Type of Article (Review article)

Vulnerabilidad sísmica en edificaciones: una revisión de enfoques y desafíos actuales (2000-2025)

Seismic vulnerability of buildings: a review of current approaches and challenges (2000-2025)

Edson Fernandez-Romero[1*], Fidel G. Aparicio Roque[2]
[1,2] Escuela de Posgrado, Universidad Nacional del Santa, Chimbote, Perú

corresponding Author: cymsacivil@gmail.com

Received: 31 July 2025 Revised: 7 August 2025 Accepted: 12 August 2025 Published: 30 August 2025

Inf. del art.

Palabras Clave
Vulnerabilidad, terremotos, edificios

Resumen

Antecedentes: los sismos representan una de las amenazas naturales más destructivas para las zonas urbanas, especialmente en países con alta informalidad constructiva y escaso control técnico. La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones es crucial para prevenir colapsos y mitigar riesgos urbanos. En este contexto, el presente estudio tiene como *objetivo* revisar críticamente los enfoques metodológicos desarrollados entre 2000 y 2025 para evaluar la vulnerabilidad sísmica, identificando sus aportes, limitaciones y desafíos actuales.
Método: La metodología empleada fue una revisión sistemática de literatura (RSL), aplicada bajo los lineamientos PRISMA. Se seleccionaron 57 estudios de la base de datos Scopus, tras aplicar criterios de inclusión/exclusión relacionados con idioma, disponibilidad a texto completo, pertinencia temática y tipo de documento. La revisión respondió a cuatro preguntas de investigación que abordan factores estructurales, aplicación normativa, modos de falla y desafíos metodológicos.
Resultados: se destaca la evolución de los métodos tradicionales hacia enfoques mixtos e integrados, que combinan inspección visual, inteligencia artificial, modelos numéricos y herramientas GIS. Se identificaron factores estructurales clave como la rigidez, antigüedad, configuración geométrica y calidad constructiva. En cuanto a normativas, se evidenció su aplicación parcial y desigual, especialmente en regiones con edificación informal. Los tipos de fallas más comunes incluyeron pisos blandos, columnas cortas, torsión estructural y colapso progresivo.
Conclusión: la revisión confirma que, aunque existen avances significativos en metodologías y tecnología aplicada, persisten brechas técnicas y sociales. Se recomienda avanzar hacia modelos más contextualizados, inclusivos y escalables, así como integrar estrategias de refuerzo estructural y participación comunitaria en los procesos de mitigación del riesgo sísmico.

Article info

Keywords
Vulnerability, earthquakes, buildings

Abstract

Background: earthquakes represent one of the most destructive natural hazards for urban areas, especially in countries with high construction informality and scarce technical control. The assessment of the seismic vulnerability of buildings is crucial to prevent collapse and mitigate urban risks. In this context, the present study aims to critically review the methodological approaches developed between 2000 and 2025 to assess seismic vulnerability, identifying their contributions, limitations and current challenges.
Method: The methodology employed was a systematic literature review (SLR), applied under the PRISMA guidelines. Fifty-seven studies were selected from the Scopus database, after applying inclusion/exclusion criteria related to language, full-text availability, thematic relevance and type of document. The review answered four research questions addressing structural factors, normative application, failure modes and methodological challenges.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Results: The evolution of traditional methods towards mixed and integrated approaches, combining visual inspection, artificial intelligence, numerical models and GIS tools, is highlighted. Key structural factors such as stiffness, age, geometric configuration and construction quality were identified. Regarding regulations, their partial and uneven application was evidenced, especially in regions with informal construction. The most common types of failures included soft floors, short columns, structural torsion and progressive collapse.
Conclusion: the review confirms that although there are significant advances in methodologies and applied technology, technical and social gaps persist. It is recommended to move towards more contextualized, inclusive and scalable models, as well as to integrate structural strengthening strategies and community participation in seismic risk mitigation processes.

1. Introducción

Los terremotos constituyen una de las amenazas naturales más destructivas para las sociedades modernas en áreas urbanas sobre zonas de alta sismicidad. Aunque no se controla la energía sísmica, sus efectos pueden mitigarse mediante una adecuada comprensión de la vulnerabilidad estructural, definida como la propensión de una edificación a sufrir daños o colapsar ante un movimiento sísmico[1]. Estudios comparativos entre métodos basados en índices de vulnerabilidad y espectros de capacidad revelan diferencias significativas en la estimación del riesgo urbano, resaltando la necesidad de adaptar cada técnica a las características del inventario edilicio [2]. Funciones de vulnerabilidad que integran parámetros de diseño sísmico y dispositivos disipadores de energía permiten evaluar el equilibrio entre costos iniciales y seguridad [3]. En Tizi-Ouzou (Argelia), análisis de estructuras de concreto reforzado muestran que irregularidades geométricas y calidad del refuerzo afectan el comportamiento ante sismos [4].

Este problema se acentúa en países en desarrollo donde predominan las construcciones informales. En América Latina, más del 60 % de las viviendas han sido edificadas sin control técnico ni cumplimiento normativo, lo cual incrementa su vulnerabilidad ante eventos sísmicos [5]. De igual manera, en Argelia, investigaciones revelan que la mayoría de las edificaciones residenciales no cumple con estándares sísmicos mínimos, lo que conduce a niveles altos de daño durante terremotos moderados [6]. En Perú, el patrimonio edificado, especialmente en zonas costeras, presenta estructuras de adobe con escaso refuerzo, alta irregularidad geométrica y materiales frágiles, características que las vuelven extremadamente vulnerables [7].

En las últimas dos décadas, han surgido distintos enfoques para evaluar esta vulnerabilidad. Uno de los métodos más extendidos es la inspección visual rápida, que clasifica edificaciones según su tipología estructural y deterioro observable [8]. Paralelamente, métodos más sofisticados incorporan inteligencia artificial, como máquinas de soporte vectorial y redes neuronales, para predecir niveles de daño post-sismo con base en características geométricas y de material [9].

Los inmuebles históricos exigen una atención especial. En Lima, la evaluación de iglesias coloniales ha revelado que el comportamiento estructural de edificaciones patrimoniales no puede evaluarse con criterios convencionales, debido a su antigüedad, asimetría y deterioro acumulado [10]. En contextos europeos, como Italia, se han desarrollado modelos calibrados con datos reales post-evento para estimar la distribución espacial del daño en centros históricos [11]. A pesar de estos avances, persisten desafíos técnicos importantes: ausencia de herramientas automatizadas aplicables a grandes inventarios, baja actualización normativa en varios países y dificultades para incorporar criterios sociales o de uso en las evaluaciones estructurales [12]. Por ejemplo, incluso con modelos analíticos avanzados, se ha demostrado que la incertidumbre en la estimación de la deriva interpiso puede ser considerable cuando se evalúan edificios existentes de concreto armado [13]. Esta línea de investigación es esencial para reducir riesgos urbanos, priorizar refuerzos estructurales y apoyar decisiones de política pública. En un contexto de crecimiento urbano acelerado y aumento de eventos extremos, entender la vulnerabilidad estructural no es solo un tema técnico, sino una responsabilidad social.

La presente investigación tiene como objetivo revisar críticamente los enfoques metodológicos desarrollados entre los años 2000 y 2025 para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones, identificando sus principales aportes, limitaciones y vacíos técnicos. Esta revisión responde a la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los avances y desafíos actuales en los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones a nivel internacional entre 2000 y 2025?

2. Revisión de literatura

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

2.1. Enfoques metodológicos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica

En las últimas décadas, se han desarrollado enfoques metodológicos más eficientes para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones, buscando equilibrio entre rapidez, precisión y aplicabilidad en campo. Un ejemplo es el estudio de [8], cuyo objetivo fue implementar un método funcional de evaluación rápida para edificaciones existentes. Este método, basado en inspección visual estructurada, fue aplicado a 105 edificios en zonas sísmicas europeas, logrando clasificaciones preliminares en menos de 20 minutos por edificio y alcanzando una precisión del 82% en comparación con evaluaciones detalladas. Así mismo, [14] propusieron un enfoque basado en funciones de vulnerabilidad y curvas de daño calibradas con datos empíricos obtenidos en estructuras estratégicas de Argel. Mediante simulaciones comparativas con datos reales post-sismo, las curvas ajustadas lograron estimar niveles de daño con un margen de error inferior al 15%, lo que respalda su utilidad para planificación urbana y gestión de emergencias. También, en [10] desarrollaron una metodología adaptada a edificios históricos de Lima, Perú, combinando criterios cualitativos y cuantitativos. En una muestra de 35 edificaciones patrimoniales, el análisis reveló que el 68.5% presentaba alta vulnerabilidad estructural. La inclusión de variables como antigüedad, rigidez y geometría permitió clasificar los niveles de riesgo con una fiabilidad del 73% respecto a inspecciones especializadas. Estos enfoques destacan la evolución de los métodos tradicionales hacia sistemas más integrales, rápidos y contextualizados según el tipo de edificación.

2.2. Tecnologías emergentes aplicadas a la evaluación sísmica

La evaluación sísmica de edificaciones ha evolucionado con el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten diagnósticos más precisos, rápidos y automatizados. Un ejemplo es el trabajo de [9], quienes desarrollaron un modelo de clasificación de daños usando redes neuronales (MLP) combinadas con SVM para estructuras tipo losa-columna. Su sistema fue entrenado con 2,000 registros de daño y logró una precisión del 91.2% en clasificación multicategoría, superando modelos tradicionales en velocidad de respuesta y eficiencia diagnóstica. Por su parte, [15] aplicaron el método de elementos finitos no lineales para evaluar el desempeño sísmico de estructuras de albañilería patrimonial en Lisboa. El objetivo fue validar la precisión de simulaciones frente a observaciones empíricas. En el estudio de 5 edificaciones históricas, se obtuvo una correspondencia superior al 85% entre los mecanismos de falla simulados y los observados, confirmando el potencial de la simulación avanzada en patrimonio edificado. Otro enfoque innovador es el de [16], quienes utilizaron fragilidades sísmicas informadas por datos de daño para mejorar la predicción de pérdidas. En su análisis de 35 edificios de concreto no dúctil, las curvas fragilidad obtenidas redujeron el margen de error al 12% frente a modelos genéricos. Finalmente, [17] propusieron un sistema basado en GIS y criterios multicriterio para evaluar la vulnerabilidad de hospitales en Teherán. Su modelo permitió mapear el riesgo sísmico de 62 edificios hospitalarios, identificando que un 27% presentaba vulnerabilidad crítica, lo que lo convierte en una herramienta efectiva para toma de decisiones en salud pública.

2.3. Desafíos actuales y perspectivas futuras en la mitigación de la vulnerabilidad sísmica

En la actualidad, la mitigación de la vulnerabilidad sísmica enfrenta muchos desafíos relacionados con la adaptación a diferentes tipos de edificaciones, limitaciones de recursos y la necesidad de integrar herramientas predictivas más robustas. Un ejemplo significativo es el estudio de [18], quienes evaluaron edificios históricos en zonas urbanas mediante simulaciones dinámicas no lineales. Analizando más de 20 estructuras patrimoniales en Nápoles, identificaron que el 73% de ellas superaba el umbral de daño moderado para eventos sísmicos de magnitud >6.0, evidenciando la urgencia de intervenciones reforzadas. Asimismo, [19] desarrollaron un modelo integral para estimar pérdidas probables en edificaciones no dúctiles en Colombia. El método combinó análisis estructural con funciones de fragilidad calibradas a datos locales. En una muestra de 45 edificios evaluados, se determinó que el 61% presentaba una probabilidad de colapso mayor al 25% bajo escenarios sísmicos intensos. Este enfoque plantea una visión prospectiva para políticas de refuerzo en zonas sísmicamente activas. Por último, [20] exploraron la aplicación de modelos urbanos multicriterio para mitigar riesgos sísmicos en centros históricos como La Serena (Chile). A través del uso de SIG y variables socio estructurales, el estudio identificó zonas críticas en el 35% del área urbana evaluada, proponiendo estrategias de intervención segmentada como vía para mejorar la resiliencia territorial a largo plazo.

