

Estado del arte en la detección de daño estructural en edificaciones empleando respuestas
dinámicas

Jeysson Sebastián Rojas Gutiérrez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carrillo

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a mi familia, principalmente a mis padres, los cuales fueron el pilar fundamental para que yo pudiera cumplir satisfactoriamente los estudios, quienes me ofrecieron las herramientas y el apoyo necesario para vivir esta experiencia y adquirir los conocimientos que me permitieron realizar esta investigación. También dedicado a mi hermano por ser un soporte y compañero de estudios.

“Cualquier tecnología suficientemente avanzada, es indistinguible de la magia”

Arthur C. Clarke

Agradecimientos

Agradezco principalmente a la Universidad Industrial de Santander y a todos los miembros de la comunidad universitaria por su ardua labor en el propósito de mantener viva la llama del aprendizaje. Gracias por ser una institución de alta calidad, actualizada y sofisticada que nos permite a los estudiantes, el ingreso a este maravilloso mundo de la formación, con el fin de edificarnos principalmente como personas íntegras, críticas y honestas cuyo objetivo, sea el de realizar aportes que nos lleven al desarrollo de la sociedad.

Expreso gratitud a mi director de proyecto Oscar Javier Begambre Carillo, por estos meses de acompañamiento constante, por su orientación y exigencia para realizar esta investigación.

Finalmente, doy gracias a todas las personas que en su momento me ofrecieron una mano o una palabra de aliento en los momentos difíciles que me ayudaron a formarme como persona y futuro profesional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Estudio bibliométrico.....	14
2.1 Diseño de la revisión.....	15
2.2 Realización de la revisión	15
2.3 Análisis y redacción de la revisión	16
2.3.1 Consulta preliminar en Scopus	16
2.3.2 Áreas temáticas de las publicaciones.....	18
2.3.3 Países con más publicación.....	19
2.3.4 Autores con más publicación	20
2.3.5 Mapeo de la investigación	21
2.3.6 Países con mayor número de citas.....	22
2.3.7 Factores de impacto	23
2.3.7.1 Factor de impacto por cuartil Q	24
2.3.7.2 Factor de impacto por índice H.....	24
2.3.8 Investigación temática	25
2.3.8.1 Cooperación entre autores.....	26
2.3.8.2 Nube de palabras clave.	27
2.3.8.3 Relación entre palabras clave.....	28

3. Clasificación de métodos de detección de daño estructural.....	29
3.1 Etapa numérica (TRL 3)	31
3.2 Etapa experimental de laboratorio (TRL 4).....	34
3.3 Etapa experimental de campo (TRL 5).....	37
3.4 Etapa comercial (TRL 9)	38
4. Variables empleadas en los estudios.....	40
4.1 Aceleración	40
4.2 Amortiguamiento	44
4.3 Desplazamiento.....	47
4.4 Frecuencia natural	50
4.5 Modos de vibrar	51
5. Herramientas computacionales e instrumentos.....	53
6. Síntesis de resultados	63
7. Prospectiva.....	72
7.1 Prospectiva en la etapa numérica.....	72
7.2 Prospectiva en la etapa experimental de laboratorio.....	73
7.3 Prospectiva en la etapa experimental de campo	74
8. Conclusiones	74
Referencias bibliográficas.....	77

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Revistas de las que fueron tomados los artículos para este estudio</i>	25
Tabla 2 <i>Artículos en etapa numérica (TRL 3)</i>	32
Tabla 3 <i>Artículos en etapa experimental de laboratorio (TRL 4)</i>	34
Tabla 4 <i>Artículos en etapa experimental de campo (TRL 5)</i>	37
Tabla 5 <i>Tabla de síntesis de las ventajas y desventajas de los métodos propuestos en los artículos consultados</i>	63

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Instrumentación de una estructura tipo pórtico experimental de laboratorio</i>	14
Figura 2 <i>Secuencia de pasos inicial para la recopilación de artículos</i>	17
Figura 3 <i>Documentos publicados por año</i>	18
Figura 4 <i>Áreas temáticas de los documentos publicados</i>	19
Figura 5 <i>Origen de los documentos publicados</i>	20
Figura 6 <i>Autores con más publicaciones</i>	21
Figura 7 <i>Colaboración entre países</i>	22
Figura 8 <i>Los diez países con más citas</i>	23
Figura 9 <i>Relación de los autores de los documentos publicados</i>	27
Figura 10 <i>Palabras clave más utilizadas en las publicaciones</i>	28
Figura 11 <i>Relación de las palabras clave más usadas en los documentos publicados</i>	29
Figura 12 <i>Descripción de cada calificación de TRL</i>	31

Glosario

Daño: se puede definir como el cambio en las propiedades materiales y/o geométricas de la estructura, incluyendo sus condiciones de frontera, conectividad entre elementos, secciones transversales geométricas, cargas, propiedades materiales y cualquier otro factor capaz de provocar un comportamiento inusual, presente o futuro, de la estructura (Doebbling et al., 1998).

