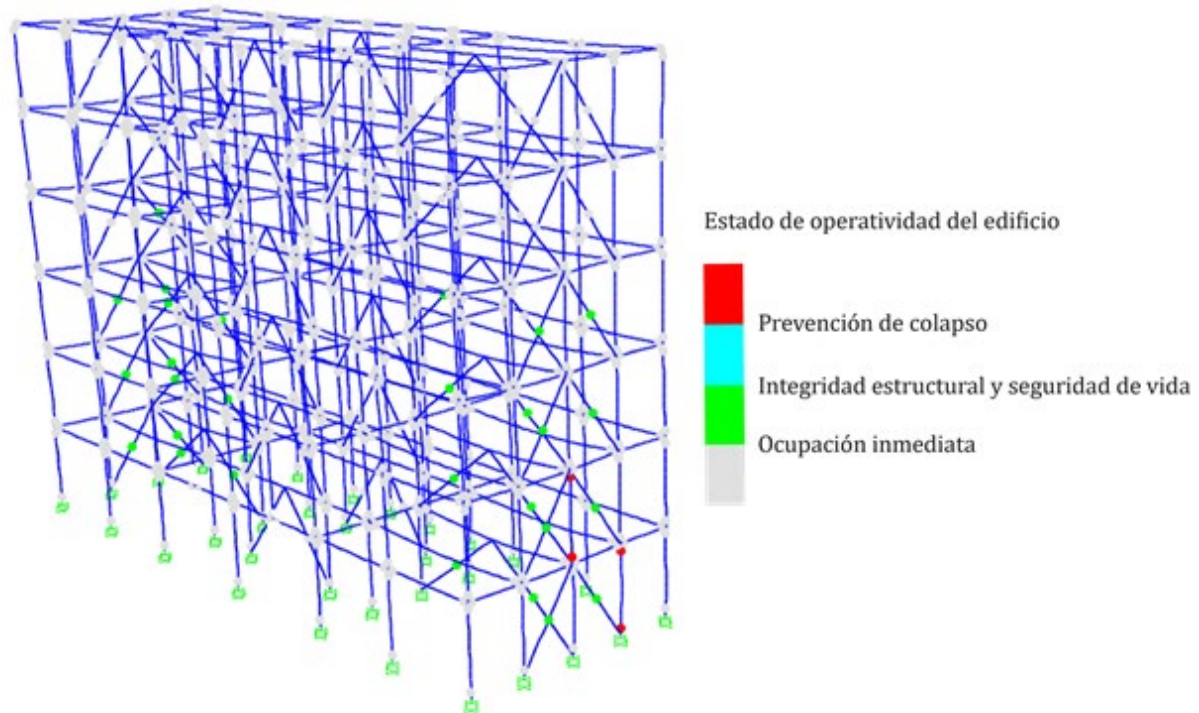


Figura 58. Resultados de daño obtenidos tras realizar el análisis dinámico no lineal para el edificio Mod1 creado aplicando ABM-indoor, habiendo sido reforzado y considerando las normativas y códigos técnicos de construcción vigentes en 2024 para la región de estudio (Los Barrios). Escenario ER3.

Esta figura viene a representar los resultados de riesgo en el escenario ER3, a partir del modelado semiautomático de edificio con la aplicación de ABM-indoor, que serían comparables con los obtenidos a partir del modelado manual, mostrados en la **Figura 48**. Como puede comprobarse, no hay grandes diferencias en los resultados con los dos tipos de modelado analizados.

6.3. Resumen y conclusiones

En resumen, los resultados obtenidos a través del análisis modal, así como la comparación con el análisis OMA, refuerzan las conclusiones establecidas para el modelo creado manualmente del edificio. Nuevamente, se recalca la importancia de considerar elementos no estructurales, detalles locales y la masa representativa en los análisis dinámicos para obtener evaluaciones precisas de la respuesta estructural.

Además, se ha observado que, para el modelo generado semiautomáticamente, ha sido necesario aplicar técnicas de *retrofitting* para mejorar su capacidad y resistencia y cumplir con los requisitos establecidos en la normativa local de construcción. Tras el proceso de refuerzo del edificio, se ha llevado a cabo la estimación de riesgo sísmico, lo que ha revelado que el edificio Mod1 sufriría daño leve y moderado ante una acción sísmica similar a la obtenida en el estudio de peligrosidad.

Es importante destacar que la principal diferencia con respecto a la aplicación presentada en el apartado 5.2 radica en el método de obtención del modelo geométrico del edificio. En el Capítulo 6, se ha implementado el algoritmo ABM-indoor, que permite obtener de manera eficiente y precisa el modelo geométrico del edificio objeto de estudio.

Los resultados del riesgo con ambos tipos de modelado son bastante similares, lo que avala la relevancia de la aplicación de técnicas avanzadas en el campo de la ingeniería estructural para mejorar la precisión y eficiencia de los procesos de modelización y evaluación de riesgos en edificaciones.

Bloque III. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Capítulo 7. CONCLUSIONES GENERALES

Capítulo 7. CONCLUSIONES GENERALES

La metodología que se ha desarrollado en la presente tesis está dividida en dos grandes bloques. El primer bloque presenta el desarrollo e implementación de una herramienta de automatización para la clasificación y creación de gemelos digitales de edificios a partir de nubes de puntos, el algoritmo ABM-indoor. Para validar y comprobar la precisión del algoritmo desarrollado se han empleado dos nubes de interiores de edificios. La aplicación, los resultados y algunas conclusiones se han presentado en el Capítulo 4 de la presente memoria.

En esta sección, se presentan las conclusiones organizadas en apartados que corresponden a los objetivos establecidos al inicio de la investigación. Esta estructura permitirá demostrar de manera clara y sistemática el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados, proporcionando una visión detallada de los logros alcanzados a lo largo del estudio.

Análisis del Estado del Arte relacionado con la aplicación de determinadas técnicas geoespaciales para generar modelos tridimensionales de edificios

En el Capítulo 2 de esta tesis se presenta un exhaustivo estado del arte. Dado el carácter multidisciplinario de esta investigación, que engloba distintos campos, ha sido imprescindible recopilar referencias sobre trabajos previos en el ámbito de las técnicas geoespaciales aplicadas a la modelización de edificios, así como en el estudio de la peligrosidad sísmica, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico. Este enfoque integral proporciona un marco completo para comprender la complejidad de los desafíos abordados en la presente investigación.

La tesis cuenta con un total de 129 referencias de diferente tipo de documento, incluyendo artículos científicos, tesis doctorales, libros, normativas, estatutos y documentos técnicos. De estas referencias, el 51% corresponden a publicaciones posteriores al año 2013, el 40% están fechadas entre 2003 y 2013, y el 9% son anteriores al año 2003. Este amplio espectro temporal refleja una exhaustiva revisión de la literatura relevante, abarcando tanto investigaciones recientes como trabajos clásicos.

Finalmente, es importante señalar que gran parte de las referencias utilizadas en esta investigación están también incluidas en los artículos científicos publicados por la doctoranda en el desarrollo de la tesis. Estos artículos han sido sometidos a revisión por pares, lo que les confiere un alto grado de credibilidad y validez en el ámbito académico. De este modo, las referencias seleccionadas constituyen un compendio de conocimientos

validados por expertos externos al presente trabajo de investigación, consolidando así su robustez y relevancia en el contexto del estudio.

Desarrollar algoritmos que permitan la modelización automática de edificios a partir de nubes de puntos

Se ha desarrollado ABM-indoor como herramienta para la clasificación y modelización automática de nubes de puntos. El algoritmo desarrollado crea superficies 3D en un formato vectorial para elementos planares (suelos, techos, soportes y paredes) y en formato TIN para elementos no planares (elementos de contenido). En comparación con trabajos anteriores que utilizan modelos digitales de edificios como herramienta de trabajo para optimizar la segmentación y modelización de nubes de puntos, la presente tesis de investigación aporta una contribución adicional a esta optimización mediante la automatización del proceso.

Se ha presentado una metodología válida para clasificación de nubes de puntos tanto de interiores como de exteriores de edificios. Este hecho, representa un complemento significativo al estado del arte actual. Según el propósito del caso de uso para un modelo 3D de un edificio, la capacidad de modelar el interior del edificio, el exterior o ambos, es muy valiosa.

El algoritmo se ha probado en dos nubes de puntos obtenidas mediante técnicas estáticas (ELS) y dinámicas (MMS). Las superficies 3D útiles obtenidas representan con precisión los suelos, techos, paredes, soportes y elementos contenidos dentro del edificio, que corresponden a escenarios realistas. Se ha verificado la precisión de la segmentación mediante el uso de matrices de confusión y de la realización de un ajuste mínimo cuadrático de los elementos planos. En algunos casos, determinados elementos segmentados están incompletos. Esto se debe a oclusiones debido a la cercanía de objetos y a la resolución del dispositivo de adquisición. Sin embargo, los resultados de la matriz de confusión sugieren que, a pesar de la inevitable no completitud de los datos, ABM-indoor ha clasificado las nubes de puntos con una precisión global superior al 90%. Además, se obtuvieron residuos bajos y los resultados de segmentación fueron favorables y consistentes con la distribución real de objetos.

ABM-indoor se limita a la modelización de elementos estructurales visibles. Por este motivo, al aplicar el algoritmo al edificio de importancia especial ETSITGC ha sido necesario desarrollar un código en Python para poder definir la localización de soportes y vigas dentro del edificio. Una limitación del código desarrollado para definir la ubicación de los soportes y las vigas es que actualmente solo funciona para edificios de planta y

alzado regulares o edificios compuestos por módulos de planta y alzado regulares, como el caso del edificio ETSITGC. Es importante resaltar que la nube de puntos del edificio que se ha utilizado en el proyecto de investigación era únicamente del exterior del mismo. Con el exterior del edificio no es posible definir mediante la nube de puntos la localización de soportes y vigas. Únicamente se pueden definir los planos exteriores que componen la envolvente del edificio.