3. Materiales y métodos

En la elaboración de la metodología, esta sección se estructura considerando los aspectos que permitan responder al objetivo de analizar la vulnerabilidad sísmica en edificaciones, las preguntas de

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ISSN: 3028-9882/ https://doi.org/10.70504/xxxx
© 2024 Ho nexus.

investigación planteadas, el tipo de estudio seleccionado, la estrategia de búsqueda en la base de datos Scopus y la aplicación de criterios definidos para la inclusión o exclusión de estudios relevantes sobre el tema.

3.1. Propósito y preguntas de investigación

De acuerdo en la revisión de literatura, esta revisión explora la Vulnerabilidad sísmica en edificaciones, así como los enfoques y desafíos actuales. Las preguntas de investigación son las siguientes:

RQ1: ¿Qué factores estructurales afectan la vulnerabilidad sísmica?

RQ2: ¿Hasta qué punto las normas de diseño sismorresistente han sido aplicados en las edificaciones?

RQ3: ¿Cuáles son los tipos de fallas estructurales más comunes durante los sismos?

RQ4: ¿cuáles son los principales desafíos en la vulnerabilidad sísmica en las edificaciones?

3.2. Tipo de estudio

La metodología seleccionada para este trabajo es la Revisión Sistemática de Literatura (RSL), la cual permite recopilar, organizar y analizar de manera estructurada la evidencia científica existente sobre la vulnerabilidad sísmica en edificaciones, abordando enfoques metodológicos y desafíos reportados entre los años 2000 y 2025 [21], [22]. Este tipo de estudio facilita responder preguntas específicas, evaluar la validez y consistencia de los hallazgos, sintetizar el conocimiento acumulado en el área, identificar tendencias y vacíos en la investigación, así como proponer líneas futuras de estudio [23]. Para garantizar la transparencia y rigurosidad del proceso, se empleó el método PRISMA, ampliamente reconocida por su enfoque sistemático en todas las etapas de la revisión [24]. PRISMA permite detallar el número de registros identificados, los criterios de selección aplicados y el flujo de inclusión y exclusión de los estudios analizados [25]. Esta metodología fue elegida por su énfasis en la exhaustividad, la transparencia y la claridad en la presentación de resultados, lo que contribuye a asegurar la relevancia científica y la reproducibilidad de la revisión [26].

3.3. Estrategia de búsqueda

Se realizó una recolección de datos para la revisión a través del análisis en la base de datos de Scopus. Al inicio, se identificaron un total de 286 estudios, de los cuales, no se identificó duplicidad. Finalmente, se optaron por incluir 57 estudios al aplicar los criterios de inclusión y exclusión determinados por la metodología PRISMA. La búsqueda se estructuró en base a una cadena compuesta por palabras clave y términos relacionados con la revisión; una vez lista, se aplicó a la base de datos de Scopus, variando únicamente los filtros que cada una ofrece: “Vulnerability AND earthquakes AND buildings”

3.4. Criterios de inclusión y exclusión

En esta revisión sistemática se incluyeron manuscritos originales, conferencias o libros publicados entre 2004 y 2025, en inglés, de acceso público y con PDF completo, que aplican metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica. Se excluyeron documentos en otros idiomas, duplicados, sin relación con el tema, sin resultados relevantes o que no respondían a las preguntas PICO.

Table 1. Criterios de inclusión y exclusión

Inclusión	Exclusión
I01: Manuscritos del 2004 al 2025	E01: Manuscritos escritos en otro idioma que no sea inglés
I02: Los manuscritos deben estar escritos en el idioma inglés	E02: Los manuscritos no responden a las preguntas PICO
I03: Manuscritos originales, papeles de conferencia o libros	E03: Los manuscritos no guardan relación con el tema de la RSL
I04: Manuscritos de acceso público	E04: Manuscritos duplicados
I05: Manuscritos con documento PDF completo	E05: Manuscritos que no presentan resultados o análisis relevantes
I06: Estudios que aplican metodologías de evaluación de vulnerabilidad sísmica	

La identificación de estudios y la aplicación de diferentes filtros fueron aplicados a cada manuscrito de las bases de datos antes mencionadas, para al final incluir el número total de estudios en la revisión. Al inicio, se encontraron 286 estudios, dejando sólo 286 ya que en la revisión no se identificó duplicidad. Luego, 124 estudios fueron excluidos por título y 101 por resumen porque no guardaban

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

relación con la revisión, dejando 61 estudios. Después, se hizo la verificación si estos estudios contaban con disponibilidad a texto completo, excluyendo 0 estudios y actualizando la cifra a 61 manuscritos. Finalmente, se hizo la lectura a texto completo de todos los estudios, excluyendo 3 por no responder las preguntas PICO adecuadamente, quedando un total de 57 estudios en la revisión sistemática, tal como se presenta en la Figura 1.

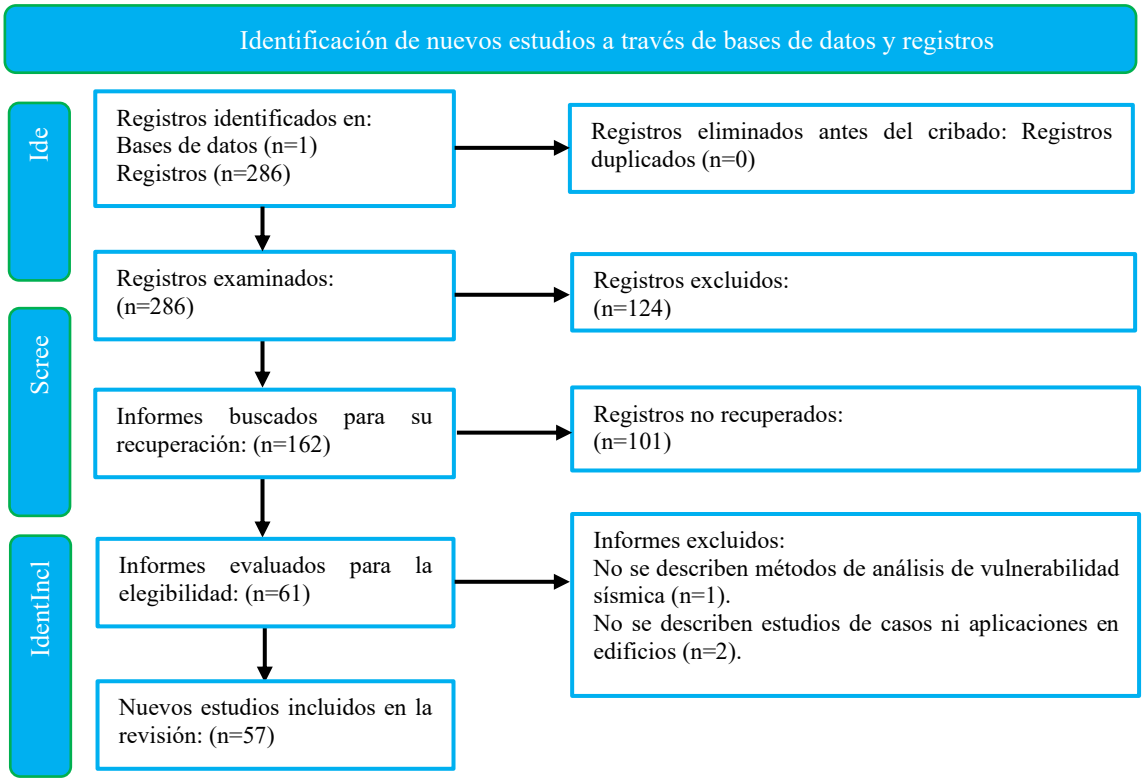


Figura 1 Diagrama prisma

4. Resultados

Esta sección analiza los hallazgos obtenidos de una base de datos como scopus, destacando criterios clave como los tipos de estudios, metodologías empleadas y la cantidad de investigaciones relacionadas con la vulnerabilidad sísmica en edificaciones. La Figura 2 presenta un análisis bibliométrico de los términos más recurrentes, como 'evaluación estructural', 'riesgo sísmico' o 'refuerzo de edificios', que reflejan los enfoques actuales y desafíos en este campo.

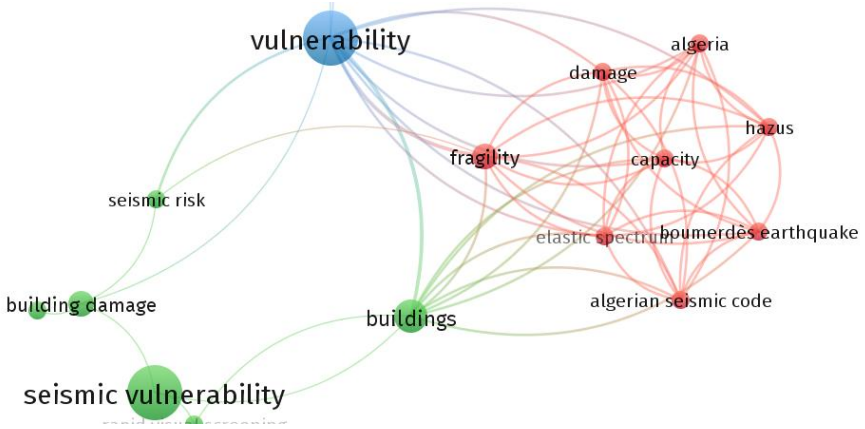


Figure 2. Análisis bibliométrico

La Figura 3 representa la distribución visual de los tipos de documentos encontrados en las diferentes bases de datos. El 77% corresponde a artículos originales, lo que evidencia el claro predominio

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

de revistas científicas especializadas como principal medio de difusión académica en el área estudiada. Le siguen los Conference Proceedings con un 21%, lo cual refleja la importancia de los congresos como espacios dinámicos para la divulgación de avances recientes sobre vulnerabilidad sísmica en edificaciones. Finalmente, un 2% corresponde a Book Sections, mostrando una presencia marginal pero complementaria de capítulos de libro que aportan conocimiento adicional a la revisión bibliográfica.

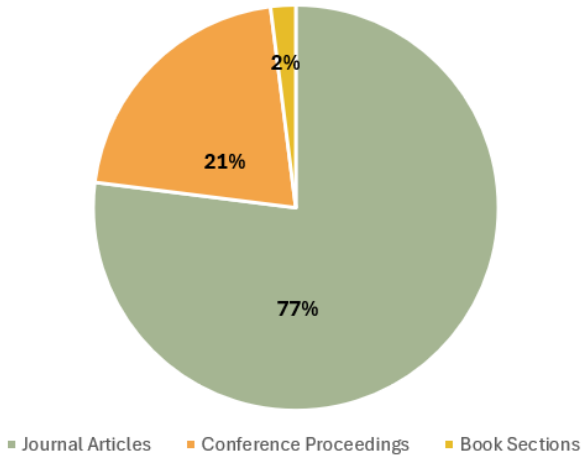


Figura 3 Criterios de inclusión y exclusión

La Figura 4 revela que el enfoque cuantitativo domina en Scopus, representando el 80% de los estudios (32 de 40). Los métodos mixtos (15%, 6 estudios) y cualitativos (5%, 2 estudios) tienen una presencia significativamente menor. Esta tendencia se repite en otras bases de datos, como Springer, donde los estudios cuantitativos también son mayoría, mientras que los cualitativos y mixtos son los menos frecuentes.