Detección: se refiere a la acción de descubrir o identificar algo que no era evidente o conocido previamente, esto puede incluir la presencia o localización de algún fenómeno como también la identificación de su naturaleza Clough & Penzien, 1993).

Edificio: se define a toda estructura que tiene un techo y paredes y se encuentra más o menos permanente en un lugar (Egenhofer, 2002).

Réplica sísmica: el término se utiliza para referirse a la secuencia de sismos que ocurren después de un terremoto, el cual se denomina “sismo principal”. El conjunto de sismos que preceden al sismo principal se denomina “precursores” (Felzer et al., 2004).

Respuesta dinámica: se refiere al comportamiento de una estructura cuando está expuesta a cargas dinámicas como sismos, vientos fuertes, vibraciones por maquinaria u otras fuerzas que varían con el tiempo. Esta respuesta dinámica se caracteriza por la forma en que la estructura se deforma, oscila y desplaza debido a estas cargas variables a lo largo del tiempo (Chopra, 2011).

Salud estructural: es la capacidad de una estructura civil para mantener su integridad, resistencia y estabilidad a lo largo del tiempo y bajo diferentes condiciones de carga. Esto implica asegurar que la estructura cumpla con los estándares de seguridad y funcione correctamente durante su vida útil proyectada (Clough & Penzien, 1993).

Resumen

Título: Estado del arte en la detección de daño estructural en edificaciones empleando respuestas dinámicas*

Autor: Jeysson Sebastián Rojas Gutiérrez**

Palabras Clave: Daño, Detección, Respuesta Dinámica, Edificios

Descripción: El monitoreo de la salud estructural es una labor esencial para garantizar la funcionalidad y seguridad de las estructuras a lo largo de su vida útil. Éste permite un accionar temprano para la evaluación de daños causados por factores como el envejecimiento y las amenazas naturales. La vigilancia y estudio constante de las estructuras ha adquirido importancia durante los últimos años debido al crecimiento demográfico, que ha dado como consecuencia la necesidad de aumentar la capacidad de construcción de infraestructura civil.

Existen varios métodos y herramientas para el monitoreo y detección de daño en edificaciones, estos van desde enfoques numéricos hasta experimentales. Estos métodos buscan identificar problemas potenciales y situaciones en ideales, proponer soluciones antes de que pueda presentarse una catástrofe.

Este proyecto muestra, a través de un estudio bibliométrico y de revisión de literatura relevante, el comportamiento y tendencia de la investigación en este campo analizando datos de publicación, coautoría y cooperación entre países que ayuden al desarrollo de nuevos avances matemáticos y tecnológicos que puedan ser utilizados en el futuro. Se destacan las herramientas computacionales que presentan resultados más satisfactorios. Asimismo, se resaltan los enfoques prospectivos en la detección de daño estructural como el uso de redes neuronales artificiales, técnicas de estimación sísmica y métodos basados en inteligencia artificial los cuales prometen mejoras significativas en la precisión y eficacia de la detección de daño.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Doctor en Ingeniería Civil.

Abstract

Title: State of the art in structural damage detection in buildings using dynamic responses*

Author(s): Jeysson Sebastián Rojas Gutiérrez**

Key Words: Damage, Detection, Dynamic Response, Buildings

Description: The monitoring of structural health is an essential task to ensure the functionality and safety of structures throughout their lifespan. It allows for early action in assessing damage caused by factors such as aging and natural threats. The constant surveillance and study of structures have gained importance in recent years due to population growth, which has led to the need to increase the capacity for civil infrastructure construction.

There are various methods and tools for monitoring and detecting damage in buildings, ranging from numerical to experimental approaches. These methods aim to identify potential problems and non-ideal situations, proposing solutions before a catastrophe can occur.

