

# **A CRITICAL ROUTE FOR DOCUMENTING THE SEISMIC VULNERABILITY ON MEXICAN HISTORICAL CITIES**

## ***UNA RUTA CRÍTICA PARA LA DOCUMENTACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA EN CIUDADES HISTÓRICAS MEXICANAS***

**Ramírez Eudave, Rafael<sup>1\*</sup>; Ferreira, Tiago Miguel<sup>2</sup>; Romeu, Vicente<sup>3</sup>**

1: ISISE, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Minho, Guimarães, Portugal

2: Department of Geography and Environmental Management, University of the West of England, Bristol, UK

3: RISCO, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Aveiro, Aveiro, Portugal

1: e-mail: r.92@outlook.es

2: e-mail: tiago.ferreira@uwe.ac.uk

3: e-mail: romvic@ua.pt

### **RESUMEN**

Caracterizar la vulnerabilidad de las construcciones históricas en el contexto de acciones sísmicas es una actividad primordial para su salvaguarda. A pesar de las numerosas experiencias para evaluar construcciones históricas, la aplicación de evaluaciones a escala urbana sigue siendo una discusión abierta que involucra la pertinencia de las metodologías de evaluación, las estrategias de recolección de datos y la manipulación de las bases de datos resultantes. Los terremotos sucedidos en México en 2017 permiten contextualizar estas discusiones a la luz de un conjunto de datos recogidos antes y después del evento. Esta condición, relativamente poco frecuente en el ámbito mexicano, es útil para articular coherentemente una serie de métodos y aplicaciones existentes con el objetivo de configurar un flujo de trabajo para evaluar la vulnerabilidad sísmica a gran escala. Partiendo del Catálogo Nacional de Monumentos Históricos, es posible realizar un vínculo con metodologías simplificadas basadas en parámetros geométricos y materiales (Vulnerability Index Method). La pertinencia de tales métodos está respaldada por potenciales estrategias de alimentación de bases de datos, incluyendo el tratamiento informático de modelos basados en instancias (Building Information Modelling) y herramientas facilitadoras del trabajo de campo. La sistematización y consolidación de los datos a través de sistemas de información geográfica (Geographic Information Systems) facilita un circuito cerrado de adquisición, tratamiento y aprovechamiento de la información. El presente trabajo presenta componentes y fases con un alto potencial de integración para realizar evaluaciones de vulnerabilidad sísmica de escala urbana. Los eventos sísmicos de 2017 en México serán observados como una oportunidad para comprender las limitaciones y oportunidades de enriquecimiento del flujo de trabajo, discutiendo la pertinencia de la implementación de esta metodología integrada con el respaldo de ventajas como una mínima inversión de recursos materiales, el uso de softwares de distribución y acceso libres, así como la posibilidad de ser realizada de manera intuitiva por personal que puede ser capacitado de manera expedita.

**PALABRAS CLAVE:** Vulnerabilidad sísmica; centros históricos; evaluación basada en parámetros; bases de datos GIS.

### **1. INTRODUCCIÓN.**

Evaluar la vulnerabilidad de bienes sensibles a los efectos de eventos sísmicos es crítico para la mitigación de pérdidas y daños. De acuerdo al informe de Naciones Unidas sobre pérdidas económicas, pobreza y desastres para el período de 1998-2017 [1], los terremotos tienen la mayor proporción víctimas/ocurrencia en el contexto de los llamados «desastres naturales».

Además de mitigar los potenciales impactos negativos que imponen los terremotos, es importante no perder de vista la necesidad de construir aprendizaje sobre los hechos consumados. En ese sentido, cobra importancia la documentación de las construcciones en los estados previos y posteriores a los eventos sísmicos. A través del análisis de muestras amplias se pueden encontrar patrones y modelos representativos para anticipar los potenciales escenarios ante terremotos venideros.

Los terremotos de gran magnitud, como los sucedidos en México los días 7 y 19 de septiembre de 2017 [2], son capaces de infligir graves pérdidas en el patrimonio cultural. Las estimaciones preliminares de daños [3] acusan graves perjuicios en la arquitectura doméstica, particularmente en zonas de alta marginalidad, ricas en construcciones vernáculas e históricas [4]. El panorama del patrimonio histórico dañado o perdido tras tales terremotos [5], [6] también demuestra la necesidad de ejecutar acciones preventivas frente a potenciales terremotos venideros.