Creación de un modelo de un edificio tanto de forma automática como manual y comparar los resultados del análisis estructural y de riesgo sísmico obtenidos en ambos modelos

Se han generado dos modelos del mismo edificio, uno de manera manual y otro de manera semiautomática mediante el uso de ABM-indoor. Ambos enfoques han arrojado resultados estructurales y de riesgo sísmico similares. Al comparar los resultados de acciones de la edificación y de riesgo obtenidos en el edificio Mod1 modelado de forma manual y de forma semiautomática, se observa que éstos son muy similares a pesar de presentar diferencias geométricas (**Figura 37** y **Figura 53** para el modelo manual y semiautomático respectivamente). Con respecto al análisis de acciones sobre la edificación, ambos modelos han requerido de la aplicación de técnicas de *retrofitting* para mejorar su capacidad a deformación y su resistencia. Las técnicas de refuerzo aplicadas han sido las mismas en ambos modelos y los resultados de resistencia y deformaciones obtenidos son muy similares (**Figura 46** y **Figura 57** para el modelo manual y semiautomático respectivamente).

Los resultados de las curvas de capacidad revelan que los datos obtenidos para el modelo semiautomático son altamente equiparables a los obtenidos para el modelo del edificio construido manualmente. Y los análisis de riesgo sísmico revelaron resultados casi idénticos, mostrando daños significativos solo en dos de los soportes evaluados. Esta similitud substancial subraya la solidez de ABM-indoor como una herramienta robusta para la creación de modelos de edificios de manera semiautomática que sirvan para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una tipología constructiva a pequeña y gran escala.

Hasta la fecha, la gran ventaja de aplicar ABM-indoor a la definición de la vulnerabilidad de edificios es que permite reducir tiempos de modelización en lo referente a la geometría del edificio. La modelización manual de la geometría del edificio ETSITGC supuso un total de 51 horas (6 jornadas laborales de 8 horas). Sin embargo, la modelización semiautomática del mismo edificio se logró en 3 horas utilizando ABM-indoor. La diferencia de tiempos de modelización es bastante elevada. Una vez definida la geometría del edificio, se han considerado las propiedades de los materiales de construcción y la

definición de los perfiles de los elementos estructurales en base a la investigación realizada en el propio edificio (**Tabla 7**). Por lo tanto, la ventaja de aplicar ABM-indoor a la definición de la vulnerabilidad se centra únicamente en el aspecto de la modelización geométrica.

Definición de un flujo de trabajo para la estimación del riesgo sísmico en edificios de importancia especial mediante el uso de un automatismo que facilite el modelado geométrico de edificios

El segundo bloque que compone la tesis doctoral plantea un flujo de trabajo para la estimación del riesgo sísmico para edificios de importancia especial. Este flujo propone el desarrollo de diferentes análisis integrados para definir correctamente la vulnerabilidad del edificio, evaluando la capacidad de resistencia y deformación del mismo. La metodología que se ha propuesto permite estimar el riesgo sísmico en caso de actualización de la normativa sísmica o en caso de que un edificio existente se quisiera construir de nuevo en una zona de peligrosidad sísmica más elevada para la cual fue construido inicialmente.

En el Capítulo 5 de la presente memoria, se ha presentado la aplicación de la metodología en referencia al segundo bloque para un edificio de importancia especial construido en Madrid y que se desea trasladar a Cádiz, una región con mayor peligrosidad para la cual fue construido el edificio inicialmente. La metodología desarrollada ha permitido definir con precisión la vulnerabilidad del edificio de estudio, su curva de capacidad y establecer regiones críticas del mismo para las cuales ha sido necesario aplicar refuerzos estructurales con el objetivo de cumplir los requisitos normativos.

Una vez se han aplicado determinadas técnicas de *retrofitting* al modelo del edificio para poder cumplir los requisitos estructurales que propone la NCSE-02, se ha sometido el edificio de estudio a un análisis de riesgo sísmico, que engloba a su vez un análisis de la peligrosidad en el emplazamiento del edificio en la nueva ubicación propuesta. El edificio se ha considerado diseñado con los criterios de la normativa en su nueva ubicación, pero expuesto al movimiento resultante del estudio de peligrosidad realizado *ad hoc*. Por un lado, se ha obtenido la curva de capacidad del edificio antes de aplicar el refuerzo estructural y otro lado, se ha desarrollado un análisis dinámico no lineal sobre el edificio reforzado.

Para llevar a cabo el análisis dinámico no lineal es necesario considerar un acelerograma que represente el movimiento sísmico esperado, resultante del estudio de peligrosidad. Para ello, se ha generado un acelerograma sintético compatible con el espectro de respuesta

obtenido en dicho estudio. El espectro de respuesta resultante, que constituye uno de los datos de entrada del análisis de riesgo sísmico, está compuesto por dos tramos (**Figura 33**). El primer tramo (hasta 0.20 s) coincide con el espectro de respuesta uniforme (UHS) para un periodo de retorno de 975 años obtenido tras la realización del estudio probabilista de peligrosidad sísmica. El segundo tramo (a partir de 0.20 s) forma parte del espectro que propone la NCSE-02 para un edificio de importancia especial y un coeficiente del terreno igual a 2. En el estudio específico de Mod1, el edificio se encuentra del lado de la seguridad, ya que el valor de aceleración asociado a los periodos fundamentales de vibración calculados coincide con el valor proporcionado por el espectro según la NCSE-02. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, si se tratara de un edificio con menos plantas, lo que implicaría periodos fundamentales de vibración más cortos (inferiores a 0.20 s), los valores de aceleración asociados serían mayores a los estipulados por NCSE-02. Los resultados obtenidos y presentados en el apartado 5.2.3 demuestran la importancia de realizar estudios de peligrosidad detallados para la zona de interés, especialmente cuando se trata de edificios de importancia especial, así como mantener actualizadas las normas sísmicas pertinentes. Esta combinación de análisis detallados de peligrosidad y normativas actualizadas es esencial para mitigar el riesgo sísmico y proteger la vida y la propiedad en áreas propensas a terremotos.

En el Capítulo 6, se aplican las metodologías propuestas en los dos capítulos anteriores. Este capítulo ha servido para validar la metodología propuesta en la presente tesis doctoral. Como edificio objeto de estudio se ha utilizado el edificio Mod1 (al igual que en el Capítulo 5). Inicialmente se modeliza el edificio de forma semiautomática, posteriormente se llevan a cabo los análisis integrados para la calibración del modelo y, finalmente, se estima el riesgo sísmico del edificio si estuviera situado en Los Barrios, Cádiz.

Los resultados de aplicar la metodología completa propuesta (Capítulo 6) por un lado, permiten concluir que el uso de ABM-indoor para la modelización geométrica de edificios es una gran herramienta para facilitar y reducir tiempos y por lo tanto costes, en los procesos de modelización y definición de la vulnerabilidad de edificios sin que exista influencia negativa sobre los resultados de riesgo sísmico. Por otro lado, se confirma la importancia de realizar estudios de peligrosidad sísmica probabilistas específicos para la región de interés, ya que permiten establecer escenarios sísmicos realistas que consideran la influencia de todas las fuentes sísmicas posibles. Además, la realización de los análisis integrados propuestos para la calibración del modelo del edificio favorece la creación de un modelo de vulnerabilidad con alto nivel de detalle y precisión que mejora los resultados de riesgo obtenidos.

Por último, en referencia a estudios de riesgo sísmico, los modelos digitales calibrados permiten generar curvas de capacidad de los edificios y estimar daños deterministas (a escala edificio). Si se extrapola la metodología de estimación de vulnerabilidad y riesgo a varios edificios de una misma tipología constructiva, se podrían obtener tantas curvas de capacidad específicas para estas tipologías como edificios considerados. Estas curvas de capacidad garantizarían resultados precisos y realistas que podrían ser de gran utilidad para la evaluación del riesgo sísmico en áreas urbanas extensas.

Adquisición de habilidades fundamentales para la difusión de la investigación tanto en el ámbito académico como en el empresarial

Durante el desarrollo de la investigación la doctoranda ha adquirido competencias sólidas en la difusión de resultados, tanto en contextos académicos como empresariales, respaldadas por diversas actividades: la participación en congresos de alcance nacional e internacional, la publicación de artículos en revistas indexadas y el reconocimiento a través de premios en concursos académicos y empresariales, como el simposio de la UPM y el concurso de UPM Innovatech. Estas experiencias han fortalecido la capacidad para comunicar eficazmente los hallazgos de la investigación, tanto a la comunidad científica como a los sectores empresariales interesados, consolidando así un perfil versátil y competitivo en el ámbito académico y profesional.

Las publicaciones, participaciones en congresos y premios adquiridos en el desarrollo de la tesis se han recopilado en el Anexo III y Anexo IV respectivamente, para facilitar su acceso y consulta.

Capítulo 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Capítulo 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación abordada en la presente tesis doctoral integra ámbitos de investigación muy variados. Por un lado, se relaciona estrechamente con técnicas geoespaciales aplicadas a la modelización de edificios mediante nubes de puntos, lo cual implica el desarrollo y la implementación de algoritmos para la clasificación y creación de gemelos digitales de edificios. Por otro lado, abarca todo lo relacionado con las estimaciones de riesgo sísmico, lo cual implica la aplicación de análisis integrados para definir la vulnerabilidad de los edificios y evaluar su capacidad de resistencia frente a eventos sísmicos. Esta combinación de enfoques multidisciplinarios permite abordar de manera integral los desafíos asociados con la mitigación del riesgo sísmico en entornos urbanos y edificaciones de importancia especial.

Durante el desarrollo de la tesis, se han detectado líneas que permiten continuar investigando, desarrollando y perfeccionando las propuestas existentes. A continuación, se enumeran algunos de los aspectos que podrían resultar especialmente interesantes para futuras investigaciones en este campo.

Se planea trabajar en la exportación de los archivos generados mediante la modelización automática al formato IFC, ya que constituye la especificación estándar de datos para compartir información en el ámbito del BIM. Esta iniciativa busca mejorar la interoperabilidad de los resultados obtenidos a través de ABM-indoor, permitiendo que sean accesibles y utilizables en diversos contextos y aplicaciones relacionadas con el diseño, la construcción y la gestión de edificaciones.