This project presents, through a bibliometric study and a review of relevant literature, the behavior and trends in research in this field by analyzing publication data, co-authorship, and international cooperation that contribute to the development of new mathematical and technological advances that can be used in the future. The computational tools that show the most satisfactory results are highlighted. Additionally, prospective approaches in structural damage detection are emphasized, such as the use of artificial neural networks, seismic estimation techniques, and AI-based methods, which promise significant improvements in the accuracy and effectiveness of damage detection.

* Degree Work

** Facultad de Ingeniería Fisicomecánica. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo. Doctor en Ingeniería Civil.

Introducción

Diseñar y planificar la construcción de una estructura es simplemente la mitad del trabajo realizado por el ingeniero(a) estructural, ya que, para obtener el mayor provecho de ésta se debe garantizar que, durante su vida útil, cumpla con las funciones para las que fue diseñada. El envejecimiento y la exposición de la infraestructura a amenazas naturales (sismos y cambio climático) hace que la evaluación de sus posibles daños ante estos eventos sea esencial para su recuperación. Durante las últimas décadas, debido al exponencial crecimiento demográfico y al cambio climático, se hace obligatoria la vigilancia y monitoreo de la infraestructura civil para proteger la vida de las personas y el patrimonio de la sociedad. Frente a esta necesidad de proteger y evaluar de forma permanente las estructuras, aparecen herramientas que se encargan de monitorear, examinar y tratar de predecir el comportamiento de éstas cuando cargas ambientales y dinámicas aparecen generando posibles afectaciones sobre ellas. Las técnicas actuales para identificación de daño en estructuras que emplean la respuesta dinámica del sistema, presentan una solución factible a la necesidad de monitoreo permanente de la infraestructura, y por esta razón se plantea su revisión en este trabajo de investigación.

Uno de los primeros eventos de los que se tiene registro sobre monitoreo de salud estructural proviene del año 1878 cuando a Thomas Lincoln Case, teniente coronel y jefe de la Oficina de Edificios y Terrenos públicos en Washington se le asignó como labor la continuación de la construcción del monumento a Washington la cual estuvo detenida por 20 años. En una inspección inicial sobre la estructura, Casey encontró un pilar de mampostería deteriorado de aproximadamente 159 pies de altura (47.5 m), inclinado 1.7 pulgadas (4.4 cm) fuera de la plomada; pandeo de paneles frontales de mármol en niveles inferiores, grietas y fracturas en las hileras de

mampostería estructural cerca de la base. Casey notó que podía tratarse de un problema de cimentación, con lo cual fueron llevadas a cabo varias perforaciones y excavaciones para estudiar el suelo bajo la superficie, notando que la estructura descansaba sobre una frágil y delgada capa de arena y arcilla a tan solo 8 pies (2.4 m) de la superficie haciendo que fuera necesario una reestructuración de las zapatas expandiéndolas hasta un lecho de grava subyacente más fuerte. Gracias al trabajo de Casey el monumento a Washington fue inaugurado el 21 de febrero de 1885 siendo la estructura más alta del mundo para la época (Weingardt, 2011).

La detección de daño en edificaciones es un reto logístico y de ingeniería de gran escala, enfrentar este desafío requiere la recolección de grandes cantidades de información cuantitativa como: identificación de daños, extensión de los datos, evaluación de la gravedad de los daños, entre otros. Esta información debe obtenerse en tiempo real para evitar el alto costo en recursos y tiempo que se requiere para hacer inspecciones visuales (Oh et al., 2023). Por este motivo, se planea en este proyecto recopilar y clasificar los diferentes métodos de detección de daño estructural en edificaciones de las investigaciones publicadas entre 2013 y 2023 de acuerdo con los niveles de maduración de proyectos basado en la técnica TRL propuesta por la NASA. Seguidamente se describe las variables empleadas, instrumentos y herramientas computacionales en los métodos para finalmente mencionar sus ventajas y desventajas y así, identificar posibles beneficios y limitaciones de su aplicación. La finalidad del proyecto es responder: ¿Cuáles metodologías permiten realizar la detección de daño en aplicaciones o situaciones reales, ¿cuáles están en fase de desarrollo y qué método se usa con mayor frecuencia en las aplicaciones reales?