En la actualidad, existen numerosas acciones encaminadas a documentar las construcciones patrimoniales en México, principalmente vinculadas al Catálogo Nacional de Monumentos Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Este catálogo no pretende caracterizar la vulnerabilidad sísmica de las construcciones, pero enfatiza aspectos tipológicos, históricos y materiales que son útiles para ciertos métodos de evaluación. En consecuencia, abre la posibilidad de evaluar la vulnerabilidad sísmica de ciudades históricas a partir de la caracterización de edificios individuales, un aspecto inédito en el contexto mexicano. El presente documento presenta la plausibilidad de un flujo de trabajo a partir de la articulación de cinco componentes principales:

- a) La selección de los descriptores orientados a la vulnerabilidad sísmica;
- b) La adquisición de los datos a partir de las construcciones;
- c) El establecimiento de bases de datos y;
- d) La elaboración de análisis de riesgo basadas en la vulnerabilidad individual de los edificios.

## **2. SELECCIÓN DE DESCRIPTORES PARA CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS.**

La descripción de una entidad, en su calidad de sustituto conceptual [7], posibilita la comparación y análisis en determinados contextos. Decidir cómo describimos la ciudad y las construcciones históricas es vital para una evaluación exitosa de la vulnerabilidad sísmica.

### **2.1 El concepto del Paisaje Urbano Histórico (Historic Urban Landscape – HUL)**

Un avance crucial para el entendimiento de las ciudades históricas reside en la definición que UNESCO hace del Paisaje Urbano Histórico [8]. Este concepto pretende englobar los numerosos agentes que constituyen la ciudad histórica, incluyendo elementos físicos (e.g., las construcciones), naturales, sociales, económicos, culturales, etcétera. Uno de los aspectos más destacables de esta concepción es el proponer un marco común para conciliar los intereses de los agentes que convergen en la ciudad: especialistas, tomadores de decisiones, ciudadanos, etcétera.

El manual del Paisaje Urbano Histórico [9] exige que la documentación de la ciudad sea la base para el desarrollo de políticas y la toma de decisiones. Este manual exige que la información sea observada como una red compleja, constituida por relaciones y no solo por elementos. En consecuencia, es imprescindible tener presente que cualquier conjunto de descriptores para la ciudad histórica forma parte de una manera más amplia, holística y generalizada de entender el fenómeno urbano.

Una manera de ensamblar varias capas de información es a través de bases de datos vinculadas a referencias geográficas, tal como los Sistemas de Información Geográficos (SIG, por sus siglas en inglés). Estos sistemas son compatibles con las necesidades identificadas en la metodología del Paisaje Urbano Histórico: permiten el almacenamiento y gestión de numerosas capas de información, pueden ser actualizados por diversos actores y favorecen el crecimiento de bases de datos complejas.

## **2.2 El Catálogo Nacional de Monumentos Históricos**

La variedad y abundancia de edificios considerados como monumentos históricos por la ley mexicana (construcciones construidas entre el establecimiento de la cultura hispánica y el año 1900) favorecieron una política nacional de catalogación del patrimonio cultural a partir de la década de 1980. Estos catálogos se apoyan en un modelo de ficha que ha sido enriquecida al paso de los años. En la actualidad, la ficha contiene campos que abarcan la localización geográfica del bien, uso, antigüedad, tipología, tenencia, descripción arquitectónica (con planta general), fotografía de fachada y generalidades sobre los materiales, secciones y estados de conservación [10]. Un aspecto relevante de este catálogo es su progresiva apertura al público a través de una plataforma en línea [11].

## **2.3 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica**

Para vincular el catálogo y el análisis de vulnerabilidad sísmica, es necesario identificar qué características físicas, geométricas o materiales influyen en el desempeño sísmico de las estructuras. Aunque esta labor se enfrenta a numerosos retos debido a la diversidad de escalas, soluciones y tipologías de los bienes culturales, existen antecedentes en la identificación de ciertos aspectos generales para edificios de mampostería, la solución más habitual en edificios históricos mexicanos.