Como se ha mencionado en las conclusiones, ABM-indoor actualmente modeliza elementos planares como suelos, techos, paredes y soportes, así como elementos no planares como elementos de contenido. Sin embargo, actualmente se está trabajando para mejorar la capacidad del algoritmo. Esto incluye la consideración de tres aspectos importantes: en primer lugar, la inclusión de soportes que no son estrictamente verticales, lo que permite modelar soportes deformados, un efecto común después de un terremoto; en segundo lugar, la capacidad para modelar paredes curvas, lo cual es relevante en estructuras arquitectónicas contemporáneas o en patrimonio histórico; y en tercer lugar, la posibilidad de modelar techos esféricos, lo cual es fundamental para representar con precisión la geometría de ciertos tipos de edificaciones. Estos avances ampliarán significativamente la versatilidad y la aplicabilidad de ABM-indoor en una variedad de contextos arquitectónicos y estructurales.

El algoritmo solo considera la información geométrica de la nube de puntos y no utiliza información radiométrica. Metodologías anteriormente publicadas utilizaron el color de la nube de puntos para asociar materiales de construcción a los elementos expuestos. Por lo tanto, en trabajos futuros, se pretende identificar tal característica para elementos expuestos de edificios pintados o revestidos.

ABM-indoor se centra en la modelización de elementos estructurales visibles, tales como suelos, techos, paredes y soportes que son claramente distinguibles en las nubes de puntos. A pesar de esto, para comprender completamente la vulnerabilidad de un edificio, es altamente beneficioso modelizar estos elementos no visibles. En la presente tesis doctoral se ha desarrollado un código en Python para subsanar esta limitación. Como línea futura de investigación, se propone una forma alternativa de inferir las dimensiones y materiales de los perfiles de los elementos estructurales y no estructurales que componen el edificio. Esta alternativa consiste en establecer una metodología precisa para inferir dimensiones y materiales en base al año de construcción del edificio y su relación con las técnicas constructivas empleadas en esa época. Este enfoque proporcionaría una estimación razonable de las características de los elementos estructurales no visibles.

La definición precisa del riesgo de un edificio, en particular si se trata de un edificio de importancia especial, se logra mejor mediante la aplicación de curvas de fragilidad estimadas específicamente para el edificio de estudio. Al trabajar con estructuras específicas, es preferible utilizar curvas de fragilidad basadas en datos y estudios locales que reflejen las condiciones y propiedades particulares de la región y del tipo de construcción en consideración. Sin embargo, en la práctica, obtener datos y estudios locales para cada edificio puede ser extremadamente complicado y costoso. Por este motivo, como línea futura de trabajo se plantea aplicar la metodología propuesta en esta tesis a edificios de una misma tipología estructural en una región más extensa. De esta forma, se podría validar la metodología presentada al extrapolarla de la aplicación de un solo edificio a varios edificios. Esta aproximación permite obtener resultados más generalizables y aplicables a un conjunto más amplio de edificaciones, lo que facilita la evaluación del riesgo sísmico en una escala más regional o incluso nacional.

Una vez obtenidos los resultados y análisis detallados de uno de los módulos del edificio ETSITGC, se propone como línea futura de investigación la extensión de este estudio al resto de la estructura. La información recopilada y las consideraciones tomadas durante el análisis del módulo inicial se convertirán en fundamentos sólidos para abordar la evaluación sísmica de las demás secciones del edificio. Esta aproximación paso a paso permite una comprensión gradual y completa del comportamiento sísmico del edificio en su conjunto y de los efectos de interacción entre módulos, aprovechando las lecciones

aprendidas en el análisis detallado de cada módulo para informar decisiones futuras en términos de diseño y reforzamiento estructural. La continuidad de esta investigación asegurará una evaluación exhaustiva y rigurosa del riesgo sísmico en el edificio estudiado.

Por último, la metodología propuesta ha sido aplicada y validada en un edificio de importancia especial, mostrando resultados positivos que respaldan su viabilidad y eficacia. Estos resultados sugieren que la metodología podría extrapolarse a estudios a mayor escala, abarcando un mayor número de edificios e incluso una región más extensa, como una ciudad entera. Si se dispone de nubes de puntos de una región más amplia, sería factible aplicar la metodología de modelización semiautomática y, posteriormente, el análisis para la calibración de los modelos de edificios. Esto permitiría obtener un modelo digital calibrado de toda la región de estudio. Los gemelos digitales a gran escala podrían emplearse en la estimación de daños y pérdidas frente a diferentes riesgos, como terremotos, inundaciones, incendios, etc. Además, proporcionarían un inventario detallado de la región de estudio, permitiendo comprender en profundidad su vulnerabilidad y exposición. En resumen, el modelo digital a gran escala comprendería una base de datos de gran valor para diversas aplicaciones relacionadas con la gestión del riesgo y la planificación urbana, entre otros.

Bloque IV. BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., y Kamai, R. (2013). Update of the AS08 Ground-Motion. Prediction equations based on the NGA-west2 data set. *Pacific Engineering Research Center Report* (Mayo).
- Akkar, S., y Sandikkaya, M. A., Bommer, J. J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81 (2), 195-206. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.2.195>
- Álvarez-Gómez, J. A., Aniel-Quiroga, Í., González, M., Olabarrieta, M., y Carreño, E. (2011). Scenarios for earthquake-generated tsunamis on a complex tectonic area of diffuse deformation and low velocity: The Alboran Sea, Western Mediterranean. *Marine Geology*, 284(1-4), 55-73. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.03.008>
- Ambraseys, N. N., y Bommer, J. J. (1995). Attenuation relations for use in Europe: An overview. *European Seismic Design Practice*, February, 67-74. <https://doi.org/10.1201/9780203756492-11>
- American Institute of Architects. (2013). Project Building Information Modeling Protocol Form (Free sample). <https://www.aiacontracts.org/contract-documents/19016-project-bim-protocol> (último acceso: marzo 2024)
- American Society of Civil Engineers (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building. Federal Emergency Management Agency.
- Angelini, M. G., Baiocchi, V., Costantino, D., y Garzia, F. (2017). Scan to BIM for 3D reconstruction of the papal basilica of saint Francis in Assisi In Italy. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(5W1), 47-54. <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-5-W1-47-2017>
- Applied Technology Council (2018). Seismic performance assessment of buildings. Volumen 1 - Methodology. *Applied Technology Council P-58-1* (Vol. 1, Número December, p. 340).
- Applied Technology Council (2005). FEMA 440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (ATC-55 project). *Applied Technology Council*.
- Applied Technology Council (1996). ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. *Applied Technology Council*.
- Applied Technology Council (1985). ATC-13. Earthquake damage evaluation data for California. *Applied Technology Council*.
- Arana, I., Jaren, C., Arana, A., y Arazuri, S. (2001). Pruebas diagnósticas en la clasificación de productos agrícolas. Mayo.

- Aras, F. (2016). Frequency variation in construction stages and model validation for steel buildings. *Steel and Composite Structures*, 22(3), 647-662. <https://doi.org/10.12989/scs.2016.22.3.647>
- Aras, F. y Karapınar, I. S. (2021). Dynamic properties of steel structures under different construction stages, ambient temperature and live load. *Journal of Construction*, 20(1), 163-177. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.1.163>
- Arranz, J. J. (2013). *Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial* (Tesis doctoral) [Universidad Politécnica de Madrid]. <http://oa.upm.es/15056/> (último acceso: marzo 2024)
- Baker, J. W. (2008). An introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). *Baker research group*, 1-72. [http://www.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_\(2008\)_Intro_to_PSHA_v1_3.pdf](http://www.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker_(2008)_Intro_to_PSHA_v1_3.pdf)
- Barbat, A. H., Carreño, M. L., Pujades, L. G., Lantada, N., Cardona, O. D., y Marulanda, M. C. (2010). Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 17-38. <https://doi.org/10.1080/15732470802663763>
- Barghi, M., y Azadbakht, M. (2011). Evaluating the effect of masonry infills on natural period of buildings with moment-resisting frame. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, *Struct. De*(20), 649-660. <https://doi.org/DOI: 10.1002/tal.540>
- Bazzurro, P., y Cornell, C. A. (1999). Disaggregation of seismic hazard. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(2), 501-520. <https://doi.org/10.1785/bssa0890020501>
- Bazzurro, P., y Cornell, C. A. (2004). Nonlinear soil-site effects in probabilistic seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6), 2110-2123. <https://doi.org/10.1785/0120030216>
- Bernreuter, D. L. (1992). Determining the Controlling Earthquake from probabilistic hazards for the proposed Appendix A. *Twentieth Water Reactor Safety Information Meeting*. Bethesda, Maryland
- Bertero, S., Tarazaga, P. A., y Sarlo, R. (2022). In situ seismic testing for experimental modal analysis of civil structures. *Engineering Structures*, 270(July 2021), 114773. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114773>
- Bewick, V., Cheek, L., y Ball, J. (2004). Statistics review 13: Receiver operating characteristics curves. *Critical Care*, 8(6), 508-512. <https://doi.org/10.1186/cc3000>
- Biagini, C., y Ottobri, P. (2019). Federated Parametric Models for Seismic Risk Analysis in Existing Buildings. *Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 809, 2163-2166. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-95588-9_193

- Borcherdt R.D. (1970). Effects of Local Geology on Ground Motion Near San Francisco Rbay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), 29-61.
- Bosché, F. (2010). Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. *Advanced Engineering Informatics*, 24, 107-118. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2009.08.006>
- Budnitz, R. J., Apostolakis, G., Boore, D. M., Cluff, L. S., Coppersmith, K. J., Cornell, C. a., y Morris, P. a. (1997). Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis : Guidance on Uncertainty and Use of Experts. NUREG/CR-6372, UCRL-ID- 122160. *Power*, 1, 998-1006.
- Cabañas, L., Rivas-Medina, A., Martínez-Solares, J. M., Gaspar-Escribano, J. M., Benito, B., Antón, R., y Ruiz-Barajas, S. (2015). Relationships Between M_w and Other Earthquake Size Parameters in the Spanish IGN Seismic Catalog. *Pure and Applied Geophysics*, 172(9), 2397-2410. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1025-2>
- Campbell, K. W., y Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1114. <https://doi.org/10.1193/062913EQS175M>
- Castellaro, S. (2016). Soil and structure damping from single station measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.08.005>
- Castellaro, S., Perricone, L., Bartolomei, M., e Isani, S. (2017). Dynamic Characterization of the Eiffel Tower. *Procedia Engineering*, 199, 3332-3337. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.461>
- Cavendish, J. C., Field, D. A., y Frey, W. H. (1985). An approach to automatic three-dimensional finite element mesh generation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 21(2), 329-347. <https://doi.org/10.1002/nme.1620210210>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2016). *Poverty and death: Disaster mortality 1996–2015*. <https://www.undrr.org/publication/poverty-death-disaster-mortality-1996-2015>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2017). Economic Losses, Poverty & Disasters (1998 - 2017). <https://www.cred.be/unisdr-and-cred-report-economic-losses-poverty-disasters-1998-2017>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2023). 2022 Disasters in numbers. https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf
- Cerri, M. (2018). *Multivariable flood damage modelling for residential buildings using open data with random forests* (Tesis de máster). Technical University of Munich.
- Che, E., Jung, J., y Olsen, M. J. (2019). Object recognition, segmentation, and classification of mobile laser scanning point clouds: A state of the art review. *Sensors (Switzerland)*, 19(4). <https://doi.org/10.3390/s19040810>