En este trabajo los capítulos se centran en: (1) objetivos, (2) estudio bibliométrico basado en Scopus®, (3) clasificación de los métodos, (4) variables empleadas, (5) herramientas computacionales e instrumentos, (6) síntesis, (7) prospectivas y (8) conclusiones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Exponer el estado del arte en la detección de daño estructural en edificaciones empleando respuestas dinámicas.

1.2 Objetivos específicos

Clasificar los métodos para la detección de daños propuestos en la literatura.

Identificar las variables empleadas en los métodos de detección.

Definir las herramientas computacionales empleadas para la detección de daño.

Identificar los equipos de medición empleadas para la detección de daño.

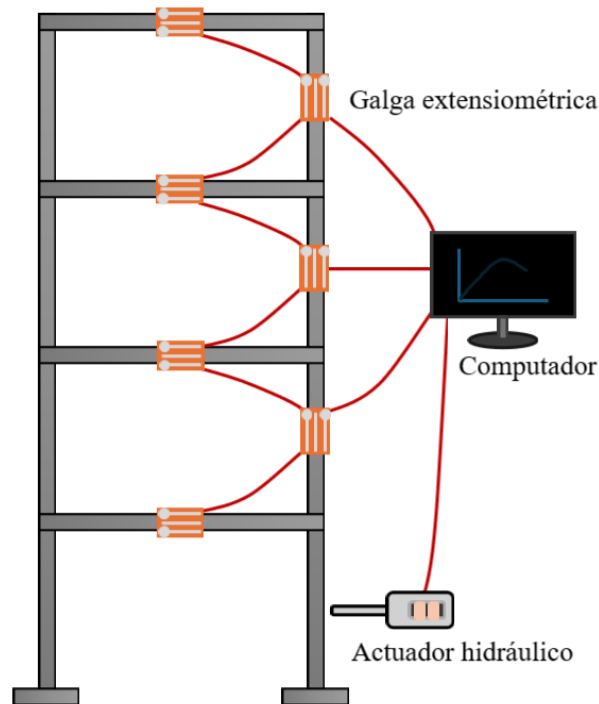
Indicar ventajas y desventajas de los métodos de detección de daño reportados en la literatura científica.

2. Estudio bibliométrico

El monitoreo de la salud estructural (SHM en inglés) es un conjunto de tareas para verificar continuamente el estado de una estructura, hacer la detección de daño estructural y, en una situación real, proponer soluciones. Se lleva a cabo con la instalación de sensores en la estructura para recolectar datos sobre sus condiciones y transferirlos para su análisis tal como se ve en la Figura 1. El objetivo es detectar cualquier problema potencial antes de que cause daños importantes (EAFIT, s. f.; Ingenieros Asesores, 2023).

Figura 1

Instrumentación de una estructura tipo pórtico experimental de laboratorio



Nota. El actuador hidráulico ejerce una fuerza o desplazamiento en la estructura que puede ser configurada en un escenario experimental y las galgas registran posibles deformaciones siendo transmitidas a un computador.

En este capítulo se propone un enfoque para el estudio bibliométrico adaptado de los principios de Snyder para revisiones científicas (Snyder, 2019): (1) diseño de la revisión, (2) realización de la revisión y (3) análisis y redacción de la revisión. La razón para realizar el estudio bibliométrico de esta manera, es que permite trabajar de forma ordenada la investigación, describir los pasos que se llevan a cabo y exponer datos pertinentes en diferentes campos como las publicaciones por año, áreas temáticas, publicación por países, publicación por autores, citas y co-autoría, entre otros.

2.1 Diseño de la revisión

El diseño de la revisión consiste en identificar los aspectos que le darán un orden e importancia al estudio bibliométrico que permita al lector identificar las tendencias y áreas temáticas relevantes, evaluar el estado del conocimiento e identificar a los investigadores más influyentes. Este apartado pretende responder las siguientes interrogantes:

- a) ¿Qué herramienta se ha empleado para la recolección de datos bibliométricos?
- b) ¿En qué áreas temáticas se ha centrado la investigación?
- c) ¿Cuáles son los autores y países que más han aportado a la investigación de la detección de daño estructural?
- d) ¿Qué tan amplia es la cooperación entre los autores?
- e) ¿De qué forma se les puede otorgar una clasificación según su impacto?