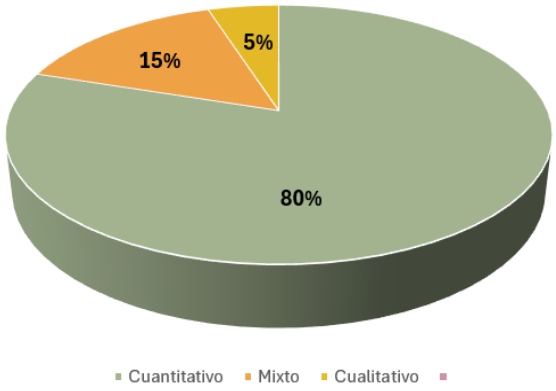
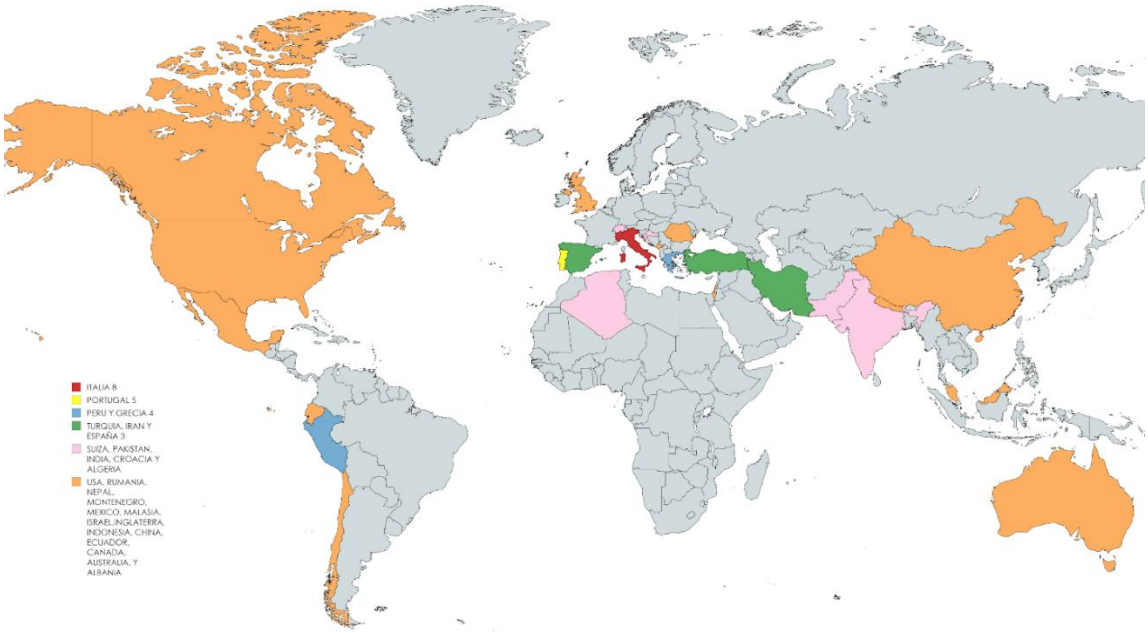


Figura 4. Enfoque Cuantitativo.

Los estudios incluidos (100%, 57 documentos) provienen de Scopus, destacando su predominancia como fuente principal para el análisis de vulnerabilidad sísmica en edificaciones. Este resultado resalta su amplia cobertura y relevancia en el ámbito académico, justificando su selección como base de datos prioritaria en la revisión. La ausencia de otras fuentes evidencia la concentración de estudios en Scopus.

La Figura 6 muestra la distribución de estudios por país de publicación. Italia destaca con 8 estudios, seguida por Portugal (5), y Grecia y Perú (4 cada uno), evidenciando una producción científica relevante en vulnerabilidad sísmica. Pakistán, España y Chile contribuyen con 3 artículos cada uno, mientras que otros países aparecen con 1 o 2 publicaciones, reflejando un interés global con mayor concentración en Europa meridional y América Latina.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



5. Discusión

Durante la búsqueda sistematizada realizada como parte de la metodología de este artículo, se recolectó y analizó un conjunto de estudios relevantes que permitieron responder de forma exhaustiva las preguntas de investigación relacionadas con la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones. Esta estrategia metodológica, basada en criterios explícitos de inclusión, exclusión y evaluación crítica de la evidencia, garantizó una revisión amplia, estructurada y con enfoque comparativo de la literatura especializada.

Gracias a este proceso, fue posible identificar siete artículos clave que abordan, desde distintas realidades geográficas y constructivas, los principales factores estructurales que inciden en el comportamiento sísmico, la aplicación de normativas de diseño sismorresistente, los tipos de fallas estructurales más frecuentes y los desafíos asociados a la reducción del riesgo. La sistematización de estos hallazgos no solo permitió ordenar las respuestas a las preguntas planteadas, sino también evidenciar patrones comunes, enfoques divergentes y vacíos técnicos que enriquecen la comprensión del fenómeno. Así, esta discusión se estructura a partir de las preguntas guía que orientaron la revisión, contrastando los aportes de cada fuente desde una mirada integrada, crítica y contextualizada.

5.1. ¿Factores estructurales que afectan la vulnerabilidad sísmica?

Los factores que inciden en la vulnerabilidad sísmica son abordados de manera multidimensional en los estudios analizados, evidenciando una interacción compleja entre características geométricas, propiedades del material, condiciones del terreno y deficiencias constructivas. [27] establece un marco fundamental al destacar el rol del periodo de vibración, la rigidez global, el tipo de suelo y la antigüedad de la edificación como elementos que afectan directamente el comportamiento dinámico estructural. Esta visión se complementa con la de Chaulagain et al. [28], quienes, en el contexto de edificaciones informales en Katmandú, enfatizan no solo la baja rigidez lateral y la ductilidad reducida, sino también la existencia de estructuras sin intervención profesional, lo cual expone una vulnerabilidad adicional ligada al control del proceso constructivo.

Por su parte, [29] avanzan en la cuantificación de estos factores mediante el uso de índices de vulnerabilidad que incorporan tanto la configuración estructural como las condiciones geotécnicas y la antigüedad, lo que permite una lectura más integral del riesgo. [30] añaden una capa analítica más técnica al señalar que la deficiencia en los refuerzos de columnas y vigas no solo compromete la capacidad resistente, sino que además amplifica la demanda de desplazamientos inter-piso, fenómeno que incrementa la probabilidad de mecanismos frágiles de colapso. Esta preocupación por la calidad constructiva se replica [31], quienes, analizando edificaciones peruanas, identifican que la tipología (adobe, albañilería) y las dimensiones de los elementos portantes interactúan críticamente con el número de pisos y la configuración espacial para definir el nivel de vulnerabilidad, especialmente ante aceleraciones significativas.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

[32] centrados en edificios de mediana altura, subrayan el papel de los sistemas de contraviento y los detalles de conexión, sugiriendo que incluso estructuras relativamente nuevas pueden presentar deficiencias si carecen de mecanismos eficientes para disipar energía.

En su investigación sobre edificios de mampostería no reforzada en Pakistán y zonas cercanas, [33] analiza cómo esta tipología estructural exhibe desplazamientos y fuerzas de corte significativamente mayores durante eventos sísmicos, lo que incrementa considerablemente la probabilidad de daño o colapso. El autor emplea análisis no lineales mediante historia de tiempo y evaluaciones probabilísticas, hallando que "unreinforced masonry low-rise buildings display higher displacements and shear force", lo cual se traduce directamente en vulnerabilidad estructural elevada.

Según [34], uno de los factores estructurales que más influye en la vulnerabilidad sísmica de edificaciones patrimoniales es la rigidez inicial del sistema. A través de ensayos realizados en mesa vibratoria sobre construcciones tradicionales de mampostería en Portugal, los autores observaron que las estructuras con menor rigidez tienden a sufrir desplazamientos más amplios y un patrón de daño más severo durante un sismo. Además, identificaron que el agrietamiento progresivo y la degradación de componentes como los muros de piedra o los forjados de madera aumentan el riesgo de colapso. Estos resultados, evaluados mediante el estándar europeo EMS-98, evidencian que la pérdida de rigidez no solo compromete el comportamiento estructural, sino que incrementa significativamente la vulnerabilidad sísmica del edificio. Según [34], otro factor clave que influye en la vulnerabilidad sísmica es la configuración estructural a escala urbana. Mediante un enfoque asistido por computadora, los autores aplicaron modelos detallados y validaron su procedimiento en un caso práctico urbano, demostrando que la interacción entre diferentes edificaciones, la densidad de construcción y la variabilidad en la geometría (por ejemplo, alturas, tipos estructurales y rigideces) impacta significativamente en la evaluación del riesgo sísmico. Esta metodología permite capturar no solo el comportamiento aislado de cada edificio, sino también los efectos colectivos —como amplificación local de ondas y daños acumulativos—, resaltando que una vulnerabilidad adecuada no depende únicamente del tipo de estructura individual, sino también de su contexto urbano.

Según [35] la geometría compleja y la calidad deteriorada del material estructural son factores fundamentales que incrementan la vulnerabilidad sísmica de los edificios históricos. En su estudio, los investigadores evaluaron dos basílicas emblemáticas italianas mediante reconstrucción de geometría con escáner láser y análisis numéricos no lineales. Observan que irregularidades en la forma, muros esbeltos y techos sin rigidez transversal generan mecanismos de colapso concentrados en pilares principales del transepto. Además, el desgaste del material, causado por la antigüedad y el tiempo, reduce la resistencia y rigidez, lo que acentúa los movimientos y daños ante cargas sísmicas intensas.

Según [36] la configuración estructural común en Quito —compuesta por marcos de concreto reforzado sin ductilidad, losas planas y muros de albañilería no armada— presenta una alta vulnerabilidad sísmica debido a su limitada capacidad para disipar energía y controlar deformaciones. Su estudio, realizado mediante un análisis probabilístico con historiales de tiempo no lineales, revela que más del 80 % de estas edificaciones sufrirían daños extensos y cerca del 45 % podrían colapsar ante un sismo con periodo de retorno de 475 años. Además, calcularon una tasa media anual de pérdida estructural del 0,16 %, lo cual refleja no solo una alta exposición sino también la magnitud de las pérdidas económicas asociadas. Esta investigación destaca que la tipología de forjados planos y muros de cierre no armados contribuye significativamente a la fragilidad estructural y subraya la necesidad de implementar estrategias de refuerzo y revisión normativa en sistemas vulnerables como el ecuatoriano.

Según Gülay et al [37] integran múltiples dimensiones —geométricas, estructurales y topográficas— en el método P25, mostrando cómo la interacción entre columnas cortas, muros de corte mal ubicados, irregularidades planas y efectos de sitio amplificadores actúan de manera sinérgica para elevar la vulnerabilidad. Así, más allá de identificar factores individuales, los estudios revelan que es su interacción acumulativa y contextualizada lo que determina la fragilidad sísmica real de una edificación. Según Khattak et al.[38], los factores estructurales que influyen significativamente en la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería no reforzada (URM) incluyen, en primer lugar, el tipo de piso utilizado: los forjados de bloques cerámicos huecos presentan mayor vulnerabilidad debido a sus propiedades materiales inferiores y baja ductilidad, lo que favorece modos de falla tanto en plano como fuera de plano; por otro lado, los losas de hormigón armado cast-in-situ, aunque más resistentes y dúctiles, pueden incrementar la vulnerabilidad sísmica debido a su elevado peso. Asimismo, la altura del edificio (denominada factor P_2 en el estudio) emerge como un elemento clave que condiciona la respuesta sísmica general de la estructura regional abordada.