El Método de Índices de Vulnerabilidad (Vulnerability Index Method) fue originalmente desarrollado por el italiano Grupo Nacional para la Defensa ante los Terremotos en 1994 [12]. Apoyados en el análisis de vastos conjuntos de datos post-terremoto, se identificaron características comunes que condicionan la vulnerabilidad sísmica de los edificios. Este método ha sido calibrado, enriquecido y aplicado en numerosas ocasiones, en varios contextos geográficos. Existen dos variedades principales de este sistema: uno basado en parámetros globales de los edificios y otro basado en características de la fachada (Tabla 1). Este último, enfocado en anticipar potenciales mecanismos de falla fuera del plano, es una alternativa ante una disposición limitada de datos sobre los edificios. Cada parámetro se asocia a cuatro posibles grados con distintos valores numéricos. La suma de estos valores, multiplicados por el peso relativo que tiene la característica en el desempeño estructural, permite obtener un índice de vulnerabilidad asociable a curvas de daño en función de intensidades sísmicas.

Tabla 1. Aspectos considerados en los sistemas basados en parámetros

Parámetros de edificio completo [14]	Parámetros de fachada [15]
BP1. Tipo de sistema resistente	FP1. Geometría de fachada
BP2. Calidad del sistema resistente	FP2. Esbeltez máxima
BP3. Resistencia convencional	FP3. Área de vanos
BP4. Máxima distancia entre paredes	FP4. Desalineación de vanos
BP5. Número de niveles	FP5. Interacción entre fachadas continuas
BP6. Situación geológica	FP6. Calidad de los materiales
BP7. Posición relativa con adyacencias	FP7. Estado de conservación
BP8. Configuración en planta	FP8. Reemplazo de entresijos originales
BP9. Regularidad en altura	FP9. Conexión a paredes ortogonales
BP10. Vanos en fachada y alineación	FP10. Conexión a entresijos (diafragmas)
BP11. Diafragmas horizontales	FP11. Naturaleza impulsiva del sistema de cubierta
BP12. Sistema de cubiertas	FP12. Elementos conectados a la fachada
BP13. Fragilidad y estado de conservación	FP13. Elementos de mejora
BP14. Elementos no estructurales	

Los parámetros de ambas variedades son compatibles con el Catálogo Nacional de Monumentos Históricos. Un ejercicio desarrollado en la ciudad histórica de Atlixco (Puebla), en el contexto de los daños registrados tras el terremoto del 9 de septiembre de 2017, permitió demostrar la afinidad de la actividad regular de catalogación para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones [13]. Esto significa que incluso las bases de datos existentes ya representan un avance significativo para implementar evaluaciones a gran escala.

### 3. ESTRATEGIAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

La selección de estrategias de recolección de datos es complementaria a la selección de los descriptores. El éxito del modelo conceptual de las entidades está fuertemente condicionado por la capacidad de abarcar muestras amplias con una precisión aceptable.

#### 3.1 Catalogación en sitio apoyado en bases de datos GIS distribuidas.

Actualmente, las campañas de catalogación se basan en el llenado (en campo) de formatos en papel que son posteriormente capturados en una base de datos informática. Este sistema está condicionado por el acceso a las construcciones, la capacidad manual de llenado de las fichas, las condiciones de campo y el manejo de un soporte en papel. Es por ello que se aprecia la pertinencia de enriquecer las estrategias con el uso de tecnologías de visualización remota y bases de datos distribuidas. Varias de las limitaciones de la catalogación basada en fichas de papel pueden ser superadas a través de la integración de herramientas de libre acceso y distribución gratuita.

Un ejemplo de flujo de trabajo posible ha sido probado en el caso de la ciudad histórica de Atlixco, Puebla. Este ejemplo [16] conjuga una base de datos geográfica en la plataforma QGIS que es posteriormente guardada en «Mergin», un servicio de almacenamiento en línea o «nube». Este servicio permite que el mismo archivo sea editable y consultable de forma remota y colaborativa a partir de dispositivos portátiles (tabletas electrónicas y teléfonos inteligentes) equipados con la app Input. Las ventajas de este flujo de trabajo están en la rapidez con que se realiza la adquisición de datos (alimentando las bases en tiempo real), la desmaterialización de los soportes de información, y la capacidad de permitir el trabajo colaborativo en equipos amplios.