2.2 Realización de la revisión

El estudio bibliométrico se realiza con el motor de búsqueda Scopus® propiedad de la editorial ELSEVIER®, la cual es una herramienta para estudios bibliométricos y evaluaciones de producción científica, se trata de una colección multidisciplinar, a nivel mundial, de resúmenes, referencias e índices de literatura científica, técnica y médica. El motor de búsqueda Scopus®

utiliza un algoritmo fundamental para analizar datos de consulta llamado algoritmo de relevancia el cual consta de hacer una indexación de documentos (es decir, asignación de etiquetas para simplificar la organización) la cual puede facilitar la búsqueda a partir de las palabras clave que el usuario digite, luego el algoritmo evalúa la correlación entre las variables de consulta y los metadatos de los documentos indexados. Finalmente, a partir de la ponderación de la relevancia empleando factores como la frecuencia de ocurrencia de palabras clave, Scopus® ordena los resultados en función de dicha relevancia (Scopus, s. f.).

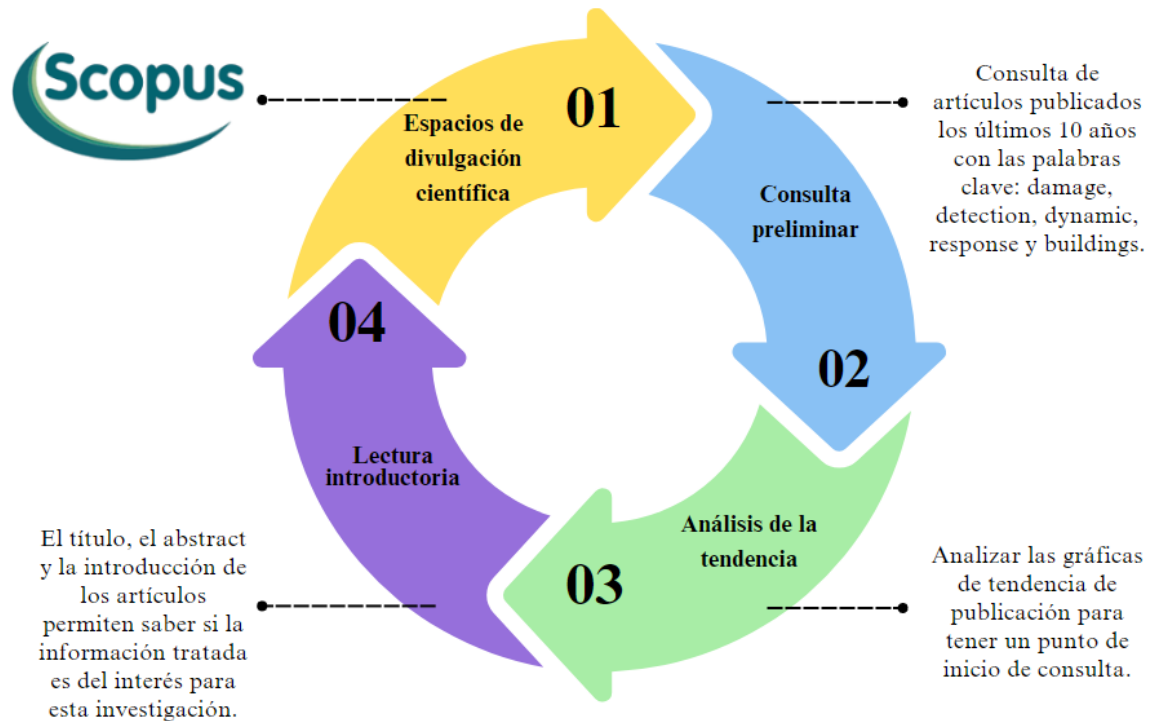
2.3 Análisis y redacción de la revisión

2.3.1 Consulta preliminar en Scopus

La búsqueda inició con las palabras clave *damage, detection, dynamic response* y *buildings* arrojando un resultado inicial de 729 documentos publicados. Luego se fijó el rango de años de publicación entre 2013 y 2023 limitando el área temática a *Ingeniería, Ciencias de la Tierra y Planetarias, Ciencias de la Computación, Ciencia de los materiales* y *Matemáticas*. Se condicionó el tipo de documento únicamente a *Artículo científico* ya que han sido sometidos a revisión por pares. Los otros tipos de publicaciones como *Documento de sesión de conferencia* o *Revisión de conferencia* presentan hallazgos preliminares o investigaciones en desarrollo reduciendo la cantidad de publicaciones a un 48.7% (374 publicaciones). La Figura 2 muestra la secuencia simplificada de pasos para la consulta inicial de artículos a modo de resumen.