Según Fiore et al. [39], un factor estructural decisivo que afecta la vulnerabilidad sísmica es la variación no uniforme de las propiedades estructurales a lo largo de la altura del edificio, lo cual es captado

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

mediante un modelo equivalente de viga inelástica no uniforme que representa el comportamiento dinámico no lineal de edificios pluripiso; estas variaciones generan concentraciones de demanda en zonas específicas, lo que incrementa la susceptibilidad a modos de fallo localizados, especialmente en elementos que presentan rigidez o ductilidad atípica en comparación con el resto de la estructura. La vulnerabilidad sísmica está fuertemente influenciada por características estructurales específicas. En edificios de mampostería, la complejidad de sus materiales y múltiples mecanismos de daño, tanto en plano como fuera de plano, dificultan su evaluación con métodos tradicionales. Mediante técnicas avanzadas de Machine Learning, se ha identificado un subconjunto de factores clave fácilmente medibles en sitio que correlacionan con la vulnerabilidad sísmica y permiten evaluaciones eficientes a gran escala [40].

Además, la geometría y configuración estructural juegan un papel importante. Edificaciones de concreto armado con formas irregulares, como los edificios en "T", presentan distribuciones no uniformes de masa y rigidez, lo que genera mayores demandas por torsión y, en consecuencia, mayor vulnerabilidad. Estudios muestran que el efecto combinado de la altura y el factor de reducción de respuesta (R-factor) afecta directamente el índice de daño y la vulnerabilidad sísmica, aumentando el riesgo en edificios más altos o con factores R elevados [41]. Los sistemas de aislamiento inter-piso pueden amplificar las demandas sísmicas en lugar de reducirla cuando se someten a movimientos de pulso cercanos a fallas [42], las fluctuaciones térmicas alteran las propiedades de materiales, modificando la respuesta sísmica en regiones con alta variabilidad climática[43] .

El trabajo de [44] identifica en las edificaciones de concreto armado la configuración geométrica, la regularidad en planta y altura, y el estado de los elementos estructurales como variables críticas para la evaluación rápida de riesgo, resaltando la influencia de irregularidades estructurales en la amplificación de daños. De forma complementaria, [45] enfatiza en la tipología estructural, la resistencia de materiales y la antigüedad de los hospitales como condicionantes que inciden en su desempeño, subrayando que la aplicación parcial de normas sismorresistentes incrementa la exposición a fallas en elementos de carga.

Asimismo, en edificaciones históricas de mampostería, [46] señala la calidad y el espesor de los muros, junto con la ausencia de refuerzos, como factores que incrementan la vulnerabilidad, mientras que en construcciones residenciales de Surakarta, [47] destaca la influencia de materiales de baja calidad, configuraciones estructurales deficientes y antigüedad de las edificaciones como elementos que limitan su resistencia ante sismos. Por su parte, [48] sobre marcos de acero de gran altura con amortiguadores viscoelásticos pone de relieve que la rigidez estructural y la incorporación de sistemas de disipación influyen significativamente en la reducción de daños, evidenciando que las soluciones tecnológicas innovadoras pueden mitigar las deficiencias inherentes al diseño original, mientras que [49] demuestra que en edificaciones de mampostería la pérdida de capacidad portante y la reducción del "espacio de vida" están directamente vinculadas al tipo de material y a la ausencia de elementos de refuerzo. Diversos factores estructurales inciden directamente en la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones. La antigüedad del edificio, el tipo de materiales empleados y la calidad constructiva han sido identificados como determinantes en la respuesta sísmica, especialmente en construcciones antiguas que no fueron diseñadas bajo criterios modernos [50]. En el caso de edificaciones de mampostería, la irregularidad en la disposición de los elementos y el tipo de suelo donde se asientan amplifican la vulnerabilidad, siendo más crítico en suelos blandos [51]. Por otro lado, en edificios de concreto reforzado, la asimetría en planta y altura, así como la distribución de masas y rigidez, incrementan el riesgo de daño estructural significativo durante un sismo [52], [53]. Además, la geometría y materiales históricos de edificaciones patrimoniales como iglesias también representan un factor clave [54]. Finalmente, la falta de datos y el desconocimiento sobre las características estructurales de construcciones antiguas constituyen un desafío adicional en la evaluación de la vulnerabilidad [55].

Por su parte [56] identifica que las tensiones dinámicas en techos flotantes durante terremotos, particularmente en la interfaz cubierta-pontón y en la parte interior del techo, son factores críticos que afectan su vulnerabilidad sísmica. El tipo de cubierta y la intensidad del movimiento del suelo (especialmente en eventos cercanos a la fuente) son determinantes clave. Según [57] que el confinamiento con estribos en pilares de tubos de acero rellenos de hormigón (CFST) reduce significativamente la vulnerabilidad sísmica al disminuir la magnitud de los desplazamientos, mitigar la degradación de rigidez y aliviar la formación de vacíos durante eventos sísmicos. Según[58] identifica que los materiales de construcción y la configuración tipológica son factores clave que afectan la respuesta sísmica de edificios de mampostería histórica en Meta (Italia). Se analizan específicamente tres tipologías de mampostería (MUR1, MUR2, MUR3) con diferentes probabilidades de exceder estados de daño. Por su parte [59] identifica que los edificios educativos de mampostería en Mostaganem presentan índices de vulnerabilidad entre 0.6 y 1.10, con daños moderados a graves esperados para intensidades sísmicas >8 (EMS-98), particularmente en construcciones antiguas no diseñadas con criterios sísmicos. Por su parte, [60] identifica

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

que los sistemas estructurales (TRCs y BFMs) y su periodo de construcción son factores determinantes de vulnerabilidad sísmica en estructuras de hormigón armado chinas, estableciendo matrices de predicción de fragilidad para diferentes intensidades sísmicas según el estándar macrointensidad de China. Y finalmente, según Baquedano-Juliá et al. [61], dentro de los factores estructurales que afectan la vulnerabilidad sísmica en centros históricos, se destacan la mala calidad constructiva, manifestada en materiales deficientes, práctica deficiente en el aparejo y conexiones débiles entre muros; esta combinación propicia la activación de mecanismos de falla tanto fuera del plano como de cizallamiento en el plano, debido a la falta de cohesión estructural y a las debilidades en las vinculaciones entre los muros históricos de tierra y madera presentes en La Serena

Tabla 1 enfoques y hallazgos principales

Referencias	Enfoque / Hallazgos principales
[27]	Influencia del periodo de vibración, rigidez global, tipo de suelo y antigüedad del edificio.
[28]	Baja rigidez lateral, ductilidad reducida, informalidad en construcción.
[29]	Índices de vulnerabilidad: configuración estructural + condiciones geotécnicas.
[30]	Deficiencia en refuerzo de columnas/vigas, desplazamientos inter-piso.
[31]	Tipología (adobe/albañilería), número de pisos y configuración espacial.
[32]	Sistemas de contraviento y detalles de conexión en edificios medianos.
[33]	Vulnerabilidad de mampostería no reforzada (URM) en Pakistán.
[34]	Pérdida de rigidez en edificaciones patrimoniales y agrietamiento progresivo.
[35]	Interacción urbana: densidad, geometría variable, amplificación de ondas.
[36]	Geometría compleja, deterioro de materiales en edificios históricos.
[37]	Forjados planos + muros no armados → alta vulnerabilidad en Quito.
[38]	Interacción de columnas cortas, irregularidades planas y efectos de sitio.
[39]	Deficiencias en edificios pre-normativos en Zagreb, Croacia.
[40]	Identificación de parámetros clave que influyen en daños in-plane y out-of-plane en mampostería histórica, usando Machine Learning para facilitar evaluaciones precisas y a gran escala
[41]	Efecto combinado de la altura y factor R en edificios con geometría irregular “T”, aumentando demandas torsionales y la probabilidad de daño estructural
[42]	Amplifica demandas sísmicas en sismos cercanos a fallas (↑40% torsión).
[43]	Alteran propiedades de materiales, modificando respuesta sísmica.
[44]	Método rápido con IA identifica vulnerabilidad sísmica en concreto armado
[45]	ATC-21 revela deficiencias estructurales en hospitales de Kabul.
[46]	Iglesias de mampostería vulnerables por muros débiles y sin refuerzo.
[47]	Viviendas de Surakarta afectadas por materiales pobres y diseños deficientes.
[48]	Amortiguadores viscoelásticos mejoran desempeño sísmico en marcos de acero.
[61]	Fallas graves por ausencia total de normativa en Albania.
[50]	Reforzamiento necesario por escasa aplicación de normas; falta de detalle sobre tipos de fallas.
[56]	Tensiones dinámicas en techos flotantes (interfaz cubierta-pontón y zona interior), especialmente críticas en sismos cercanos y techos de un piso.
[57]	Los pilares CFST reduce desplazamientos, degradación de rigidez y formación de vacíos durante sismos, mejorando su resistencia sísmica.
[58]	Materiales de construcción y configuración tipológica en edificios históricos de mampostería (tipologías MUR1-MUR3), que determinan distintos niveles de daño sísmico.
[59]	Edificios educativos de mampostería en Mostaganem muestran alta vulnerabilidad (índices 0.6-1.10), con daños moderados/graves ante sismos >8 EMS-98, especialmente en construcciones antiguas sin diseño sísmico.
[60]	El estudio determina que el tipo de sistema estructural (TRCs y BFMs) y la antigüedad de construcción son factores clave que influyen en la vulnerabilidad sísmica de estructuras de

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Referencias	Enfoque / Hallazgos principales
	hormigón armado en China, desarrollando modelos predictivos para diferentes niveles de intensidad sísmica.
[50]	Colapso de muros reduce espacio vital y aumenta fatalidades sísmicas.

5.2. ¿Hasta qué punto las normas de diseño sismoresistente han sido aplicados en las edificaciones?

La aplicación de normas sismorresistentes se presenta en los estudios como una herramienta clave tanto para el diseño como para la evaluación del desempeño estructural. Sin embargo, su implementación varía significativamente según el contexto y el objetivo metodológico de cada investigación. [27] representa el enfoque más normativo, utilizando espectros del Eurocódigo 8 para analizar el comportamiento sísmico mediante modelos no lineales, lo cual permite una evaluación directa del cumplimiento frente a exigencias normativas. Este modelo se contrapone parcialmente al enfoque de Chaulagain, quienes, si bien no aplican códigos explícitos, comparan edificaciones diseñadas y no diseñadas, demostrando que las construcciones informales superan ampliamente los límites aceptables de deriva, validando indirectamente la relevancia de las normativas.

A partir de este contraste, se observa cómo otros autores adoptan posiciones metodológicas más intermedias o flexibles. Lantada et al. [29] adoptan una posición más flexible, utilizando herramientas como VIM y CSBM que, aunque no derivan directamente de normas específicas, se alinean con principios normativos al incorporar espectros de demanda y datos históricos. Esto sugiere una adaptación metodológica a contextos donde las normas no son universalmente aplicables. En esta línea, Thermou y Pantazopoulou [30] desarrollan índices de evaluación que reflejan el grado de cumplimiento de estándares como EN 1998-3 y ASCE 41, proponiendo una forma intermedia de medición del riesgo basada en desempeño. Matsuzaki et al.[31], por su parte, emplean curvas de fragilidad fundamentadas en PGA y PGV, parámetros utilizados globalmente para estimar la probabilidad de colapso según tipología estructural, lo cual permite calibrar medidas normativas frente a condiciones locales.