- Che, E., y Olsen, M. J. (2017). Fast edge detection and segmentation of terrestrial laser scans Through normal variation analysis. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2W4), 51-57. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-51-2017>
- Che, E., y Olsen, M. J. (2018). Multi-scan segmentation of terrestrial laser scanning data based on normal variation analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 143, 233-248. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.01.019>
- Chen, K., Lu, W., Xue, F., Tang, P., y Li, L. H. (2018). Automatic building information model reconstruction in high-density urban areas: Augmenting multi-source data with architectural knowledge. *Automation in Construction*, 93(March), 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.009>
- Chiou, B. S. J., y Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153. <https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583-1606. <https://doi.org/10.1785/bssa0580051583>
- Coughlan, J. M., y Yuille, A. L. (1999). Manhattan World: Compass direction from a single image by Bayesian inference. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2, 941-947. <https://doi.org/10.1109/iccv.1999.790349>
- D'Angelo, L., Hajdukiewicz, M., Seri, F., y Keane, M. M. (2022). A novel BIM-based process workflow for building retrofit. *Journal of Building Engineering*, 50(February), 104163. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104163>
- Deierlein, Gregory G., Reinhorn, Andrei M., y Willford, M. R. (2010). Nonlinear structural analysis for seismic design. *NEHRP Seismic Design Technical Brief* (4)
- Derakhshan, S., Cutter, S. L., y Wang, C. (2020). Remote sensing derived indices for tracking urban land surface change in case of earthquake recovery. *Remote Sensing*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/rs12050895>
- Di Sarno, L., y Elnashai, A. S. (2009). Bracing systems for seismic retrofitting of steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 452-465. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.02.013>
- Díaz, C. A., Quintana, G. R., y Vogel, E. H. (2012). Síntomas de depresión, ansiedad y estrés post-traumático en adolescentes siete meses después del terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile. *Terapia Psicológica*, 30(1), 37-43. <https://doi.org/10.4067/0718-48082012000100004>

- Digi21. (2024). *MDTopX*. <https://www.digi21.net/>
- Egea Jiménez, C., Iván, J., y Suescún, S. (2011). Los desplazados ambientales, más allá del cambio climático. Un debate abierto. *Cuadernos Geográficos*, núm. 49, 201-215. <http://www.redalyc.org/pdf/171/17122051008.pdf>
- Estêvão, J. M. C., y Esteves, C. (2020). Nonlinear seismic analysis of existing RC school buildings: The “P3” school typology. *Buildings*, 10(11), 1-16. <https://doi.org/10.3390/buildings10110210>
- European Committee For Standardization (2004). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings*.
- European committee for standarization (2005). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*.
- Fajfar Peter, G. P. (1996). The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 25, 31-46.
- Federal Emergency Management Agency (2022a). *Hazus 5.1. Earthquake Model. User Guidance*. April, 262.
- Federal Emergency Management Agency (2022b). *Hazus 5.1 Earthquake Model. Technical Manual*. July, 467
- Federal Emergency Management Agency (2012). *Multi-Hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model: Hazus-MH 2.1 User Manual*. 863.
- Fischler, M. A., y Bolles, R. C. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/358669.358692>
- Freeman, S. A. (1998). The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design. *11th European conference on earthquake engineering*, 6-11.
- García-Mayordomo, J. (2015). *Creación de un modelo de zonas sismogénicas para el cálculo del mapa de peligrosidad sísmica de España* (Instituto Geológico y Minero de España (ed.); En línea). https://www.igme.es/publicaciones/Home/Publicaciones_Gratuitas
- Gardner, J. K., y Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363-1367. <https://doi.org/10.1785/bssa0640051363>
- Grünthal, G., y Lorenzo Martín, F. (2009). *Escala Macrosísmica Europea 1998 EMS-98*. 1-99. <https://doi.org/10.2312/EMS-98.full.es>

- Gutenberg, B., y Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185-188. <https://doi.org/10.1785/bssa0340040185>
- Hamdache M., Peláez J.A., Talbi A., y López Casado, C. (2010). A unified catalog of main earthquakes for northern algeria from a.d. 856 to 2008. *Seismological Research Letters*, 81(5), 732-739. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.5.732>
- Hanks, T. C., y Kanamori, H. (1979). *A Moment Magnitude Scale*. 84(9), 2348-2350.
- Hu, J., Wen, W., Zhai, C., Pei, S., y Ji, D. (2023). Seismic resilience assessment of buildings considering the effects of mainshock and multiple aftershocks. *Journal of Building Engineering*, 68(January), 106110. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106110>
- Hwang, H., y Huo, J. R. (1997). Attenuation relations of ground motion for rock and soil sites in eastern United States. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(6), 363-372. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(97\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(97)00016-X)
- Instituto Geográfico Nacional y Universidad Politécnica de Madrid (2013). Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España 2012. *Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)*
- Instituto Geológico y Minero de España (2015). *QAFI v.3: Quaternary Faults Database of Iberia*. <http://info.igme.es/QAFI>
- Instituto Geológico y Minero de España y ENRESA.(1998). *Mapa Neotectónico de España a escala 1:1.000.000*. <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/mapa.aspx?parent=../tematica/tematicossingulares.aspx&Id=22&language=es>
- Insua-Arévalo, J. M. (2008). *Neotectónica y tectónica activa de la cuenca de Málaga (Cordillera Bética Occidental)* [Universidad Complutense de Madrid]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=2992364>
- Insua-Arévalo, J. M., Martínez-Díaz, J. J., García-Mayordomo, J., y Martín-González, F. (2012). Active tectonics in the Malaga Basin: evidences from morphotectonic markers (Western Betic Cordillera, Spain). *Journal of Iberian Geology*, 38(1), 175-190. https://doi.org/10.5209/rev_jige.2012.v38.n1.39212
- Isenburg, M., Liu, Y., Shewchuk, J., y Snoeyink, J. (2006). Streaming computation of Delaunay triangulations. *ACM Transactions on Graphics*, 25, 1049-1056. <https://doi.org/10.1145/1179352.1141992>
- Isobe, T., D. Feigelson, E., Akritas, M. G., y Babu, G. J. (1990). Linear regression in astronomy. Part 1. *The Astrophysical Journal*, 364, 104-113. <https://doi.org/10.1086/169390>
- Jiménez Martínez, M., Jiménez Martínez, M., y Romero-Jarén, R. (2020). How resilient is the labour market against natural disaster? Evaluating the effects from the 2010 earthquake in Chile. *Natural Hazards*, 104(2), 1481-1533.

<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04229-9>

Jung, J., Hong, S., Jeong, S., Kim, S., Cho, H., Hong, S., y Heo, J. (2014).

Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures. *Automation in Construction*, 42, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.021>

Kijko, A. (2011). *Seismic Hazard* (Vol. 96, pp. 1107-1121). Gupta, H.K. (eds) Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1029/168GM02.Song>

Kim, S., y D'Amore, E. (1999). Push-over analysis procedure in earthquake engineering. En *Earthquake Spectra* (Vol. 15, Número 3, pp. 417-434). <https://doi.org/10.1193/1.1586051>

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering mechanics series.

Lagomarsino, S., y Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 415-443. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9024-z>

Leggieri, V., Mastrodonato, G., y Uva, G. (2022). GIS Multisource Data for the Seismic Vulnerability Assessment of Buildings at the Urban Scale. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050523>

Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., y Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55, 889-902. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>

Macher, H., Landes, T., y Grussenmeyer, P. (2017). From point clouds to building information models: 3D semi-automatic reconstruction of indoors of existing buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(10), 1-30. <https://doi.org/10.3390/app7101030>

Mahin, S. (2012). *Lessons from Recent Earthquakes : The Need for More Resilient Cities*. 31-42.

Mahmoudabadi, H., Olsen, M. J., y Todorovic, S. (2017). Detecting sudden moving objects in a series of digital images with different exposure times. *Computer Vision and Image Understanding*, 158, 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2017.01.004>

Mandrekar, J. N. (2010). Receiver operating characteristic curve in diagnostic test assessment. *Journal of Thoracic Oncology*, 5(9), 1315-1316. <https://doi.org/10.1097/JTO.0b013e3181ec173d>

Martínez Solares, J. M., y Mezcua Rodríguez, J. (2002). *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C.-1990)* (Ministerio de Fomento. Gobierno de España (ed.)). Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. 84-95.172-37-2

Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2009a). Documento Básico SE-AE Seguridad

- Estructural. Acciones en la Edificación. *Código Técnico de la Edificación*, 1-42. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-AE.pdf>
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2009b). *Norma de construcción sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820200.pdf
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2012) Instrucción de Acero Estructura
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España (2019). Documento Básico SE. Seguridad estructural. *Código Técnico de la Edificación*, 1-39.
- Ministerio de la Vivienda (1963) Norma MV 101-1962 de Acciones en la Edificación, Decreto 195/1963, de 17 de enero, 2207 (1963).
- Ministerio de la Vivienda (1973) Norma Básica MV 103-1972, Cálculo de las estructuras de acero laminado en edificación, 13037 (1973). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1973-59923
- Ministerio de Planificación del Desarrollo (1974) Norma sismorresistente P.D.S.-1, Decreto 3209/1974, de 30 de agosto, 23585 (1974). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1974-1869>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana Código Estructural, 1789 (2021). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-13681
- Monge, O., Alexoudi, M., y Argyroudis, S. (2004). *RISK-UE - WP6: Vulnerability assessment of lifelines and essential facilities: basic methodological handbook. February*.
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P., y R.-U. (2004). The European Risk-Ue Project : an Advanced Approach To Earthquake Risk Scenarios. *13th World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake*, 14.
- Mura, C., Mattausch, O., y Pajarola, R. (2016). Piecewise-planar Reconstruction of Multi-room Interiors with Arbitrary Wall Arrangements. *Computer Graphics Forum*, 35(7), 179-188. <https://doi.org/10.1111/cgf.13015>
- Navas-Sánchez, L., y Cervera Bravo, J. (2022). A theory-based simplified trilinear model for characterisation of the out-of-plane behaviour of URM walls. *Engineering Structures*, 259(March), 114058. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114058>
- Nurunnabi, A., Belton, D., y West, G. (2012). Robust segmentation in laser scanning 3D point cloud data. *2012 International Conference on Digital Image Computing Techniques and Applications, DICTA 2012*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/DICTA.2012.6411672>
- Ochmann, S., Vock, R., Wessel, R., y Klein, R. (2016). Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 54, 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.07.008>
- Ochmann, S., Vock, R., Wessel, R., Tamke, M., y Klein, R. (2014). Automatic generation of structural building descriptions from 3D point cloud scans. *GRAPP 2014 - Proceedings*