Figura 2

Secuencia de pasos inicial para la recopilación de artículos

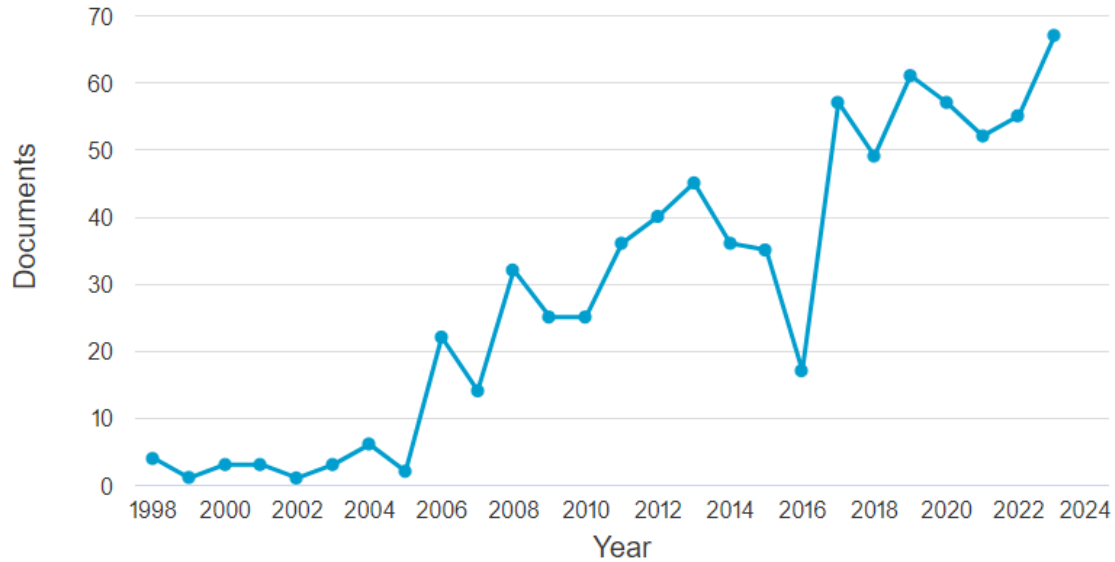


Nota. La metodología de consulta preliminar es un punto de partida para comenzar el estudio del estado del arte.

El rango de años cubierto en esta investigación se escogió según un análisis visual de la Figura 3. Esta gráfica presenta los documentos publicados por año del análisis de resultados de Scopus® donde se puede apreciar una tendencia creciente en publicaciones desde el año 2013 hasta el 2023, marcando como hito histórico en publicaciones de documentos una cantidad de 65 para el año 2023.

Figura 3

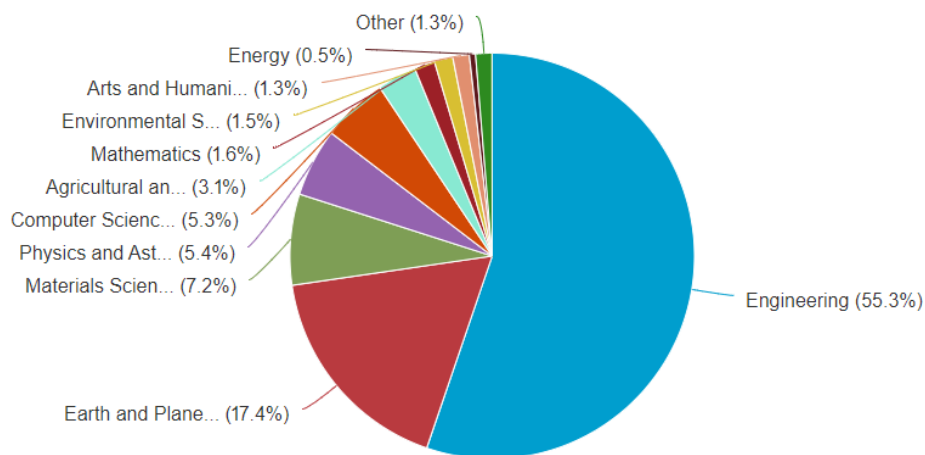
Documentos publicados por año



Nota. El gráfico muestra la cantidad de documentos publicados sobre la detección de daño estructural empleando respuestas dinámicas entre 1998 y 2023. Tomado de Scopus, 2024.