En consecuencia, se refuerza una tendencia hacia modelos de evaluación por desempeño. Saitta et al. [32]refuerzan esta tendencia implementando análisis pushover y no lineales que permiten verificar límites de deformación propuestos por normas internacionales. Finalmente, el enfoque de Gülay et al. [37]con el método P25 busca precisamente suplir la ausencia o dificultad de aplicar normas completas, proponiendo una metodología simplificada que, sin recurrir a cálculos complejos, traduce los principios normativos a indicadores empíricos observables. En conjunto, los estudios no solo confirman la utilidad de las normas, sino que reflejan su necesaria reinterpretación frente a las limitaciones técnicas, sociales y económicas de cada contexto. Ahora bien, la aplicación real de estas normas en distintos entornos urbanos revela importantes desafíos. Según Raza, Butt, Ahmad y Waqas [62], en Mingora (Pakistán), a pesar de que las normas sismorresistentes —como FEMA P-154 y códigos nacionales conformes con ACI, AISC y ASTM— han sido incorporadas en la reglamentación, en la práctica su aplicación es muy parcial. De una evaluación rápida en 210 edificios, más del 90 % presentó irregularidades planas o verticales (como columnas cortas o pisos blandos) y recibió calificaciones altas de daño, mientras que aproximadamente el 53 % fueron construcciones anteriores a los códigos vigentes. Además, la calidad deficiente de construcción y falta de mantenimiento se reflejaron en daños en un 37 % de las estructuras. Esto indica que, aunque las normas existen, su efectiva adopción en el parque edilicio es limitada y las edificaciones siguen siendo altamente vulnerables a sismos.

Una situación similar se presenta en Europa. Según Šavor Novak, Uroš, Demšić, Rundek [63], en la ciudad de Zagreb (Croacia) gran parte del parque edilicio consiste en estructuras de mampostería y hormigón reforzado construidas antes de la adopción de normas sísmicas modernas. Su estudio tipológico revela que muchos edificios presentan deficiencias como muros no reforzados, hormigón de baja calidad, falta de arriostramientos y juntas constructivas inadecuadas. Aunque se introdujeron códigos sísmicos en Croacia después de 1981, los acontecimientos sísmicos de 2020 dejaron en claro que solo las edificaciones diseñadas siguiendo estándares modernos (post-1981) mostraron un comportamiento satisfactorio durante los sismos; por el contrario, las estructuras más antiguas fallaron con frecuencia, lo que evidencia que la simple existencia de normas no asegura su aplicación efectiva, especialmente en construcciones previas o con supervisión técnica deficiente.

Según Zucca et al. [64], aunque las directrices del Código Italiano de Edificación se utilizaron como referencia para llevar a cabo los análisis dinámicos no lineales, los resultados revelan que las

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

edificaciones históricas estudiadas —las basílicas de Santa Maria Novella y Santa Maria di Collemaggio— presentan índices de riesgo significativamente por debajo de 1 (0.267 y 0.287, respectivamente), lo que indica que no cumplen con los requisitos exigidos por la normativa vigente. En consecuencia, y pese a aplicar formalmente el marco normativo, la práctica evidencia una aplicabilidad insuficiente en estructuras patrimoniales complejas, debido a su geometría irregular, materiales envejecidos y configuraciones estructurales altamente heterogéneas. Según Harati y van de Lindt [65], si bien las normativas sismorresistentes contemporáneas —especialmente aquellas basadas en el enfoque de Ingeniería Sísmica Basada en el Desempeño (PBEE)— constituyen la base para desarrollar funciones de fragilidad que estiman la vulnerabilidad sísmica y resiliencia estructural a nivel comunitario, su aplicación práctica en estructuras reales es limitada, sobre todo cuando se trata de secuencias sísmicas principales y réplicas (mainshock-aftershock). Los autores subrayan que las normativas tradicionales suelen enfocarse en evaluaciones estáticas o de un solo evento sísmico, mientras que su metodología extendida, aplicada mediante herramientas como la plataforma IN-CORE, muestra que los efectos acumulativos de réplicas posteriores agravan significativamente los estados de daño y las pérdidas económicas, revelando una laguna entre la normativa vigente y la cobertura precisa de escenarios sísmicos multi-evento.

Según Aloschi et al. [66], aunque Montenegro ha compartido históricamente códigos sísmicos con otros países de la antigua Yugoslavia—desde las regulaciones de 1948 hasta la adopción del Eurocódigo EN 1998—la aplicación efectiva de dichas normas en el parque construido actual es limitada. Esto se evidencia en la persistencia de tipologías constructivas más antiguas como mampostería no reforzada (URM) con diseño sísmico mínimo o nulo, y mampostería confinada diseñada con códigos de bajo nivel implementados entre 1961 y 1964. En este contexto, los autores proponen un modelo de vulnerabilidad heurístico que incorpora esa brecha normativa, calibrado con datos del terremoto histórico de 1979, lo que subraya una deficiencia en la real adhesión a la normativa sismorresistente en muchas edificaciones existentes. Solo el 30% de los marcos de hormigón armado (RC) evaluados cumplen con estándares de desempeño sísmico actuales, requiriendo métodos de evaluación específicos [67].Las herramientas como los desarrollados para estructuras regionales revelan que las normas no consideran adecuadamente la peligrosidad sísmica local[68].

La aplicación de normas de diseño sismorresistente varía considerablemente según la antigüedad y el tipo de edificación. En países como Bulgaria, se observa una limitada implementación de normas en edificios antiguos, lo que incrementa la necesidad de intervenciones de reforzamiento [50]. En contraste, las edificaciones más recientes en Turquía han incorporado regulaciones modernas, aunque se detectan inconsistencias en la calidad de ejecución y supervisión [52]. En el caso de edificios patrimoniales, como las iglesias históricas de Rumania, las normas actuales no fueron aplicadas originalmente, lo que dificulta su adaptación a los estándares de seguridad sísmica contemporáneos [54]. Por otra parte, en ciudades como Osijek (Croacia), la aplicación de normas depende principalmente del año de construcción, existiendo un alto grado de heterogeneidad en la resistencia sísmica del parque edificatorio [55]. Finalmente, otro caso ilustrativo lo expone Deneko [33] ,quien analizó las consecuencias del terremoto de magnitud 6,4 ocurrido en Albania en noviembre de 2019. Su estudio evidenció que numerosas edificaciones de mampostería no reforzada (URM) no habían sido diseñadas ni construidas conforme a normas sismorresistentes modernas. La evaluación en campo mostró que estructuras que carecían de conexiones eficientes entre muros y techos, vigas de amarre o cadenas perimetrales, presentaron fallas graves incluso con movimientos moderados. Esto confirma que la ausencia de elementos normativos básicos deriva en modos de fallo severos. Tales deficiencias reflejan un bajo grado de implementación normativa en estas construcciones, evidenciando la necesidad de fortalecer prácticas de diseño y refuerzo, como el uso de uniones adecuadas, arriostramientos y materiales compuestos.

Tabla 2 Resumen de respuestas citadas de autores a la segunda pregunta

Referencia	Aplicación normativa
[27]	Uso explícito de Eurocódigo 8 en modelos no lineales.
[28]	Comparación indirecta de edificios diseñados vs. no diseñados.
[29]	Herramientas alineadas con principios normativos (VIM, CSBM).
[30]	Índices con referencia a EN 1998-3 y ASCE 41.
[31]	Uso de PGA/PGV para calibrar normativa con condiciones locales.
[32]	Análisis pushover para validar límites normativos de deformación.
[38]	Método P25: traducción empírica de principios normativos.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ISSN: 3028-9882/ https://doi.org/10.70504/xxxx
© 2024 Ho nexus.

Referencia	Aplicación normativa
[39]	Baja aplicación práctica de códigos como FEMA P-154 en Pakistán.
[40]	Deficiencias en edificios pre-normativos en Zagreb, Croacia.
[41]	Fallas graves por ausencia total de normativa en Albania.
[67]	Solo 30% de marcos RC cumplen estándares actuales.
[68]	Exponen desconexión entre normativas y peligrosidad sísmica local.
[54]	Normas modernas no aplicadas a edificios patrimoniales

5.3. ¿Cuáles son los tipos de fallas estructurales más comunes durante los sismos?

Los mecanismos de falla reportados en los estudios reflejan la convergencia de múltiples factores estructurales y deficiencias constructivas, que se expresan de manera distinta según la tipología edilicia y la intensidad sísmica. Kappos [27] advierte sobre el deterioro progresivo de la rigidez estructural, especialmente en edificaciones antiguas y ubicadas sobre suelos amplificadores, donde los daños, aunque no impliquen colapso total, reducen significativamente la capacidad de respuesta. En un enfoque más empírico, Chaulagain et al. [28] describen desplazamientos inter-piso excesivos y mecanismos de piso blando como síntomas típicos en edificios sin diseño formal, agravados por daño concentrado en columnas principales. Complementando estas observaciones, la perspectiva de Lantada et al.[29] agrega el análisis del comportamiento de muros no reforzados y las debilidades en conexiones, aspectos que se vuelven aún más críticos en edificaciones con materiales frágiles o deteriorados. En esta misma línea de análisis detallado, Thermou y Pantazopoulou [30] profundizan en los modos de colapso observados, describiendo la formación de rótulas plásticas en elementos primarios y fracturas frágiles en zonas con baja confinación. Estos hallazgos alertan sobre la relación directa entre un diseño estructural inadecuado y la aparición de mecanismos no ductiles durante un evento sísmico.

A partir de estudios post-sismo, Matsuzaki et al. [31] documentan el colapso total en estructuras de adobe y daños generalizados en albañilería en la ciudad de Pisco, lo cual pone de manifiesto que la falta de integración entre elementos estructurales y no estructurales agrava severamente la respuesta sísmica de los edificios. De manera técnica, Saitta et al. [32] identifican zonas de concentración de deformación plástica en plantas bajas y fallas en sistemas de contraviento, comprometiendo la capacidad de disipación de energía de la estructura. En términos de clasificación de fallas, Gülay et al. [37] enumeran un conjunto amplio de fenómenos estructurales adversos como columnas cortas, pounding, licuefacción y plantas débiles— que, en conjunto, representan colapsos inducidos tanto por errores de diseño como por la interacción dinámica entre edificaciones vecinas. Este enfoque integrador permite concluir que las fallas más comunes no deben entenderse de manera aislada, sino como manifestaciones de vulnerabilidades acumuladas, que se agravan cuando coinciden condiciones de diseño deficiente, materiales inadecuados y suelos desfavorables.

Desde un enfoque de análisis computacional, Olteanu, Barbat y Budescu [69] explican que las fallas estructurales más frecuentes en marcos de concreto armado durante sismos están fuertemente asociadas con rasgos geométricos que condicionan los mecanismos de rotura: espesores de losa insuficientes que comprometen la rigidez, edificios altos con mayores desplazamientos laterales, y configuraciones planimétricas irregulares que concentran tensiones en zonas críticas. A través de simulaciones pushover con SAP2000, identificaron fallas prematuras tales como giros plásticos en vigas y columnas, colapsos parciales por corte excesivo y fallos torsionales. Estos comportamientos se reflejan en curvas de vulnerabilidad más elevadas, por lo que los autores enfatizan en la necesidad de mejorar el espesor de losas, controlar la relación altura-ancho y regularizar las plantas para reducir significativamente la probabilidad de falla sísmica. Además, Parizat et al. [70], el estudio revisa la vulnerabilidad sísmica de un edificio de apartamentos de hormigón armado diseñado únicamente para cargas gravitacionales (modelo pre-código), destacando que los modos de falla más comunes incluyen grietas moderadas en el concreto (estado de daño DS2), desprendimientos del recubrimiento que exponen la armadura transversal y longitudinal, y aplazamiento de barras debido a la falta de ductilidad. Estas fallas son particularmente relevantes en estructuras construidas sin criterios de capacidad sísmica adecuados, lo que conlleva un desempeño sísmico insuficiente incluso ante solicitaciones sísmicas débiles.