- of the 9th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications, 120-127. <https://doi.org/10.5220/0004689601200127>
- Orts-escolano, S., y Cazorla, M. (2013). Point Cloud Data Filtering and Downsampling using Growing Neural Gas. *International Joint Conference on Neural Networks*, 60-67. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2013.6706719>
- Perrone, D., y Filiatrault, A. (2017). Automated seismic design of non-structural elements with building information modelling. *Automation in Construction*, 84(June), 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.002>
- Poland, C. D., y Mitchell, A. D. (2007). A new seismic rehabilitation standard - ASCE/SEI 41-06. *New Horizons and Better Practices*, 1-2. [https://doi.org/10.1061/40946\(248\)35](https://doi.org/10.1061/40946(248)35)
- Popa, G. N. (2016). Simulation and Experimental Analysis of Non-Linear Loads. *PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 1(May), 2106-2113.
- Prati, D., Badini, L., Mochi, G., Castellaro, S., y Ferrante, A. (2020). Passive single-station techniques applied for dynamic characterization of reinforced concrete buildings. *Rivista Tema, Vol.6 (202(N. 1))*. <https://doi.org/10.30682/tema0601b>
- Pučko, Z., Šuman, N., y Rebolj, D. (2018). Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans. *Advanced Engineering Informatics*, 38(October), 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.06.001>
- Quirós H., L. E. (2017). *Modelizaciones y análisis de sensibilidad en la evaluación integral del riesgo sísmico a escala urbana. Aplicación a la ciudad de Lorca*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rabbani, T., Heuvel, F. A., y Vosselmann, G. (2006). Segmentation of point clouds using smoothness constraint. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 248-253. https://www.researchgate.net/publication/228340970_Segmentation_of_point_clouds_using_smoothness_constraint (last access: january 2020)
- Romero-Jarén, R.; Arranz, J. . (2021). Automatic segmentation and classification of BIM elements from point clouds. *Automation in Construction*, 124(103576). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103576>
- Romero-Jarén, R., Arranz, J. J., Navas-Sánchez, L., Erduran, E., Martínez-Cuevas, S., y Benito, B. (2021). Automatic segmentation of point clouds in the architecture environment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B2-2021), 215-221.
- Ruíz, S., Cantero, A., Rivas Medina, A., Gaspar Escribano, Jo. M. y Oterino, B., (2012). Desarrollo de un modelo de movimiento fuerte utilizando datos acelerométricos españoles y contraste de otros modelos mediante análisis estadístico de residuos con datos locales. *7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 1-2.

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-215-2021>

- Romero-Jarén, R., Benito, B., y Arranz, J. J. (2019). *Testing and Application of Geospatial Techniques in Seismic Engineering*. 1, 23. <https://doi.org/10.3390/proceedings2019019023>
- Ruiz-Barajas, S., Sharma, N., Convertito, V., Zollo, A., y Benito, B. (2017). Temporal evolution of a seismic sequence induced by a gas injection in the Eastern coast of Spain. *Scientific Reports*, 7(1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02773-2>
- Schröter, K., Lüdtke, S., Redweik, R., Meier, J., Bochow, M., Ross, L., Nagel, C., y Kyeibich, H. (2018). Flood loss estimation using 3D city models and remote sensing data. *Environmental Modelling and Software*, 105, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.032>
- Spence, R. So, E. y Scawthorn, C. (2011). *Human casualties in earthquakes: progress in modelling and mitigation* (Vol. 29, Número Advances in Natural and Technological Hazards Research). Springer International Publishing. 10.1007/978-90-481-9455-1
- Stepinac, M., y Gašparović, M. (2020). A review of emerging technologies for an assessment of safety and seismic vulnerability and damage detection of existing masonry structures. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(15). <https://doi.org/10.3390/app10155060>
- Stepp, J. C. (1972). Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. *Proc. of the 1st Int. Conf. on Microzonation*, 2(1), 897-910.
- Surmann, H., Nüchter, A., Lingemann, K., y Joachim, H. (2004). 6D SLAM - preliminary report on closing the loop in six dimensions. *IFAC Proceedings Volumes*, 197-202. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31975-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31975-4)
- Tartaglia, R., Milone, A., Prota, A., y Landolfo, R. (2022). Seismic Retrofitting of Existing Industrial Steel Buildings: A Case-Study. *Materials*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/ma15093276>
- Torres, Y., Arranz, J. J., Gaspar-Escribano, J. M., Haghi, A., Martínez-Cuevas, S., Benito, B., y Ojeda, J. C. (2019). Integration of LiDAR and multispectral images for rapid exposure and earthquake vulnerability estimation. Application in Lorca, Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 81(May), 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.015>
- United Nations Disaster Relief Co-ordinator (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis* (Julio)
- Vitiello, U., Ciotta, V., Salzano, A., Asprone, D., Manfredi, G., y Cosenza, E. (2019). BIM-based approach for the cost-optimization of seismic retrofit strategies on existing buildings. *Automation in Construction*, 98(November 2018), 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.023>

- Wang, J., Sun, W., Shou, W., Wang, X., Wu, C., Chong, H. Y., Liu, Y., y Sun, C. (2015). Integrating BIM and LiDAR for Real-Time Construction Quality Control. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 79(3-4), 417-432. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0116-8>
- Wilches-Chaux, G. (1998). Desastres, ecologismo y formación profesional: Herramientas para la crisis. En *Servicio Nacional de Aprendizaje - (SENA)* (p. 137). <https://hdl.handle.net/11404/1034>
- Xiong, X., Adan, A., Akinci, B., y Huber, D. (2013). Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31, 325-337. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.006>
- Zolanvari, S. M. I., y Laefer, D. F. (2016). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Slicing Method for curved façade and window extraction from point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 119, 334-346. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.06.011>
- Zolanvari, S. M. I., Laefer, D. F., y Natanzi, A. S. (2018). Three-dimensional building façade segmentation and opening area detection from point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 143, 134-149. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.004>

Bloque V. ANEXOS

ANEXOS

I. Resultados del ajuste de mínimos cuadrados de los elementos planos clasificados en las nubes de puntos

A continuación, se muestran dos tablas con los resultados de los AMC para los elementos planos de las dos nubes de puntos: estacionamiento (**Tabla 15**) y la oficina (**Tabla 16**).

Tabla 15: Resumen de los resultados del Ajuste de Mínimos Cuadrados clases de objeto de elementos planos en el estacionamiento. Los términos Q1, Q2 y Q3 hacen referencia al primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente.

Clase de entidad	Nº puntos	Desviación estándar (m)	Q1 (m)	Q2 (m)	Q3 (m)	Área (m ²)
Techos	2,269,224	0.024	0.010	0.000	0.010	1,060.02
	915,729	0.029	0.014	0.004	0.016	349.68
	647,129	0.031	0.016	0.004	0.014	266.42
	574,223	0.025	0.006	0.004	0.014	224.69
	457,650	0.022	0.004	0.006	0.016	206.28
Paredes en dirección X	56,085	0.012	0.007	0.002	0.005	23.95
	62,594	0.008	0.006	0.001	0.005	22.80
	73,253	0.013	0.008	0.001	0.009	31.30
	70,775	0.012	0.007	0.001	0.008	32.23
	147,305	0.018	0.013	0.003	0.010	57.82
	26,460	0.012	0.004	0.002	0.007	10.05
	22,124	0.010	0.005	0.001	0.006	10.01
	8,851	0.033	0.028	0.002	0.027	3.14
	56,800	0.010	0.005	0.000	0.007	24.10
	23,408	0.012	0.008	0.001	0.005	8.37
	6,561	0.013	0.008	0.002	0.009	3.00
	28,626	0.007	0.002	0.000	0.004	10.57
	12,747	0.018	0.012	0.001	0.012	4.38
	21,406	0.011	0.007	0.000	0.006	13.37
	9,584	0.045	0.039	0.001	0.039	3.53
7,031	0.014	0.012	0.001	0.012	2.96	
19,725	0.017	0.010	0.000	0.008	7.22	

Tabla 15 (continuación): Resumen de los resultados del Ajuste de Mínimos Cuadrados de los elementos planos en el estacionamiento. Los términos Q1, Q2 y Q3 hacen referencia al primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente.