2.3.2 Áreas temáticas de las publicaciones

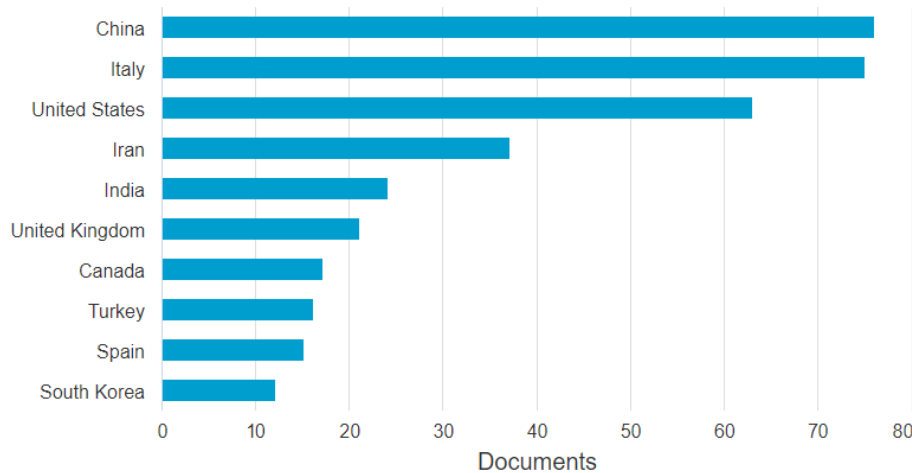
La Figura 4 muestra la distribución de las diferentes áreas temáticas en las que se distribuye la búsqueda de artículos: 55.3% para *Ingeniería*, 17.4% para *Ciencias de la Tierra y Planetarias*, 5.3% para *Ciencias de la Computación*, 7.2% para *Ciencia de los Materiales* y 1.6% para *Matemáticas*. Estas fueron las áreas temáticas empleadas para la consulta en este trabajo y el alto porcentaje para *Ingeniería* se puede explicar debido a la gran importancia que se da en la actualidad al estudio de las estructuras para hacerlas cada vez más seguras y duraderas.

Figura 4*Áreas temáticas de los documentos publicados*

Nota. El gráfico muestra los porcentajes de las áreas temáticas de documentos publicados sobre la detección de daño estructural empleando respuestas dinámicas entre 2013 y 2023. Tomado de Scopus, 2024.

2.3.3 Países con más publicación

En la Figura 5 se aprecian enlistados los países con más publicaciones sobre la investigación en la detección de daño estructural, sobresaliendo aquellos países que desde hace varias décadas son líderes en investigación: China con 76 documentos publicados (20.3%) encabeza la lista y es debido a su acelerado crecimiento, particularmente de la industria de la construcción. A continuación, está Italia con 75 documentos publicados (20.1%), un documento menos que el primer lugar. Seguidamente, se encuentra Estados Unidos con 63 documentos publicados (16.8%), Este país es un importante líder en la investigación, responsable de la mayoría de las normas constructivas y estudios investigativos sobre la detección de daño estructural.

Figura 5*Origen de los documentos publicados*

Nota. El gráfico muestra los 10 países con más documentos publicados sobre la detección de daño estructural empleando respuestas dinámicas entre 2013 y 2023. Tomado de Scopus, 2024.