Según Ahmadi et al.[71], aunque su estudio está enfocado en el análisis de vulnerabilidad sísmica urbana mediante métodos de filtrado espacial (Eigenvector Spatial Filtering) en el caso de Izmir, Turquía, también destacan que entre los indicadores estructurales más relevantes para predecir la vulnerabilidad se

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

encuentran la altura del edificio, la aceleración máxima del suelo (PGA) y el lugar de evacuación o puntos de reunión, ya que estos factores afectan directamente la propensión a distintos modos de falla estructural, como el colapso por exceso de carga inercial en edificios altos, la pérdida de estabilidad debido a vibraciones intensas, y la vulnerabilidad de evacuación en estructuras dañadas por rigidez insuficiente o conexiones frágiles. En este sentido, los autores sugieren que estos parámetros estructurales son claves para determinar la exposición al daño, incluso si el estudio no detalla explícitamente los modos de falla, aportando una visión integrada de factores estructurales y funcionales que pueden predisponer a fallas críticas durante un sismo.

Por otro lado, las fallas más comunes incluyen colapsos por deficiencias en el refuerzo y detallado en estructuras de concreto armado, fracturas y desplomes en muros de mampostería sin reforzar, y daños severos en estructuras de madera. Estas fallas están asociadas principalmente con incumplimiento normativo y diseño estructural inadecuado [72]. Asentamientos diferenciales que causan fracturas en cimentaciones y elementos estructurales en el 78% de casos estudiados[73]. Otro tipo de daño característico está asociado a la torsión inducida por la incidencia oblicua de las ondas sísmicas., cuando el movimiento no proviene perpendicularmente a la fachada, se genera un acoplamiento entre traslación y rotación en planta, lo que concentra esfuerzos en columnas y vigas alejadas del centro de rigidez [74]. Las fallas estructurales más frecuentes varían según el sistema constructivo. En edificaciones de mampostería, los daños suelen manifestarse como grietas y colapsos parciales de muros, especialmente en aquellas con irregularidades o asentadas sobre suelos blandos [51]. En edificios de concreto reforzado, las fallas más comunes incluyen el colapso de columnas, fallas en los nudos y desplazamientos excesivos debido a la asimetría estructural [52], [53]. Las iglesias históricas presentan grietas en bóvedas y desplomes de paredes, reflejando la vulnerabilidad de los materiales y técnicas tradicionales frente a movimientos sísmicos [55].

Finalmente, Yadollahi[34] introduce una perspectiva centrada en la evaluación rápida de vulnerabilidad (RVS), destacando que una de las fallas críticas durante los sismos está vinculada a esta metodología de identificación temprana de edificaciones con alto riesgo de colapso. Su estudio demuestra que la sismicidad regional es uno de los factores más determinantes en el puntaje de vulnerabilidad, con un peso específico de 0,4033. Esto implica que la combinación de condiciones sísmicas severas con elementos estructurales deficientes —como muros con juntas pobres, estructuras irregulares o sin arriostramientos— incrementa significativamente el riesgo de colapso. Así, se refuerza la idea de que los fallos estructurales no suelen originarse en un solo defecto, sino en la interacción entre factores sísmicos y deficiencias acumuladas en el diseño o la construcción.

5.4. ¿Principales desafíos en la reducción de la vulnerabilidad sísmica?

La mitigación del riesgo sísmico enfrenta retos que trascienden el ámbito puramente técnico, abarcando barreras institucionales, sociales y económicas que limitan la capacidad de intervención efectiva. Kappos [27] enfatiza la necesidad de priorizar el reforzamiento de edificios antiguos mediante simulaciones urbanas y mapas de microzonificación sísmica, dentro de un enfoque de planificación estratégica y modelos de gestión. En un escenario más crítico, Chaulagain et al. [28] denuncian la proliferación de edificaciones informales, carentes de supervisión profesional y control de calidad, lo que plantea la urgencia de implementar intervenciones estructurales específicas y campañas de concienciación orientadas a reducir el riesgo.

En cuanto a los factores que incrementan la vulnerabilidad sísmica, Aghabeigi y Farahmand-Tabar [75] destacan la fragilidad de las construcciones históricas debido a materiales y sistemas constructivos tradicionales, lo que demanda métodos especializados de evaluación y reforzamiento para preservar su integridad estructural y valor patrimonial. Ravankhah et al. [76] subrayan que la gestión del riesgo en este tipo de edificaciones requiere marcos de evaluación basados en indicadores adaptados a las condiciones culturales, constructivas y socioeconómicas, ya que las metodologías genéricas pueden generar diagnósticos poco precisos. Kechidi et al. [77] señalan que la escasez de datos fiables sobre la exposición y las características constructivas es una barrera para el modelado de daños y la estimación realista del riesgo, especialmente en construcciones no diseñadas para resistir sismos. En esa línea, Giordano et al. [78] evidencian que las curvas de fragilidad genéricas tienden a subestimar la vulnerabilidad de edificaciones no ingenierizadas, como la albañilería no reforzada, lo que hace necesario desarrollar modelos calibrados a cada tipología y región. Mulas et al. [56] complementan que la rehabilitación de edificios de concreto armado con deformaciones torsionales supone desafíos técnicos complejos, que requieren soluciones estructurales específicas y adaptadas a sus irregularidades.

Uno de los principales desafíos es la vulnerabilidad combinada a incendios post-sísmicos. Se han desarrollado metodologías que integran análisis sísmicos y evaluación de fuentes de ignición para crear curvas de vulnerabilidad específicas por piso, facilitando la gestión del riesgo y respuesta ante incendios

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

tras un sismo [79]. Además, la alta vulnerabilidad de edificios históricos sin refuerzo, debido a características constructivas antiguas y falta de cumplimiento normativo, representa un desafío para su conservación y la planificación de intervenciones efectivas [80]. Finalmente, la aplicación generalizada de modelos de vulnerabilidad sísmica puede conducir a errores si no se consideran las condiciones regionales específicas, como el tipo de suelo y las características constructivas locales, que influyen considerablemente en la fragilidad y daño observado en diferentes tipologías de edificios [81]. El principal desafío identificado es la necesidad de desarrollar curvas de fragilidad precisas para la gestión del riesgo sísmico en puentes, donde los análisis estáticos no lineales proporcionan resultados conservadores en comparación con los análisis de historia temporal no lineal [82]

El estudio destaca el desafío de evaluar adecuadamente la vulnerabilidad de estructuras con pisos blandos mediante funciones de fragilidad, identificando que las excitaciones mixtas proporcionan estimaciones conservadoras para estados de daño severo en zonas near field [83]. El principal desafío identificado es la falta de modelos de vulnerabilidad sísmica integrales en los Balcanes, solventado mediante un enfoque heurístico que combina modelos de referencia regionales con datos reales de daños para desarrollar modelos híbridos específicos para Montenegro[84].

Entre los principales desafíos destacan la falta de recursos económicos y técnicos para la modernización y reforzamiento de edificaciones existentes, especialmente en países con un alto porcentaje de construcciones antiguas [50]. La incertidumbre derivada del bajo nivel de conocimiento técnico y la carencia de información detallada sobre las características estructurales de muchos edificios dificultan la correcta evaluación de la vulnerabilidad [51], [55]. En el caso de edificios históricos, existe una tensión entre la preservación patrimonial y la necesidad de mejorar la seguridad sísmica [54]. Además, la dificultad para modelar de manera precisa el comportamiento real de edificaciones asimétricas bajo cargas sísmicas representa un reto técnico importante [53]. Finalmente, los métodos de evaluación rápida, aunque útiles, no siempre logran detectar todas las vulnerabilidades presentes en las edificaciones [52].

Según Basaglia et al. [85], un desafío esencial en la evaluación a escala urbana del riesgo sísmico es la integración de modelos numéricos eficientes que permitan estimar el daño y planificar intervenciones colectivas. Su propuesta, el método MURA-SH, incorpora índices de vulnerabilidad distribuidos multidireccionalmente y evalúa la confiabilidad del sistema urbano en función de condiciones límite como emergencia, salvamento y daño, apoyándose además en representaciones GIS para visualizar zonas críticas

Según Malczewski et al. [86], la reducción de la vulnerabilidad sísmica enfrenta desafíos como la alta incertidumbre asociada a la evaluación multicriterio en entornos urbanos, especialmente cuando la calibración de parámetros subjetivos —como el grado de optimismo o pesimismo en el operador OWA— influye significativamente en los resultados. De manera complementaria, Nath et al. [87] señalan que en contextos metropolitanos la integración de datos geotécnicos, estructurales y socioeconómicos en modelos de microzonificación es compleja debido a la heterogeneidad del tejido urbano, la diversidad tipológica de edificaciones y la densidad poblacional, lo que dificulta no solo la obtención de diagnósticos precisos, sino también la implementación efectiva de mapas de riesgo en políticas públicas de mitigación.

Otros estudios profundizan en la importancia de la percepción del riesgo y el diseño de herramientas de evaluación adaptadas. Lantada et al. [29] advierten sobre la falsa sensación de seguridad en zonas con aparente baja amenaza sísmica, proponiendo metodologías que identifiquen vulnerabilidades ocultas. Thermou y Pantazopoulou [30] desarrollan índices que integran tanto el riesgo estructural como el deterioro acumulado, facilitando la selección de estrategias de reforzamiento. Matsuzaki et al. [31]insisten en adaptar las curvas de fragilidad a condiciones locales, considerando particularidades de suelos o materiales tradicionales como el adobe, mientras que Saitta et al. [32] resaltan la importancia de fortalecer conexiones y sistemas de contraviento en zonas críticas como la planta baja. Finalmente, Gülay et al. [37] proponen herramientas como el método P25, que permiten evaluaciones rápidas y factibles en contextos con recursos técnicos limitados, siendo especialmente útiles en regiones con alta informalidad constructiva. En conjunto, estas evidencias subrayan que la reducción efectiva de la vulnerabilidad sísmica requiere una articulación multiescalar, combinando análisis técnico, planificación urbana, fortalecimiento institucional y apropiación social del riesgo.

6. Conclusión

Luego de una rigurosa revisión de 57 estudios sobre la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en edificaciones, se concluye que, aunque existen avances metodológicos significativos y tecnologías emergentes prometedoras, aún persisten brechas importantes entre la teoría técnica y su aplicación práctica,

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

sobre todo en regiones con alto grado de informalidad constructiva. Los enfoques más recientes han logrado integrar modelos computacionales, inteligencia artificial y sistemas de información geográfica, permitiendo diagnósticos más rápidos y precisos, pero su implementación sigue siendo limitada por la falta de normativas adecuadas, recursos técnicos y datos estructurales confiables.

Muchos autores coinciden en que los factores estructurales más determinantes en la vulnerabilidad sísmica son la calidad de los materiales, la configuración arquitectónica y, sobre todo, el cumplimiento de las normas sismorresistentes. En países como Perú, la informalidad en la construcción representa un desafío crítico que aumenta exponencialmente el riesgo de colapso ante un sismo. También se destaca la importancia de adaptar los métodos de evaluación a los contextos locales, pues no todas las metodologías desarrolladas en países industrializados son directamente aplicables a entornos vulnerables o con escasa planificación urbana.

Se recomienda continuar profundizando en metodologías que combinen análisis estructural con variables socioeconómicas, así como fomentar la colaboración entre investigadores, entidades gubernamentales y profesionales del sector construcción para desarrollar protocolos más accesibles y contextualizados. También es necesario avanzar hacia la estandarización de herramientas y criterios que permitan comparar resultados entre regiones y facilitar su aplicación a gran escala, especialmente en edificaciones patrimoniales, hospitales y escuelas.

Finalmente, se sugiere que las futuras investigaciones no solo enfoquen sus esfuerzos en perfeccionar modelos matemáticos o simulaciones, sino también en integrar estrategias de prevención, reforzamiento estructural y participación comunitaria. La vulnerabilidad sísmica no es únicamente un problema técnico, sino un fenómeno multidimensional que debe ser abordado con una mirada integral y sostenida en el tiempo. Solo así se podrá avanzar hacia ciudades más resilientes, infraestructuras más seguras y una reducción efectiva del riesgo ante desastres naturales.