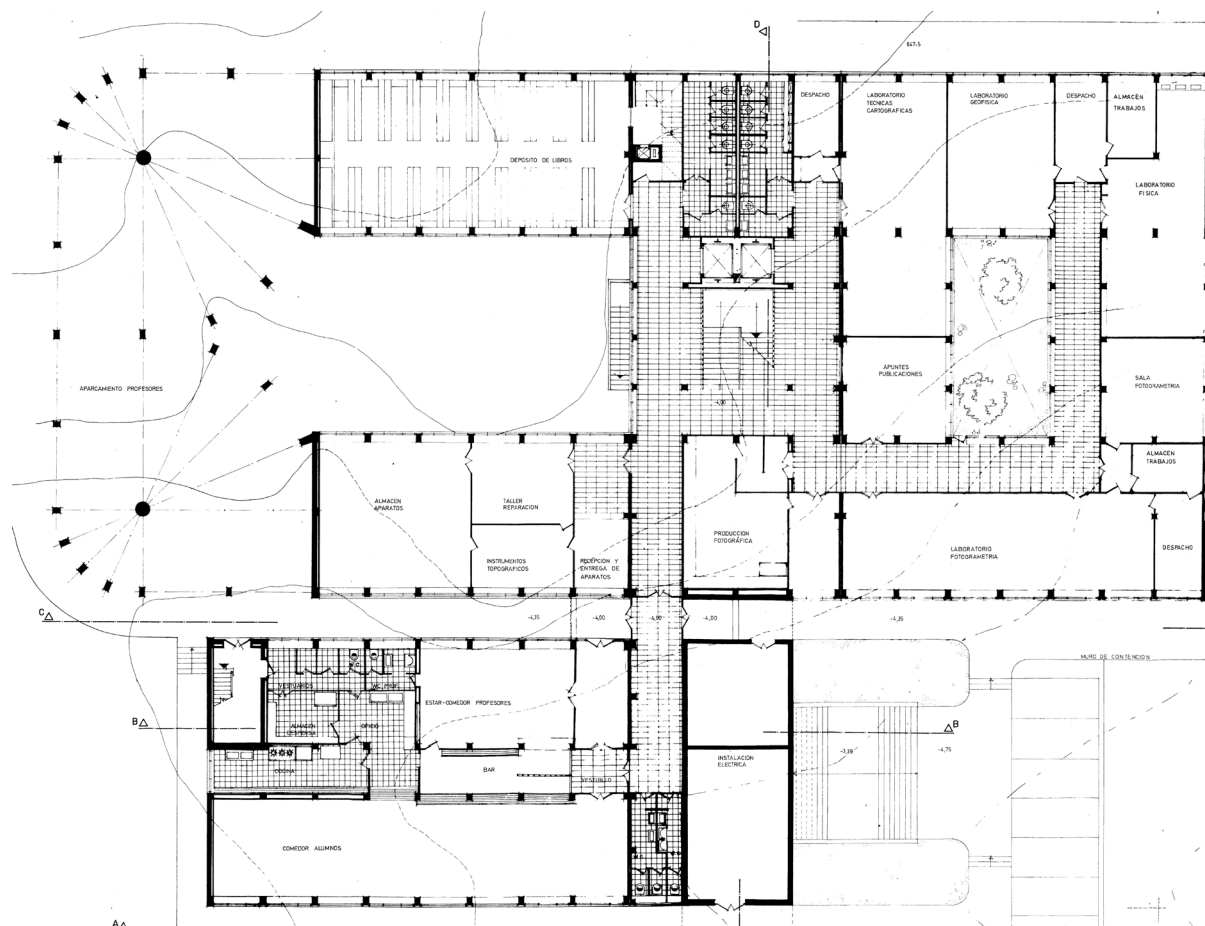
Clase de entidad	Nº puntos	Desviación estándar (m)	Q1 (m)	Q2 (m)	Q3 (m)	Área (m ²)
Paredes en dirección Y	16,482	0.007	0.004	0.001	0.004	5.17
	13,940	0.010	0.003	0.001	0.005	5.14
	14,079	0.011	0.007	0.001	0.008	8.63
	157,041	0.012	0.006	0.001	0.008	71.95
	20,601	0.007	0.004	0.000	0.004	8.11
	86,990	0.100	0.103	0.017	0.110	33.80
	12,455	0.008	0.004	0.001	0.004	4.13
	208,038	0.113	0.099	0.056	0.126	83.21
	122,058	0.012	0.005	0.001	0.006	58.29
	21,954	0.008	0.004	0.000	0.004	7.91
	16,991	0.014	0.007	0.000	0.009	6.14
	15,842	0.006	0.003	0.001	0.004	9.26
	38,183	0.010	0.006	0.000	0.005	12.91
	13,317	0.005	0.004	0.000	0.003	8.04
	30,345	0.009	0.005	0.000	0.004	9.97
	14,054	0.009	0.005	0.001	0.007	5.51
	10,439	0.013	0.007	0.001	0.002	4.22
	15,061	0.006	0.002	0.001	0.003	4.98
	8,022	0.007	0.003	0.000	0.004	2.68
7,430	0.015	0.011	0.002	0.007	3.64	

Tabla 16: Resumen de los resultados del Ajuste de Mínimos Cuadrados de los elementos planos en la oficina. Los términos Q1, Q2 y Q3 hacen referencia al primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente.

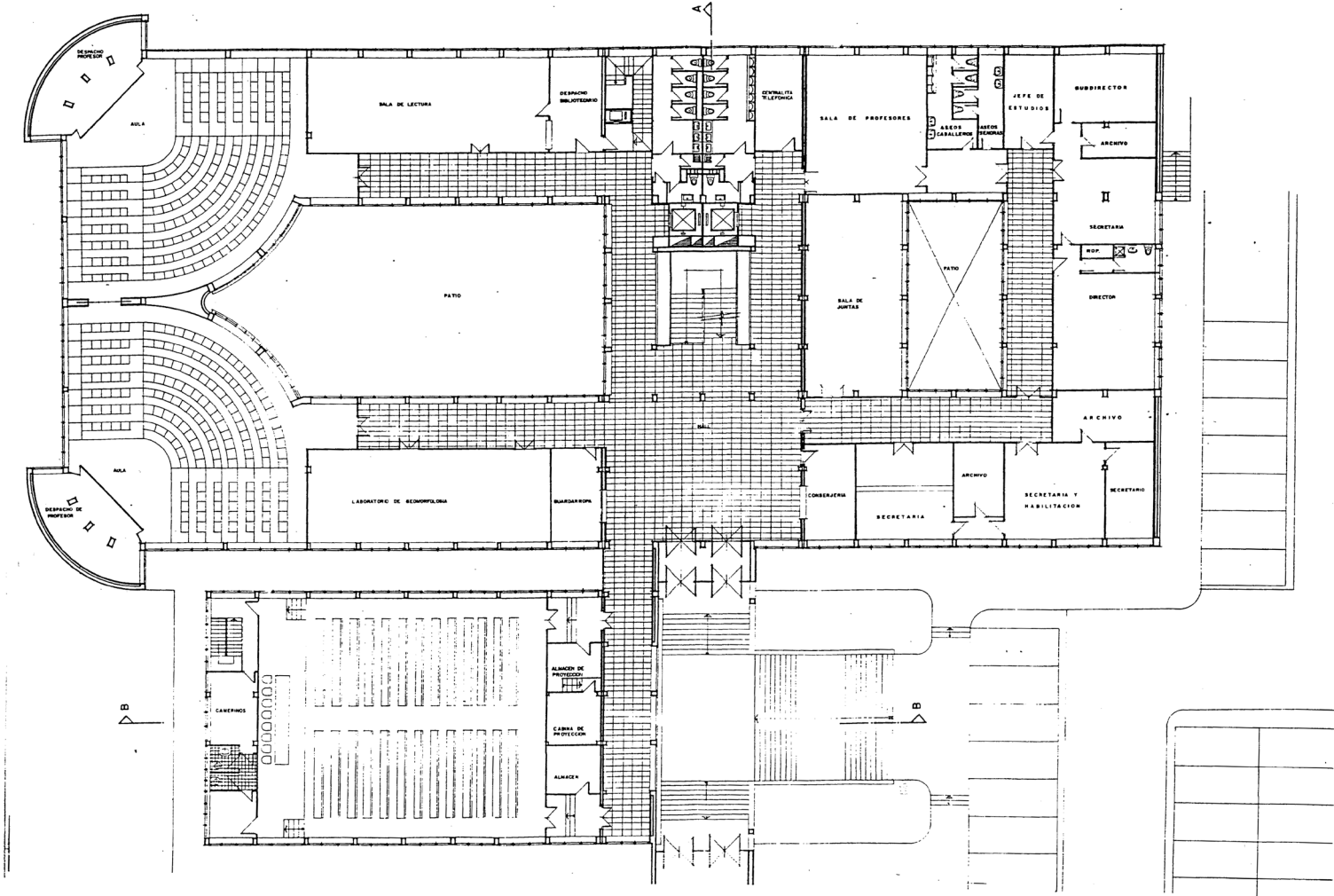
Clase de entidad	Nº puntos	Desviación estándar (m)	Q1 (m)	Q2 (m)	Q3 (m)	Área (m ²)
Techos	365,925	0.010	0.004	0.004	0.006	708.02
	784,713	0.015	0.008	0.002	0.002	823.96
Paredes en dirección X	14,330	0.010	0.004	0.001	0.005	10.44
	4,003	0.007	0.002	0.001	0.004	5.33
	3,581	0.008	0.004	0.001	0.002	5.00
	2,403	0.011	0.003	0.002	0.006	1.45
	4,111	0.009	0.003	0.000	0.004	3.69
	7,915	0.010	0.004	0.000	0.004	7.21
	10,192	0.010	0.005	0.001	0.004	6.22
	426	0.027	0.029	0.003	0.021	0.08
	5,593	0.013	0.004	0.001	0.006	3.15
	1,329	0.017	0.010	0.001	0.012	0.85
	1,703	0.008	0.002	0.001	0.004	3.87
	822	0.024	0.014	0.000	0.025	0.73
	1,205	0.006	0.003	0.000	0.002	1.85
	1,942	0.010	0.005	0.001	0.003	3.05
	2,682	0.019	0.011	0.003	0.011	2.80
1,649	0.012	0.006	0.003	0.003	2.40	
Paredes en dirección Y	80,063	0.011	0.005	0.000	0.005	48.10
	15,782	0.011	0.004	0.000	0.005	16.97
	17,378	0.018	0.015	0.004	0.017	17.47
	3,345	0.008	0.005	0.001	0.002	2.52
	1,456	0.027	0.023	0.005	0.022	0.97
	6,578	0.018	0.014	0.006	0.018	7.23
	5,945	0.009	0.006	0.001	0.006	7.09
	6,893	0.007	0.002	0.001	0.004	5.77
	3,437	0.015	0.006	0.001	0.008	5.32
	5,618	0.026	0.021	0.001	0.022	7.12
	1,916	0.014	0.006	0.000	0.007	2.14
Paredes en dirección J	39,855	0.014	0.007	0.003	0.004	29.28
	29,075	0.014	0.009	0.002	0.006	26.10
Paredes en dirección K	5,863	0.010	0.002	0.002	0.005	4.91