#### 3.2 Visualización remota: Vehículos Aéreos no Tripulados y satélite.

Esta estrategia complementa la catalogación en sitio al extender la capacidad de realizar inspecciones visuales. El uso de cámaras vinculadas a vehículos aéreos no tripulados no solo mejora el alcance visual del observador, sino que facilita la documentación de conjuntos urbanos de forma relativamente rápida y confiable. En ese sentido, el uso de imágenes fotográficas obtenidas con el apoyo de vehículos aéreos no se limita al registro de los descriptores, sino que permite la elaboración de modelos tridimensionales a partir de la reconstrucción fotogramétrica a escala urbana [17]–[20].

### **3.3 Obtención de datos a partir de modelos digitales BIM y HBIM.**

Una de las tendencias en la intervención de monumentos históricos es el uso del «Building information Modelling» (BIM) para representar las construcciones antes, durante y después de los procesos de intervención. Un aspecto particularmente interesante es que la construcción se define a partir de sus componentes y de las relaciones entre éstos. Los componentes de las construcciones (sobre todo los elementos constructivos) se encuentran definidos como bibliotecas en que se almacenan metadatos vinculados a sus especificaciones geométricas y materiales. Tales bibliotecas se apoyan los «Industry Foundation Classes», estándares abiertos y públicos que favorecen el intercambio de información en la industria de la construcción. Un caso particular es el modelado HBIM (Heritage Building Information Modelling), que enriquece las bases de datos BIM con las singularidades de las construcciones históricas, tales como la presencia de elementos constructivos no industriales, patologías, diferentes etapas constructivas, etcétera [21]–[23].

Es posible sacar partido de esta organización de datos para consultar datos específicos de las entidades BIM con relativa facilidad. Esto facilita la adquisición selectiva de los descriptores reconocidos de interés para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. A pesar de que este flujo de trabajo sigue siendo una hipótesis teórica [24], su éxito se encuentra respaldado por experiencias semejantes de extracción selectiva de información a partir de modelos BIM [25]–[29].

## **4. CONSTRUCCIÓN DE BASES DE DATOS URBANAS**

Tal como fue expuesto en la sección 3.1, las bases de datos GIS son un medio conveniente para el almacenamiento y gestión de los modelos descriptivos de la ciudad y de las construcciones históricas. A pesar de que una representación cartográfica bidimensional es susceptible de almacenar información relacionada con características espaciales y volumétricas, la posibilidad de generar modelos tridimensionales georreferenciados abre una posibilidad adicional en la interoperabilidad de las estrategias BIM-HBIM y GIS.

Uno de los conceptos fundamentales para exponer esta relación es la plausible vinculación entre el estándar IFC de los modelos BIM-HBIM y los niveles de detalle («Levels-of-Detail o LoD») para modelos tridimensionales. Los LoD se refieren a un conjunto de cinco niveles de simplificación que puede presentar un modelo tridimensional, desde una máxima abstracción (tan solo representando la huella del edificio) hasta un máximo de detalle, incluyendo el mobiliario y texturas de las construcciones. El hecho de que los modelos BIM-HBIM estén ensamblados con instancias basadas en el estándar IFC favorece la extracción selectiva de detalles que sean compatibles con los diferentes LoD y con el estándar CityGML para modelos urbanos [30], [31], aprovechándolos para ser vinculados a modelos tridimensionales urbanos híbridos, en que coexisten modelos BIM con entidades tridimensionales meramente representativas [25], [29], [32].

Una ventaja implícita de la creación de bases de datos en plataformas GIS es que facilita la evaluación de riesgos al contener diferentes capas de información ambientales [33]. De hecho, la vinculación la generación de mapas de riesgo ha demostrado ser una estrategia efectiva para la gestión de centros

históricos [34], [35]. La evaluación de riesgo sísmico, en ese sentido, enriquecería bases de datos geográficas nuevas o existentes con miras a generar una visión urbana de escenarios post-terremoto.