Referencias

[1] J. Douglas, D. M. Climent, C. Negulescu, A. Roullé, y O. Sedan, «Limits on the potential accuracy of earthquake risk evaluations using the L'aquila (Italy) earthquake as an example», *Annals of Geophysics*, vol. 58, n.º 2, pp. 1-17, 2015, doi: 10.4401/AG-6651.

[2] N. Lantada, L. G. Pujades, y A. H. Barbat, «Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison», *Natural Hazards*, vol. 51, n.º 3, pp. 501-524, dic. 2009, doi: 10.1007/S11069-007-9212-4.

[3] J. Garca-Prez, M. Zenteno, y O. Daz, «Vulnerability functions and the influence of seismic design parameters on initial costs for buildings provided with hysteretic energy-dissipating devices», *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 93, pp. 3-12, 2007, doi: 10.2495/ERES070011.

[4] F. Cherifi, M. N. Farsi, S. Kaci, O. Belaidi, y F. Taouche-Kheloui, «Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Structures in Tizi-Ouzou City(Algeria)», *Procedia Eng*, vol. 114, pp. 838-845, 2015, doi: 10.1016/J.PROENG.2015.08.037.

[5] R. P. Nanda y D. R. Majhi, «Rapid seismic vulnerability assessment of building stocks for developing countries», *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, n.º 7, pp. 2218-2226, oct. 2014, doi: 10.1007/S12205-014-0050-0.

[6] M. Boukri, M. N. Farsi, A. Mébarki, y M. Belazougui, «Earthquake damage assessment: A theoretical framework and its application to Algerian buildings», *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, vol. 47, pp. 153-164, 2014, doi: 10.2495/RISK140141.

[7] C. Cuadra, «Seismic vulnerability of historical adobe buildings in the coast of Peru», *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 109, pp. 455-463, 2009, doi: 10.2495/STR090401.

[8] M. Yadollahi, A. Adnan, y R. Zin, «Seismic vulnerability functional method for rapid visual screening of existing buildings», *Archives of Civil Engineering*, vol. 58, n.º 3, pp. 363-377, sep. 2012, doi: 10.2478/V.10169-012-0020-1.

[9] A. Kia y S. Sensoy, «Classification of Earthquake-Induced Damage for R/C Slab Column Frames Using Multiclass SVM and Its Combination with MLP Neural Network», *Math Probl Eng*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/734072.

[10] C. Cuadra, T. Saito, y C. Zavala, «Diagnosis for seismic vulnerability evaluation of historical buildings in Lima, Peru», *Journal of Disaster Research*, vol. 8, n.º 2, pp. 320-327, 2013, doi: 10.20965/JDR.2013.P0320.

[11] R. Ferlito, M. Guarascio, y M. Zucconi, «Assessment of a vulnerability model against post-earthquake damage data: The case study of the historic city centre of L'Aquila in Italy», *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 132, pp. 393-404, 2013, doi: 10.2495/ERES130321.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

[12] F. Saitta, P. Clemente, G. Buffarini, y G. Bongiovanni, «Seismic analysis and retrofit of a mid-rise building», *COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 3909-3918, 2015, doi: 10.7712/120115.3667.925.

[13] S. Karapetrou, M. Manakou, D. Bindi, B. Petrovic, y K. Pitilakis, «"Time-building specific" seismic vulnerability assessment of a hospital RC building using field monitoring data», *Eng Struct*, vol. 112, pp. 114-132, abr. 2016, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.01.009.

[14] M. Remki y D. Benouar, «Damage potential and vulnerability functions of strategic buildings in the city of Algiers», *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, n.º 6, pp. 1726-1734, 2014, doi: 10.1007/S12205-014-0184-0.

[15] M. Salvalaggio, V. Bernardo, y P. B. Lourenço, «Exploring seismic fragility and strengthening of masonry built heritage in Lisbon (Portugal) via the Applied Element Method», *Eng Struct*, vol. 320, dic. 2024, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118890.

[16] I. Iervolino, A. Rosti, A. Penna, y M. Giorgio, «Damage-informed ground motion and semi-empirical fragility assessment», *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 53, n.º 11, pp. 3514-3526, sep. 2024, doi: 10.1002/EQE.4184.

[17] M. R. Delavar, M. Moradi, y B. Moshiri, «Earthquake vulnerability assessment for hospital buildings using a GIS-based group multi criteria decision making approach: A case study of Tehran, Iran», *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 40, n.º 1W5, pp. 153-157, 2015, doi: 10.5194/ISPRSARCHIVES-XL-1-W5-153-2015.

[18] M. Zucca, E. Reccia, E. Vecchi, V. Pintus, A. Dessì, y A. Cazzani, «An Evaluation of the Structural Behaviour of Historic Buildings Under Seismic Action: A Multidisciplinary Approach Using Two Case Studies», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, n.º 22, nov. 2024, doi: 10.3390/APP142210274.

[19] M. Guamán-Naranjo, J. Poveda-Hinojosa, y A. G. Haro-Báez, «Probabilistic Loss Assessment for the Typology of Non-Ductile Reinforced Concrete Structures with Flat Slabs, Embedded Beams, and Unreinforced Infill Masonry», *Buildings 2024, Vol. 14, Page 3158*, vol. 14, n.º 10, p. 3158, oct. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14103158.

[20] P. Baquedano-Juliá, T. M. Ferreira, C. Arriagada-Luco, C. Sandoval, N. C. Palazzi, y D. V. Oliveira, «Multi-vulnerability analysis for seismic risk management in historic city centres: an application to the historic city centre of La Serena, Chile», *Natural Hazards*, vol. 120, n.º 10, pp. 9223-9266, ago. 2024, doi: 10.1007/S11069-023-06008-8.

[21] «(PDF) Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering». Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/302924724_Guidelines_for_performing_Systematic_Literature_Reviews_in_Software_Engineering

[22] M. Petticrew y H. Roberts, «Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide», *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*, pp. 1-336, ene. 2008, doi: 10.1002/9780470754887.

[23] D. Tranfield, D. Denyer, y P. Smart, «Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review», *British Journal of Management*, vol. 14, n.º 3, pp. 207-222, 2003, doi: 10.1111/1467-8551.00375.

[24] M. J. Page *et al.*, «The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews», *BMJ*, vol. 372, mar. 2021, doi: 10.1136/BMJ.N71.

[25] D. Moher *et al.*, «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement», *PLoS Med*, vol. 6, n.º 7, p. e1000097, jul. 2009, doi: 10.1371/JOURNAL.PMED.1000097.

[26] «Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions | Cochrane». Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cochrane.org/authors/handbooks-and-manuals/handbook

[27] A. J. Kappos, «Seismic Vulnerability and Loss Assessment for Buildings in Greece», *Seismic Vulnerability of Structures*, pp. 111-160, mar. 2013, doi: 10.1002/9781118603925.CH3.

[28] H. Chaulagain, H. Rodrigues, E. Spacone, y H. Varum, «Seismic response of current RC buildings in Kathmandu valley», *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 53, n.º 4, pp. 791-818, feb. 2015, doi: 10.12989/SEM.2015.53.4.791.

[29] N. Lantada, L. G. Pujades, y A. H. Barbat, «Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison», *Natural Hazards*, vol. 51, n.º 3, pp. 501-524, dic. 2009, doi: 10.1007/S11069-007-9212-4.

[30] G. E. Thermou y S. J. Pantazopoulou, «Assessment indices for the seismic vulnerability of existing R.C. buildings», *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 40, n.º 3, pp. 293-313, 2011, doi: 10.1002/EQE.1028.

[31] S. Matsuzaki, N. Pulido, Y. Maruyama, M. Estrada, C. Zavala, y F. Yamazaki, «Evaluation of seismic vulnerability of buildings based on damage survey data from the 2007 Pisco, Peru earthquake», *Journal of Disaster Research*, vol. 9, n.º 6, pp. 1050-1058, dic. 2014, doi: 10.20965/JDR.2014.P1050.

[32] F. Saitta, P. Clemente, G. Buffarini, y G. Bongiovanni, «Seismic analysis and retrofit of a mid-rise building», *COMPDYN 2015 - 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 3909-3918, 2015, doi: 10.7712/120115.3667.925.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

[33] E. Deneko y H. Bilgin, «Observed failure modes in existing URM buildings after November 26, 2019 earthquake in Albania», *Research on Engineering Structures and Materials*, vol. 10, n.º 3, pp. 1085-1107, jun. 2024, doi: 10.17515/RESM2024.106EA1202RS.

[34] M. Yadollahi, A. Adnan, y R. Zin, «Seismic vulnerability functional method for rapid visual screening of existing buildings», *Archives of Civil Engineering*, vol. 58, n.º 3, pp. 363-377, sep. 2012, doi: 10.2478/V.10169-012-0020-1.

[35] M. U. Raza, F. Butt, F. Ahmad, y R. M. Waqas, «Seismic safety assessment of buildings and perceptions of earthquake risk among communities in Mingora, Swat, Pakistan», *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 10, n.º 4, abr. 2025, doi: 10.1007/S41062-025-01932-Z.

[36] M. Zucca, E. Reccia, E. Vecchi, V. Pintus, A. Dessì, y A. Cazzani, «An Evaluation of the Structural Behaviour of Historic Buildings Under Seismic Action: A Multidisciplinary Approach Using Two Case Studies», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, n.º 22, nov. 2024, doi: 10.3390/APP142210274.

[37] S. S. Tezcan, I. E. Bal, y F. G. Gulay, «P25 scoring method for the collapse vulnerability assessment of R/C buildings», *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers,Series A*, vol. 34, n.º 6, 2011, doi: 10.1080/02533839.2011.591548.

[38] N. Khattak, H. Derakhshan, T. M. Ferreira, N. J. Perera, y D. P. Thambiratnam, «Seismic vulnerability assessment of pre-1945 unreinforced masonry buildings located in Queensland, Australia, using an index-based approach», *Structures*, vol. 67, sep. 2024, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106900.

[39] I. Fiore, S. Caddemi, I. Caliò, y A. Greco, «An inelastic beam-like model for nonlinear dynamic analyses of multi-storey buildings», *Eng Struct*, vol. 308, jun. 2024, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.117852.

[40] S. Pinasco, S. Lagomarsino, L. Oneto, A. Coraddu, y S. Cattari, «Training and validation of a machine learning model for seismic vulnerability of masonry buildings in aggregate and selection of key parameters», *Structures*, vol. 80, oct. 2025, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2025.109773.

[41] A. Kumar y G. Ghosh, «Combined effect of R-factor and building height on damage index and seismic vulnerability index of IS code designed T-shaped RC buildings», *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, vol. 50, n.º 3, sep. 2025, doi: 10.1007/S12046-025-02796-W.

[42] A. Saha y S. K. Mishra, «Amplification of seismic demands in inter-storey-isolated buildings subjected to near fault pulse type ground motions», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 147, ago. 2021, doi: 10.1016/J.SOILDYN.2021.106771.

[43] S. Q. Li, «Seismic risk model for regional buildings that considers the influence of temperature and intensity measures», *Expert Syst Appl*, vol. 250, sep. 2024, doi: 10.1016/J.ESWA.2024.123962.

[44] M. Ozdemir y G. Celik, «Development of a deep learning-based rapid visual screening method for seismic vulnerability assessment of existing RC buildings in Turkey», *Structural Concrete*, 2025, doi: 10.1002/SUCO.70162.

[45] A. A. Raoufy, A. Kheyroddin, y H. Naderpour, «Seismic vulnerability assessment of hospital buildings in Kabul city (Afghanistan) using applied technology council (ATC – 21)», *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 26, n.º 1, pp. 47-57, ene. 2025, doi: 10.1007/S42107-024-01027-7.