II. Planos arquitectónicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid

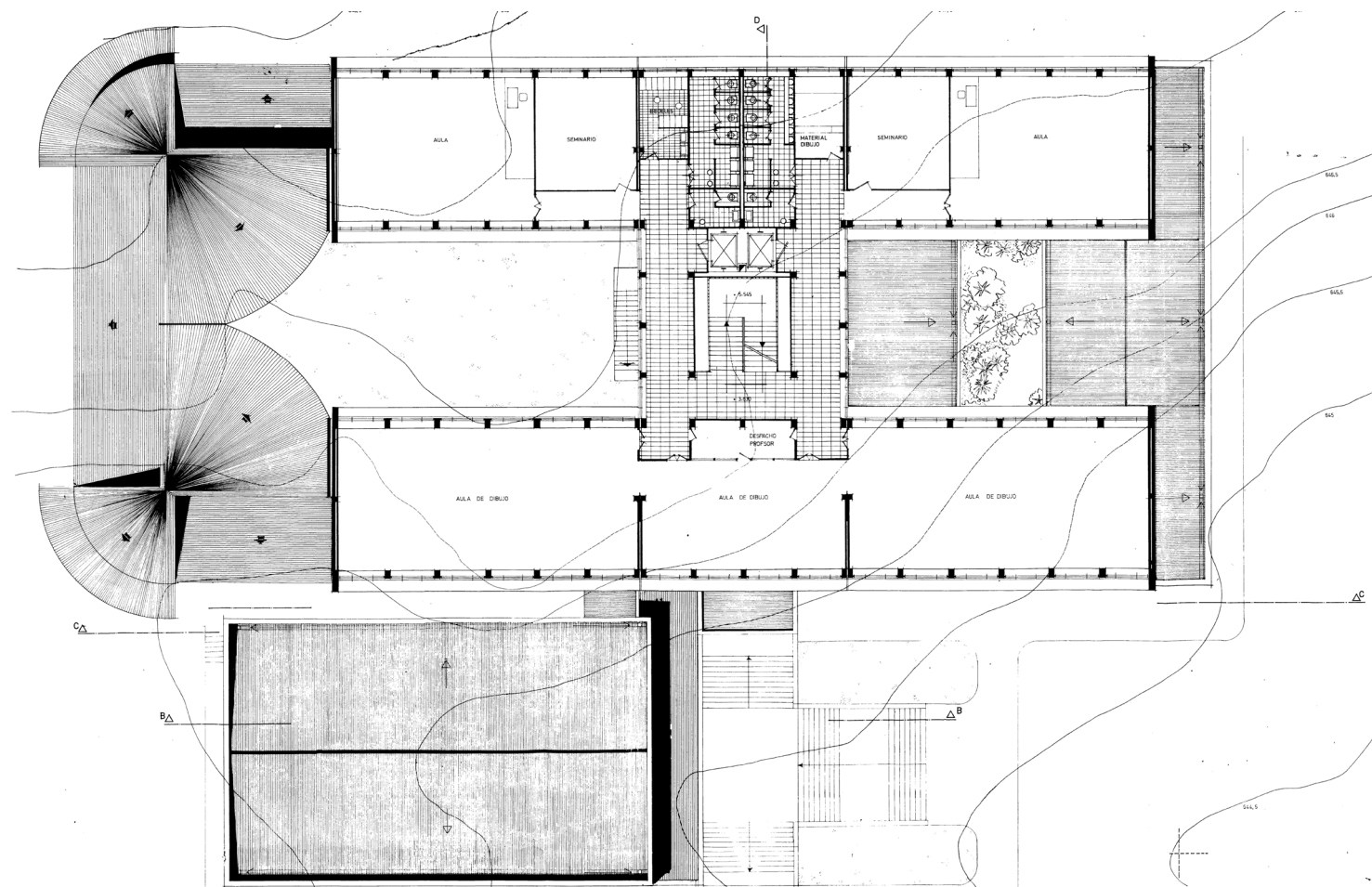
Planta sótano



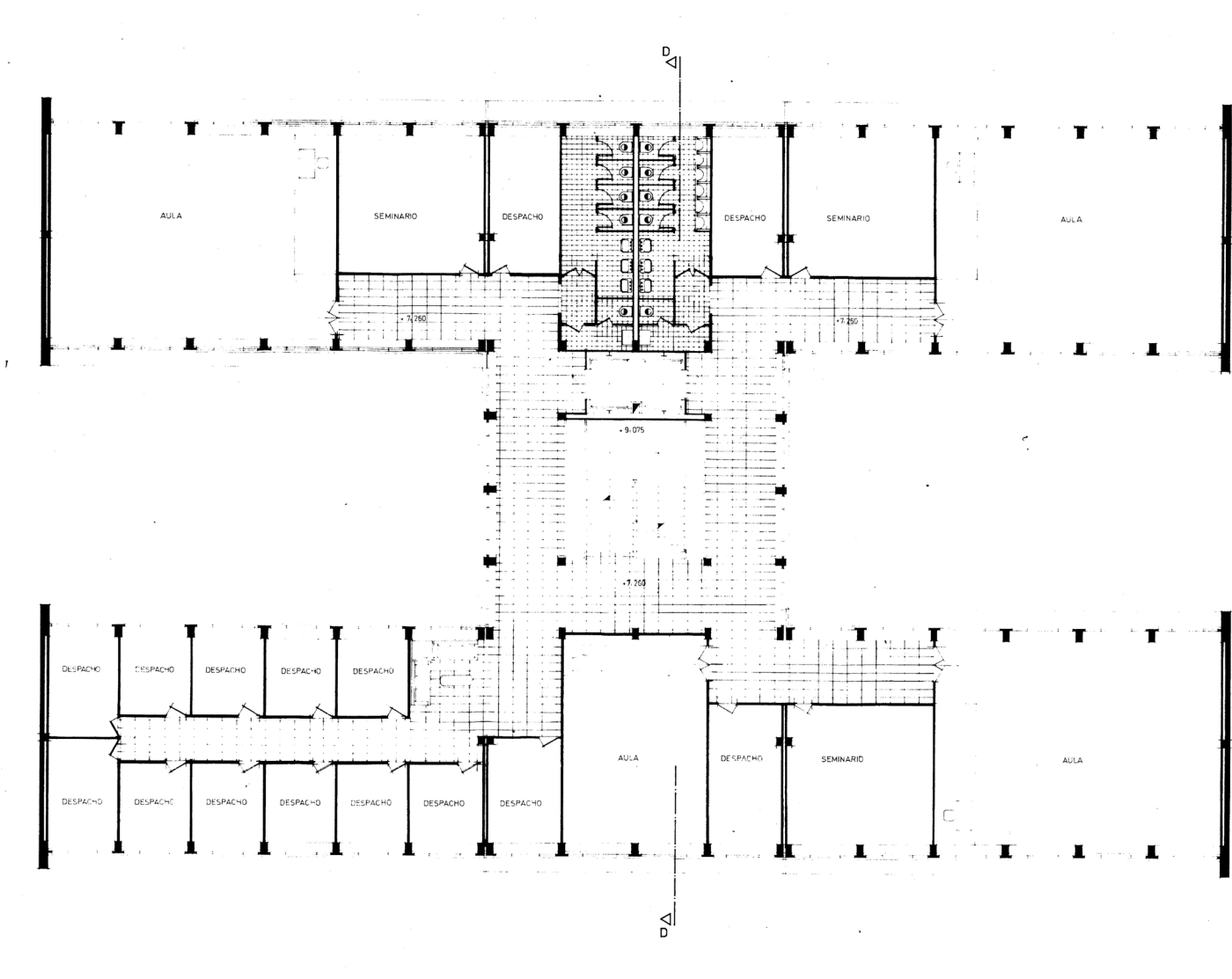
Planta cero



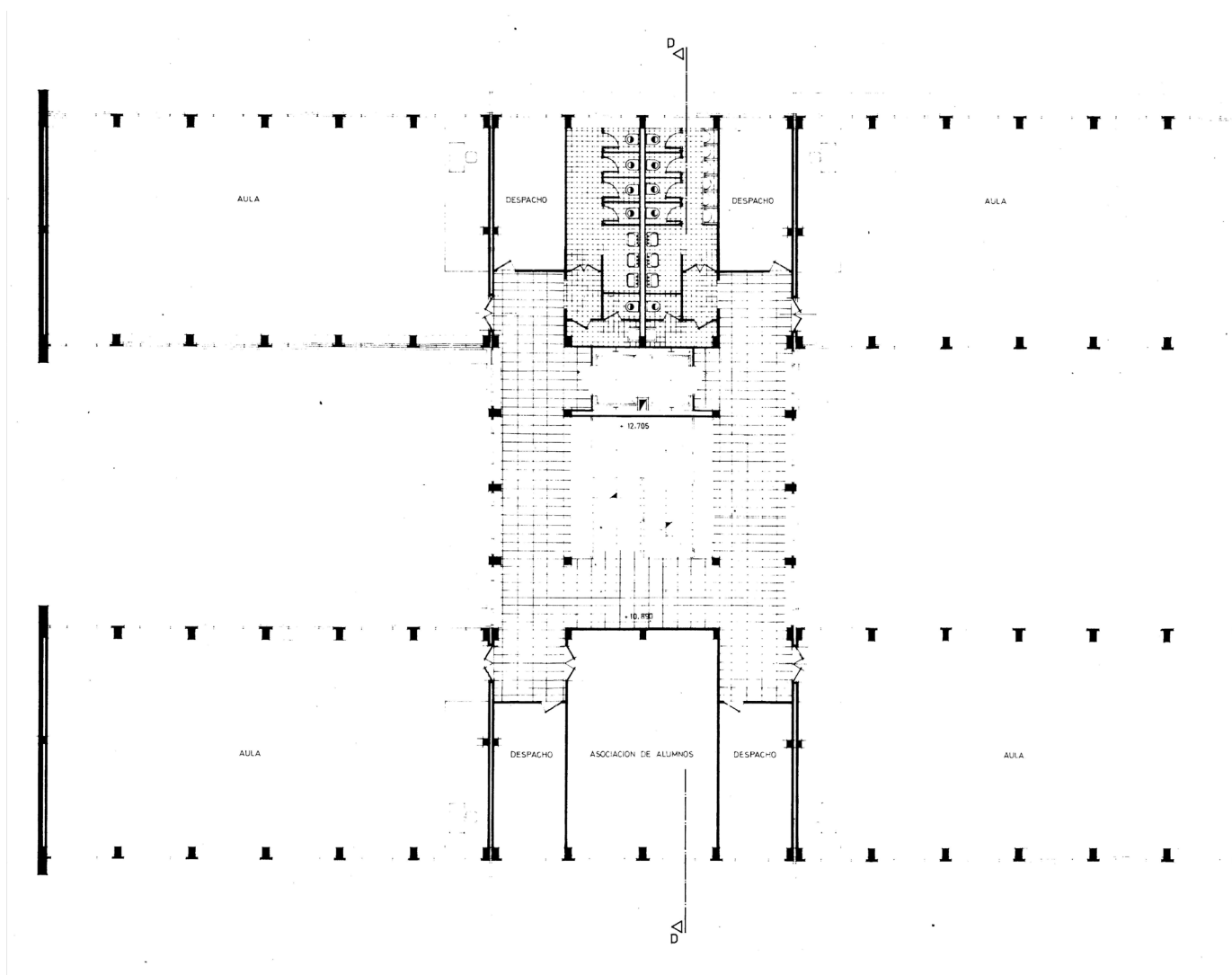
Planta primera



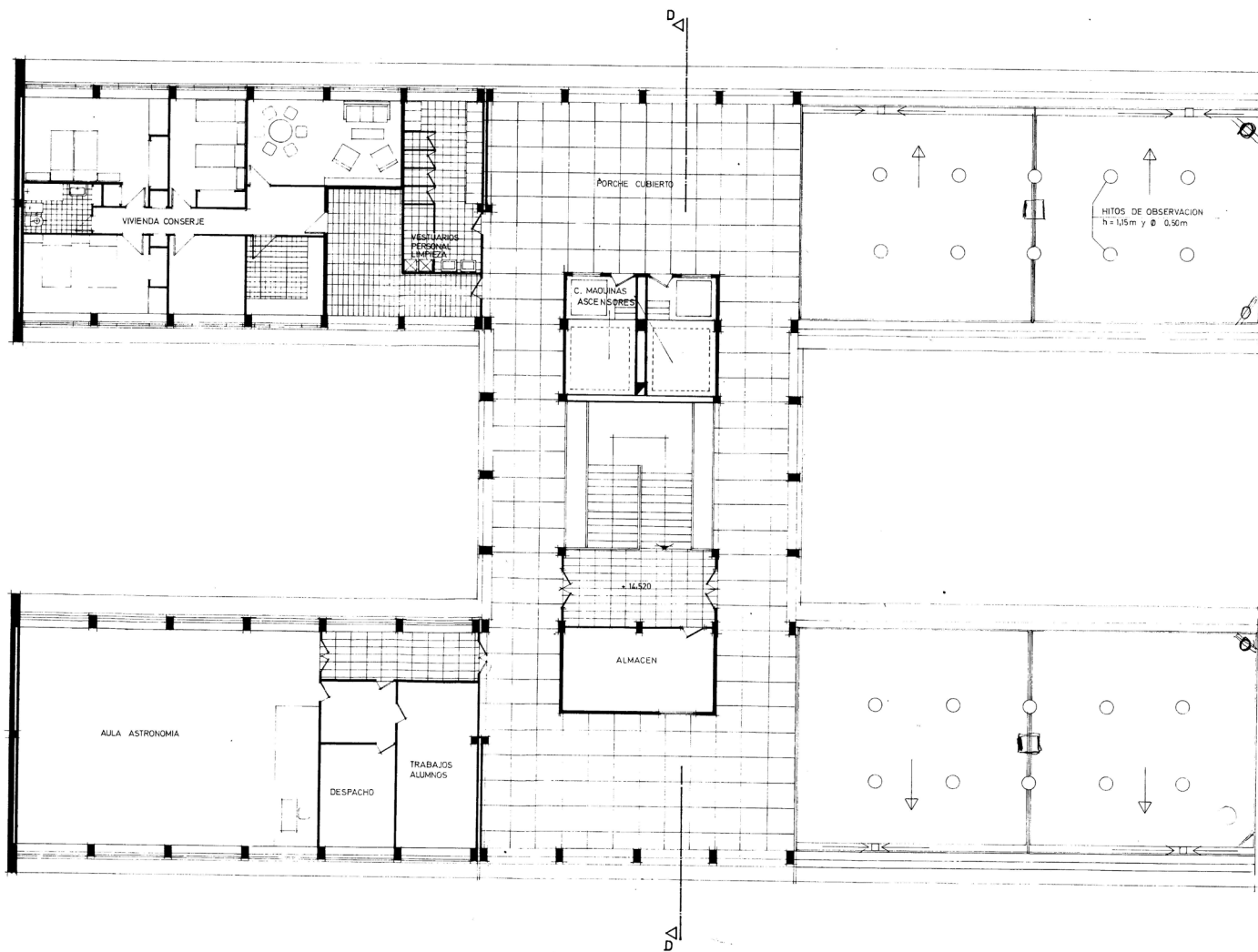
Planta segunda



Planta tercera



Planta cuarta



III. Publicaciones de artículos científicos

La presente tesis doctoral está avalada por dos publicaciones de artículos científicos en revistas indexadas. Dichas publicaciones constituyen una componente esencial para satisfacer los requisitos del plan de doctorado de Ingeniería Geomática de la UPM y para alcanzar uno de los objetivos específicos definidos en el marco de la tesis doctoral.

A través de las publicaciones, se busca contribuir de manera significativa al conocimiento en el área de la aplicación de tecnologías espaciales aplicadas a la ingeniería sísmica, consolidando los resultados obtenidos a lo largo de una rigurosa investigación. Las dos publicaciones reflejan el compromiso continuo con la excelencia académica, la innovación y la contribución significativa al avance del conocimiento en mi campo de estudio.

Automatic segmentation and classification of BIM elements from point clouds

- Autores: Rocío Romero-Jarén y José Juan Arranz Justel
- Revista: Automation in Construction (JIF en 2021 Q1, 4/68)
- Volumen: 124
- Fecha de publicación: abril de 2021
- ISSN: 0926-5805
- <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103576>
- Número de citas en revistas indexadas (última consulta 16/03/2024): 38
- Abstract: Laser techniques are widely used to perform topographic building surveys by providing massive information and point clouds comprised of millions of points in seconds. Point clouds allow the creation of 3D models that represent information of significant importance to the AEC/FM (Architecture, Engineering, Construction, and Facilities Management) domain. However, few tools exist related to the automatic modelling of point clouds. We present a method to automatically segment, classify, and model point clouds that were tested with two point clouds acquired via static and dynamic laser techniques. This approach generated accurate 3D surfaces of building elements, including floors, ceilings, walls columns, and content. A future study will involve transferring the 3D surfaces into Building Information Model elements.

How resilient is the labour market against natural disaster? Evaluating the effects from the 2010 earthquake in Chile

- Autoras: Maribel Jiménez Martínez, Mónica Jiménez Martínez y Rocío Romero-Jarén
- Revista: Natural Hazards (JIF en 2020 Q2, 85/200)
- Volumen: 104, 1481-1533
- Fecha de publicación: agosto 2020
- <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04229-9>
- Número de citas en revistas indexadas (última consulta 19/11/2023): 9