## **5. ANÁLISIS URBANO DE RIESGO**

Evaluar las perturbaciones que un terremoto puede imponer en una ciudad requiere el análisis conjunto de la vulnerabilidad individual de las construcciones, su rol en la ciudad (entendiéndola como un sistema) y las consecuencias previsibles en las funciones urbanas como consecuencia de las fallas individuales. Es por ello que conviene estudiar el fenómeno urbano (en el contexto de la vulnerabilidad sísmica) como un sistema. Existen muchas estrategias para evaluar sistemas a partir de las potenciales perturbaciones en sus componentes y las consecuencias que pueden esperarse a partir de ellas. Resulta especialmente útil, no obstante, el uso de los análisis de árbol de fallas (Failure Tree Analysis – FTA), de árbol de eventos (Event Tree Analysis – ETA) y el de modo de fallas y eventos (Failure Mode and Event Analysis – FMEA), debido a su carácter general y flexible.

El análisis FMEA [36] parte de la división de un sistema en componentes y subcomponentes. Cada uno de ellos es analizado en sus funciones, relaciones con otros sistemas, requerimientos de funcionamiento, potenciales modos de fallo (incluyendo sus causas de raíz) y sus correspondientes medios de detección y mitigación. Este análisis permite esclarecer los componentes que generan bifurcaciones en los árboles de falla y de eventos. Estos esquemas representan series de situaciones que pueden provocar un fallo específico (FTA) o una serie de consecuencias que pueden desencadenarse a partir de un fallo (ETA). Ejemplos de análisis a partir de estas estrategias son:

- Determinación de las construcciones críticas para mantener las funciones urbanas (salud, educación, seguridad, infraestructura, abastecimiento, etcétera) y la vulnerabilidad sísmica asociada a tales construcciones.
- Potenciales obstrucciones y cortes a la circulación vial como consecuencia de colapsos (i.e., acumulación de escombros por colapso de fachadas).
- Identificación del impacto que acciones de intervención en edificios individuales tienen en pronósticos post-terremoto, con la finalidad de priorizar el uso de recursos.

## **6. INTEGRACIÓN DE LAS ETAPAS**

La integración de los cuatro componentes (descriptores, adquisición de datos, bases de datos, y análisis urbano) permite articular un flujo de trabajo integral, susceptible de ser puesto en marcha a partir de acciones existentes. Este esquema de integración (Figura 1) articula los componentes a partir de la correspondencia entre preguntas de investigación y recursos (herramientas y técnicas) existentes.