[46] G. Longobardi, G. Milani, y A. Formisano, «Seismic Vulnerability Assessment of Masonry Churches in Bondeno: A Comparative Analysis of Damage Indices», *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 595 LNCE, pp. 11-19, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-87312-6_2.

[47] Setiono, S. Sangadji, S. A. Kristiawan, y N. Miladan, «The Vulnerability Level of Residential Buildings in Surakarta City Related to Seismic Hazard», *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 625 LNCE, pp. 77-85, 2025, doi: 10.1007/978-981-96-2143-9_9.

[48] M. Ye, L. Yang, Y. He, y W. Li, «Seismic vulnerability analysis of a high-rise steel frame structure equipped with novel displacement-amplified viscoelastic dampers», *Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 33, n.º 13, sep. 2024, doi: 10.1002/TAL.2124.

[49] H. Lovon, V. Silva, R. Vicente, y T. M. Ferreira, «Analytical vulnerability functions for assessing fatalities in masonry buildings», *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 53, n.º 11, pp. 3588-3606, sep. 2024, doi: 10.1002/EQE.4188.

[50] K. Boshnakov, V. Kardjiev, y M. Kouteva-Guentcheva, «Seismic Retrofit of Buildings in Bulgaria for Efficient Seismic Risk Reduction», *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 883 LNNS, pp. 238-247, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-74707-6_26.

[51] G. Longobardi y A. Formisano, «Influence of structural-geological features and knowledge levels on the seismic vulnerability of masonry clustered buildings: a case study in Mirandola (Italy)», *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2025, doi: 10.1007/S10518-025-02209-7.

[52] P. Inci, E. Seckin, E. Coskun, A. M. Turk, y A. Ilki, «Performance of Rapid Seismic Safety Assessment Methods on Estimation of Seismic Vulnerability of Relatively New RC Buildings Affected by the February 2023 Türkiye Earthquake Sequence», *Journal of Earthquake Engineering*, 2025, doi: 10.1080/13632469.2025.2490940.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

[53] P. Kumar, S. Madhuri, y B. C. Olaiya, «Nonlinear response analysis of plan and vertical asymmetric reinforced concrete buildings under directional seismic loadings», *Sci Rep*, vol. 15, n.º 1, dic. 2025, doi: 10.1038/S41598-025-12737-6.

[54] I. Onescu *et al.*, «Simplified Vulnerability Assessment of Historical Churches in Banat Seismic Region, Romania», *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 19, n.º 5, pp. 825-838, 2025, doi: 10.1080/15583058.2024.2341054.

[55] A. Ereš, J. Radić, S. Lozančić, y M. Hadzima-Nyarko, «Seismic Vulnerability Assessment of Buildings in an Urban Area: A Case Study of Selected City Blocks in Osijek», *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 1242 LNNS, pp. 407-418, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-80597-4_32.

[56] N. Akbarzadeh, R. Shabani, y S. Tariverdilo, «An Investigation on Seismic Vulnerability of Floating Roofs», *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 38, n.º 12, pp. 2917-2928, dic. 2025, doi: 10.5829/IJE.2025.38.12C.10.

[57] H. Sun, S. I. Sadat, F. Ding, Y. Qi, y F. Lyu, «Seismic behavior and vulnerability of thin-walled stirrup-confined CFST piers: Pseudo-dynamic experimental and numerical analysis», *Eng Struct*, vol. 343, nov. 2025, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2025.120936.

[58] L. Amitrano, R. Di Chicco, y A. Formisano, «Seismic vulnerability and fragility assessment of masonry structures within the historic centre of Meta (Naples, Southern Italy)», *Journal of Building Engineering*, vol. 104, jun. 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.112328.

[59] B. Sabeur, S. M. E. A. Bourdim, y H. Rodrigues, «Seismic Damage Scenarios for Existing Masonry Buildings for Educational Use in the Mostaganem City», *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 27, n.º 5, pp. 2148-2162, may 2023, doi: 10.1007/S12205-023-1592-9.

[60] S. Q. Li, H. B. Liu, K. Du, J. C. Han, Y. R. Li, y L. H. Yin, «Empirical seismic vulnerability probability prediction model of RC structures considering historical field observation», *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 86, n.º 4, pp. 547-571, may 2023, doi: 10.12989/SEM.2023.86.4.547.

[61] P. Baquedano-Juliá, T. M. Ferreira, C. Arriagada-Luco, C. Sandoval, N. C. Palazzi, y D. V. Oliveira, «Multi-vulnerability analysis for seismic risk management in historic city centres: an application to the historic city centre of La Serena, Chile», *Natural Hazards*, vol. 120, n.º 10, pp. 9223-9266, ago. 2024, doi: 10.1007/S11069-023-06008-8.

[62] M. U. Raza, F. Butt, F. Ahmad, y R. M. Waqas, «Seismic safety assessment of buildings and perceptions of earthquake risk among communities in Mingora, Swat, Pakistan», *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 10, n.º 4, abr. 2025, doi: 10.1007/S41062-025-01932-Z.

[63] M. Šavor Novak, M. Uroš, M. Demšić, R. Jevtić Rundek, A. Pilipović, y J. Atalić, «Detailed Structural Typology of Existing Substandard Masonry and Reinforced Concrete Buildings in the City of Zagreb, Croatia», *Buildings*, vol. 14, n.º 11, nov. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14113644.

[64] M. Zucca, E. Reccia, E. Vecchi, V. Pintus, A. Dessì, y A. Cazzani, «An Evaluation of the Structural Behaviour of Historic Buildings Under Seismic Action: A Multidisciplinary Approach Using Two Case Studies», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, n.º 22, nov. 2024, doi: 10.3390/APP142210274.

[65] M. Harati y J. W. van de Lindt, «Mainshock-aftershock building fragility methodology for community resilience modeling», *Structures*, vol. 70, dic. 2024, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2024.107742.

[66] F. Aloschi, M. Polese, M. Gaetani d'Aragona, G. Tocchi, J. Pejovic, y N. Serdar, «A seismic vulnerability model for masonry buildings in Montenegro», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 23, n.º 5, pp. 2347-2376, mar. 2025, doi: 10.1007/S10518-025-02121-0.

[67] S. G. Cheng, Y. X. Zhu, X. Yang, K. Sun, y W. P. Zhang, «Seismic evaluation method based on seismic performance and its application for existing RC frames», *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, vol. 38, n.º 8, pp. 154-165, ago. 2021, doi: 10.6052/J.ISSN.1000-4750.2020.08.0559.

[68] S. Q. Li, «Probabilistic seismic hazard model and vulnerability analysis for typical regional structures», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 22, n.º 9, pp. 4377-4412, jul. 2024, doi: 10.1007/S10518-024-01938-5.

[69] I. Olteanu, A. H. Barbat, y M. Budescu, «Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Framed Structures Considering the Effect of Structural Characteristics», *The Open Civil Engineering Journal*, vol. 9, n.º 1, 2018, doi: 10.2174/1874149501509010321.

[70] S. Parizat, R. Kamai, Y. Shaked, y A. Shmerling, «Seismic vulnerability of a pre-code, reinforced concrete, apartment-block building», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 22, n.º 15, pp. 7547-7587, dic. 2024, doi: 10.1007/S10518-024-02054-0.

[71] M. Ahmadi, M. Shafapourtehrany, H. Özener, O. M. Yilmaz, B. Kalantar, y F. Shabani, «Eigenvector spatial filtering enhancing natural hazards vulnerability assessment in a susceptible urban environment: A case study of Izmir earthquake in Turkey», *Environ Technol Innov*, vol. 35, ago. 2024, doi: 10.1016/J.ETI.2024.103666.

[72] W. Y. Aung, S. Gautam, y D. Gautam, «Damage mechanisms and seismic vulnerability of building structures following the 2025 M 7.7 Mandalay earthquake sequence, Myanmar», *Eng Fail Anal*, vol. 180, oct. 2025, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2025.109849.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

[73] L. Paolella, R. L. Spacagna, G. Chiaro, y G. Modoni, «A simplified vulnerability model for the extensive liquefaction risk assessment of buildings», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 19, n.º 10, pp. 3933-3961, ago. 2021, doi: 10.1007/S10518-020-00911-2.

[74] Z. Yang, D. Liu, J. Zhou, L. Zhang, y W. Liao, «Seismic Vulnerability Assessment of the Cliff-Attached Buildings Equipped with Energy Dissipation Devices Under Obliquely Incident Seismic Waves», *Buildings*, vol. 14, n.º 11, nov. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14113488.

[75] P. Aghabeigi y S. Farahmand-Tabar, «Seismic vulnerability assessment and retrofitting of historic masonry building of Malek Timche in Tabriz Grand Bazaar», *Eng Struct*, vol. 240, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112418.

[76] M. Ravankhah, M. Schmidt, y T. Will, «An indicator-based risk assessment framework for World Heritage sites in seismic zones: The case of "Bam and its Cultural Landscape" in Iran», *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 63, 2021, doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102405.

[77] S. Kechidi *et al.*, «Development of exposure datasets for earthquake damage and risk modelling: the case study of northern Algeria», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 19, n.º 12, 2021, doi: 10.1007/s10518-021-01161-6.

[78] N. Giordano *et al.*, «Seismic fragility models for typical non-engineered URM residential buildings in Malawi», *Structures*, vol. 32, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.03.118.

[79] J. Hua, T. Chen, y J. Zhang, «Vulnerability evaluation of post-earthquake fire ignition of building structures», *Journal of Building Engineering*, vol. 109, sep. 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.113058.

[80] A. Guettiche, M. A. Soltane, M. Lecheheb, y A. Boudina, «Seismic performance of historical unreinforced masonry buildings. the case of Souika district in Constantine, Algeria», *Journal of Building Engineering*, vol. 111, oct. 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.113377.

[81] Z. He *et al.*, «Seismic vulnerability model for typical buildings in Sichuan Province, China, based on empirical seismic damage statistics», *Structures*, vol. 78, ago. 2025, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2025.109294.

[82] P. Crespi, M. Scamardo, y R. Buoninconti, «Fragility curves for the seismic vulnerability of a stock of Italian highway bridges», *Structures*, vol. 78, ago. 2025, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2025.109374.

[83] S. Sharma, S. Maharjan, K. C. Shreedhar, y D. Gautam, «Seismic Fragility of Medium-Rise Soft Story SMRF Building Under Near Field, Fling Step, and Far Field Excitations», *Earthquake Engineering and Resilience*, vol. 4, n.º 1, pp. 149-162, mar. 2025, doi: 10.1002/EER2.70004.

[84] F. Aloschi, M. Polese, M. Gaetani d'Aragona, G. Tocchi, J. Pejovic, y N. Serdar, «A seismic vulnerability model for masonry buildings in Montenegro», *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 23, n.º 5, pp. 2347-2376, mar. 2025, doi: 10.1007/S10518-025-02121-0.

[85] A. Basaglia, A. Aprile, F. Pilla, y E. Spacone, «Computer-aided risk assessment at urban scale. Model definition and validation on a case study», en *ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, 2016. doi: 10.7712/100016.2234.11825.

[86] M. Moradi, M. R. Delavar, y B. Moshiri, «A GIS-based multi-criteria decision-making approach for seismic vulnerability assessment using quantifier-guided OWA operator: a case study of Tehran, Iran», *Ann GIS*, vol. 21, n.º 3, 2015, doi: 10.1080/19475683.2014.966858.

[87] S. K. Nath, M. D. Adhikari, N. Devaraj, y S. K. Maiti, «Seismic vulnerability and risk assessment of Kolkata City, India», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 15, n.º 6, 2015, doi: 10.5194/nhess-15-1103-2015.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License