- Abstract: Natural disasters are one of the main channels through which ecological and socio-economic systems interact. In particular, the severe impacts of earthquakes could disrupt activities in the labour market. However, the literature barely researched the long-term effects of such events. To investigate this issue, this article is concentrated in Chile that is subject to recurring seismic movements. The 27 February 2010 Bío-Bío Chile earthquake (M_w 8.8) was the second strongest in the history of the country. This natural disaster can be used to evaluate the response of the labour market to an exogenous shock. Besides, the capacity for resilience in the labour market is crucial for people who rely on their job. This document analyses the impacts of the 2010 Bío-Bío earthquake and tsunami on Chilean labour market outcomes, in particular, the quality of employment. With this objective, different data are combined for analysing the effect in the short and long term. Also, distinct econometric techniques and exogenous measurements of seismic acceleration are used. The evidence shows that these catastrophes harmed the labour market in the short term. However, in the long term, the government's reconstruction efforts and other factors could have attenuated the adverse effects over some variables in the most affected zones.

IV. Contribución en congresos nacionales e internacionales

La doctoranda participó en el II Congreso de Ingeniería Geomática celebrado en Madrid en junio de 2019. El título del trabajo presentado es "Testing and Application of Geospatial Techniques in Seismic Engineering" (Romero-Jarén et al., 2019).

Determinadas fases de la investigación forman parte del proyecto I+D del Ministerio de Ciencia e Innovación de España) "Kuk Àhpán: Estudio regional integrado de estructura y evolución 4D de la litosfera centroamericana" (RTI2018-09827-B-C22. En concreto, el estudio forma parte del subproyecto: "Kuk Àhpán: Peligrosidad y riesgo sísmico en Centroamérica y sureste de España (Kuk Àhpán-SR)". El código asociado de la Universidad Politécnica de Madrid es: C1912570107. Gracias a dicho proyecto, ha sido posible presentar resultados en tres congresos de índole internacional:

- 17º Congreso Mundial de Ingeniería sísmica (17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE). El título del trabajo presentado es "Testing and application of geospatial techniques in seismic engineering".
- Congreso XXIV ISPRS. El título del trabajo presentado es "Automatic segmentation of point clouds in the architecture environment" (Romero-Jarén et al., 2021)
- 18º Congreso Mundial de Ingeniería sísmica (18th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE). El título del trabajo presentado es "Seismic fragility curves based on simplified methods: the case of Spanish masonry buildings"

V. Premios

Durante el desarrollo de la tesis doctoral, la doctoranda obtuvo dos premios en relación al trabajo desarrollado:

- Premio finalista Simposio de Doctorado UPM. La entidad que concede el premio es la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid. La fecha de concesión fue el 25/06/2021. El premio consistió en un cheque monetario.
- Tercer premio 2T Challenge '20 a la tecnología "As Built Modeller", La entidad que concede el premio es UPM Innovatech. La fecha de concesión es el 2/12/2020. El premio consistió en la elaboración de un vídeo para promocionar la tecnología ganadora. Video disponible en: <https://youtu.be/Y3BDzC0Q4CY?si=cDjGSg3c78WgUdY9>.