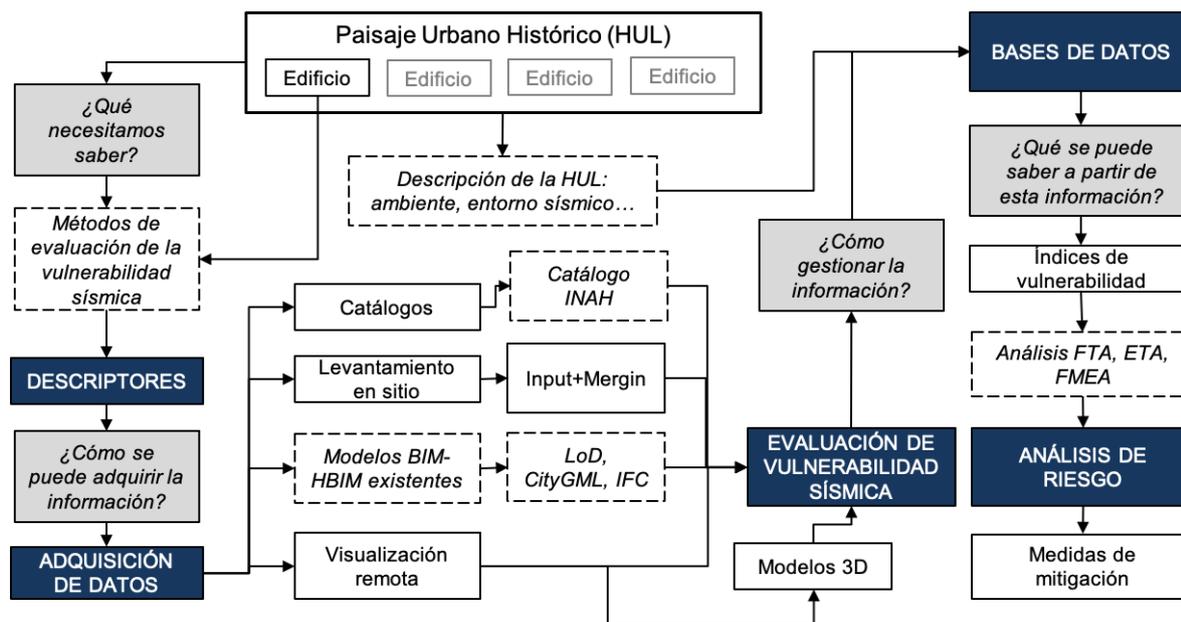


Figura 1. Esquema de los componentes discutidos en el presente documento y sus relaciones.

La cuestión sobre qué descriptores es necesario conocer se resuelve a partir de los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, dando como resultado un juego de descriptores. La adquisición de datos es, a su vez, una consecuencia del conjunto de descriptores, pudiéndose resolver a través de diferentes estrategias, desde acudir a los catálogos hasta obtener información de modelos BIM-HBIM. La información, una vez adquirida, alimenta la evaluación de la vulnerabilidad sísmica. Esta información es almacenada y gestionada en bases de datos GIS, donde se enriquece con los datos provenientes de la información geográfica de la HUL: datos ambientales, el entorno sísmico y otras capas de información relevante. Los índices de vulnerabilidad de las construcciones, almacenados en las bases de datos, permiten llevar a cabo análisis de escala urbana a través de las técnicas de árboles de fallos (FTA), de eventos (ETA) y de modo de fallos y eventos (FMEA). Los resultados, respaldarían eventuales medidas de mitigación de riesgo. Una implementación exitosa requiere la consolidación de los pasos intermedios en soportes y modelos definidos, a saber:

- Modelo de ficha de catálogo basada en la utilizada actualmente por el INAH, enriqueciéndola y modificándola para contener e identificar explícitamente los parámetros del sistema de evaluación de la vulnerabilidad sísmica basado en parámetros.
- Generación de manuales de obtención de datos basados en levantamiento en sitio asistido por bases de datos geográficas distribuidas, modelos BIM-HBIM existentes e inspección visual basada en herramientas de visualización remota.
- Diseño de una base de datos GIS que sea susceptible de almacenar la información contenida en el modelo de ficha y el resultado del análisis de vulnerabilidad a la escala del edificio. La misma base de datos servirá para obtener las cartografías de vulnerabilidad correspondientes a partir del contexto sísmico de la zona.
- Modelo de análisis FMEA para contextualizar los potenciales sistemas y subsistemas críticos de una ciudad histórica. Modelos generalizados para desarrollar potenciales árboles de fallas y de eventos.

## 7. CONCLUSIONES

La medición de la vulnerabilidad sísmica de los monumentos históricos es vital para la protección de las ciudades históricas. Además de la valiosa información que puede aportar la evaluación

individualizada de cada edificio, la realización de evaluaciones a escala urbana permite entender cómo las fallas individuales en los edificios comprometerían el funcionamiento urbano en su conjunto.

La existencia de un Catálogo Nacional de Monumentos Históricos, compatible con estrategias de medición de vulnerabilidad sísmica basadas en parámetros geométricos y materiales, abre la posibilidad de expandir las acciones de catalogación para incluir estrategias complementarias de adquisición de datos a través de medios de visualización remota, distribución de bases de datos en tiempo real y obtención de datos desde modelos preexistentes.

La afinidad entre la información territorial del Paisaje Urbano Histórico y la estructura de un potencial catálogo orientado a la vulnerabilidad respalda que la gestión de la información sea mediante bases de datos GIS. Estas bases permitirán la obtención de cartografías de representación de la vulnerabilidad, que en un sentido amplio favorecen la generación de análisis urbanos basados en árboles de fallas y de eventos. Tales análisis serían una base firme para la toma de decisiones con miras a la mitigación de la vulnerabilidad sísmica urbana.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por FCT / MCTES a través de fondos nacionales PIDDAC bajo la unidad R&D del Instituto para la Sustentabilidad e Innovación en Ingeniería Estructural (ISISE) bajo la referencia UIDB/04029/2020. Proyecto financiado por la Fundación para la Ciencia y la Tecnología (Portugal) mediante la beca PD/BD/150385/2019 con recursos del Fondo Social Europeo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, *Economic Losses, Poverty & DISASTERS 1998-2017*. 2018.
- [2] USGS, "M 7.1 - 1km E of Ayutla, Mexico, Interactive map," *Earthquake Hazards Program*, 2017. [Online]. Available: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/map?historic-seismicity=true&shakemap-intensity=false>. [Accessed: 22-Jan-2021].
- [3] F. Galvis, E. Miranda, P. Heresi, H. Dávalos, and J. R. Silos, "Preliminary Statistics of Collapsed Buildings in Mexico City in Puebla-Morelos Earthquake," *Tech. Rep.*, no. October, p. 17, 2017.
- [4] S. Caprano, S. Ortiz, and R. Valencia, "Los efectos económicos de los sismos de septiembre," *Rev. Econ. Inf.*, vol. 408, no. Enero-febrero, pp. 16–33, 2018.
- [5] S. Lindero, "Restaurar monumentos históricos costará 12 mil mdp: INAH," *El Heraldo de México*, Mexico, 27-Nov-2017.
- [6] C. San Juan, R. Casanova, and C. Álvarez, "La tierra se sacudía como queriendo pelear," pp. 89–93, 2017.
- [7] T. et al McLaughlin, "Critical Terms for Literary Study," 2nd ed., F. Lentricchia and T. McLaughlin, Eds. Chicago: The University of Chicago Press, 1995, p. 486.
- [8] M. Angrisano *et al.*, "Towards operationalizing UNESCO Recommendations on "Historic Urban Landscape": A position paper," *Aestimum*, vol. 69, pp. 165–210, 2016.
- [9] UNESCO, "The HUL Guidebook: Managing Heritage in Dynamic and Constantly changing Urban

Environments: A Practical Guide to UNESCO's Recommendation on the Historic Urban Landscape," no. June, p. 59, 2016.

- [10] Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, "Oficio/401.12C.6-2020/2213 - Public information requirement UT -20915 - 2020 folio 1115100084020 response," 2020.
- [11] Coordinación Nacional de Monumentos Históricos, "Catálogo Nacional de Monumentos Históricos Inmuebles." [Online]. Available: <https://www.catalogonacionalmhi.inah.gob.mx/>. [Accessed: 27-Oct-2020].
- [12] GNDT-SSN, "Scheda di Esposizione e Vulnerabilità e di Rilevamento Danni di Primo e Secondo Livello (Murata e Cemento Armato)," Rome, Italy, 1994.
- [13] R. Ramírez Eudave and T. M. Ferreira, "On the potential of using the Mexican National Catalogue of Historical Monuments for assessing the seismic vulnerability of existing buildings: a proof-of-concept study," *Bull. Earthq. Eng.*, no. 0123456789, Jun. 2021.
- [14] T. M. Ferreira, R. Maio, and R. Vicente, "Seismic vulnerability assessment of the old city centre of Horta, Azores: calibration and application of a seismic vulnerability index method," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 15, no. 7, pp. 2879–2899, 2017.
- [15] J. L. P. Aguado, T. M. Ferreira, and P. B. Lourenço, "The Use of a Large-Scale Seismic Vulnerability Assessment Approach for Masonry Façade Walls as an Effective Tool for Evaluating, Managing and Mitigating Seismic Risk in Historical Centers," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 12, no. 7–8, pp. 1259–1275, Nov. 2018.
- [16] R. R. Eudave and T. Miguel Ferreira, "Proposal for a suitable workflow for assessing the seismic vulnerability of historical buildings. Atlixco (Puebla, México) as a case study.," in *1st Croatian Conference on Earthquake Engineering*, 2021, pp. 23–34.
- [17] M. Russo, L. Carnevali, V. Russo, D. Savastano, and Y. Taddia, "Modeling and deterioration mapping of façades in historical urban context by close-range ultra-lightweight UAVs photogrammetry," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 13, no. 4, pp. 549–568, 2019.
- [18] T. Z. Xiang, G. S. Xia, and L. Zhang, "Mini-Unmanned Aerial Vehicle-Based Remote Sensing: Techniques, applications, and prospects," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 7, no. 3, pp. 29–63, 2019.
- [19] H. Eisenbeiss, "UAV photogrammetry," ETH Zürich, 2009.
- [20] D. Roca, J. Armesto, S. Lagüela, and L. Díaz-Vilariño, "LIDAR-equipped UAV for building information modelling," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 40, no. 5, pp. 523–527, 2014.
- [21] C. Dore and M. Murphy, "Current state of the art historic building information modelling," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 42, no. 2W5, pp. 185–192, 2017.
- [22] R. Brumana, M. Ioannides, and M. Previtali, "Holistic heritage building information modelling (hhbim): From nodes to hub networking, vocabularies and repositories," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 42, no. 2/W11, pp. 309–316, 2019.

- [23] M. Murphy, E. McGovern, and S. Pavia, "Historic building information modelling (HBIM)," *Struct. Surv.*, vol. 27, no. 4, pp. 311–327, 2009.
- [24] R. Ramírez Eudave and T. M. Ferreira, "On the suitability of a unified GIS-BIM-HBIM framework for cataloguing and assessing vulnerability in Historic Urban Landscapes: a critical review," *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–31, 2020.
- [25] S. Donkers, H. Ledoux, J. Zhao, and J. Stoter, "Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings," *Trans. GIS*, vol. 20, no. 4, pp. 547–569, 2016.
- [26] J. Zhang and N. M. El-Gohary, "Automated Extraction of Information from Building Information Models into a Semantic Logic-Based Representation," in *Computing in Civil Engineering 2015*, 2015, pp. 173–180.
- [27] R. K. Dhillon, M. Jethwa, and H. S. Rai, "Extracting Building Data from BIM with IFC," *Int. J. Recent Trends Eng. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 202–210, 2014.
- [28] F. Matrone, E. Colucci, V. De Ruvo, A. Lingua, and A. Spanò, "HBIM in a semantic 3d gis database," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 42, no. 2/W11, pp. 857–865, 2019.
- [29] E. Colucci, V. De Ruvo, A. Lingua, F. Matrone, and G. Rizzo, "HBIM-GIS Integration: From IFC to CityGML Standard for Damaged Cultural Heritage in a Multiscale 3D GIS," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 4, p. 1356, Feb. 2020.
- [30] M. Kokla, M. A. Mostafavi, F. Noardo, and A. Spanò, "Towards building a semantic formalization of (small) historical centres," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 42, no. 2/W11, pp. 675–683, 2019.
- [31] T. H. Kolbe, G. Gröger, and L. Plümer, "Citygml: Interoperable access to 3d city models," *Geoinformation Disaster Manag.*, pp. 883–899, 2019.
- [32] Y. Deng, J. C. P. Cheng, and C. Anumba, "Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison," *Autom. Constr.*, vol. 67, pp. 1–21, Jul. 2016.
- [33] C. J. van Westen, L. Montoya, and L. Boerboom, "Multi-Hazard Risk Assessment using GIS in urban areas: A case study for the city of Turrialba, Costa-Rica," *Hazard Mapp. Risk Assess.*, no. May 2014, pp. 53–72, 2002.
- [34] P. Tarolli and M. Cavalli, "Geographic Information Systems (GIS) and Natural Hazards," in *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 1st ed., P. T. Bobrowsky, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 378–385.
- [35] D. Fiorani and C. Cacace, "The risk map as a tool for conservation managing of historical centres," *ArchHistoR*, vol. 13, no. 7, pp. 1542–1563, 2020.
- [36] S. V. Seyed Shamseddin Alizadeh, Y. Rasoulzadeh, P. Moshashaie, "Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) Technique: A Literature Review," *Sci. J. Rev.*, no. January, 2015.