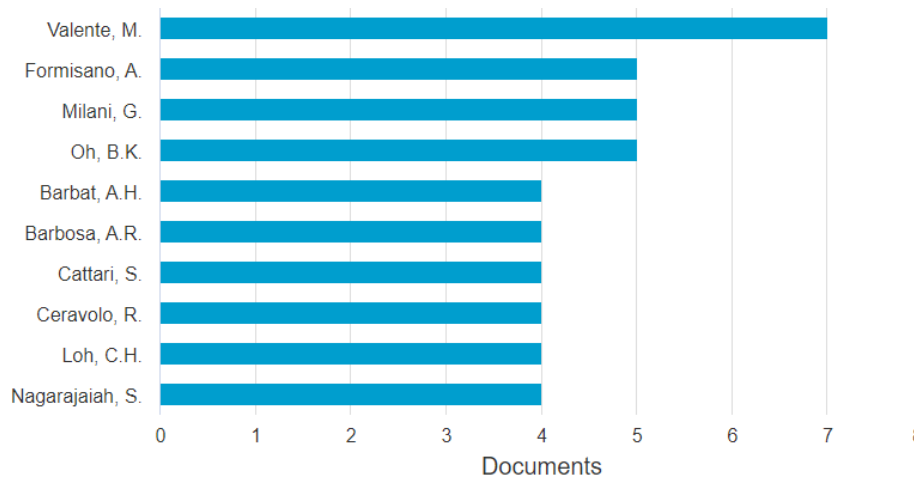
2.3.4 Autores con más publicación

Por otra parte, los autores con más documentos publicados en esta línea de investigación se muestran en la Figura 6, en donde destacan nombres como Valente, Marco V. procedente de Italia quien según su perfil en Scopus® tiene una participación en 102 publicaciones, índice H de 35 y 2,582 citaciones. Seguidamente se encuentra Formisano, A. oriundo de Italia con una participación en 274 documentos, índice H de 36 y 3,949 citaciones. En tercer lugar, se tiene a Milani, Gabriele también de origen italiano como los dos anteriores autores, posee una participación en 643 publicaciones, índice H de 69 y 12,332 citaciones. Estos autores, además de tener en común la misma nacionalidad también tienen trabajos en los que han participado en conjunto como *Historical masonry building aggregates: advanced numerical insight for an effective seismic assessment on two row housing compounds* (Valente, M., Milani, G., Grande, E.,

Formisano, A., 2019), es interesante resaltar el hecho de que los tres autores con más publicaciones en el campo de esta investigación tengan artículos en los que han trabajado conjuntamente.

Figura 6

Autores con más publicaciones



Nota. El gráfico muestra los 10 autores con más documentos publicados sobre la detección de daño estructural empleando respuestas dinámicas entre 2013 y 2023. Tomado de Scopus, 2024.

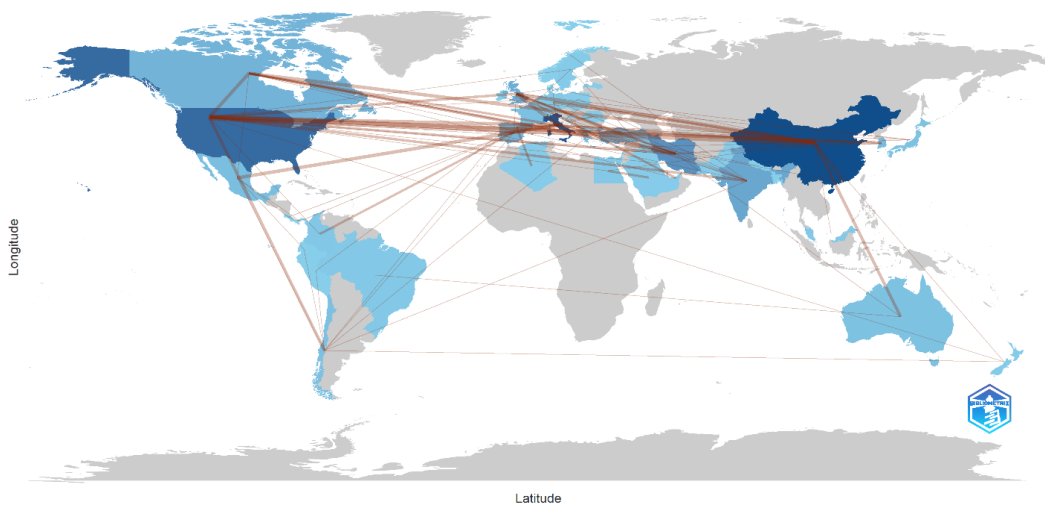
2.3.5 Mapeo de la investigación

Conocer el origen geográfico de las investigaciones ofrece una visión sobre cuáles países están haciendo los mayores aportes y cómo esto puede beneficiar al desarrollo de métodos y tecnologías para la detección de daño estructural. El mapeo concede a los lectores comprender cómo se difunden los hallazgos de investigación en diferentes partes del mundo y puede llegar a ser útil para evaluar el impacto global. De igual manera, permite identificar la cooperación de los países así como lo muestra la Figura 7 donde, además de denotar de una diferencia de tonalidad del color azul (el más oscuro es el que más publicaciones ha realizado y el más claro el que menos ha publicado), posibilita la visión de la colaboración entre diferentes países por las líneas rojas que los une; entre más líneas rojas haya es mayor la interacción y esto es interesante ya que los países

con la tonalidad más oscura como lo son China, Italia y Estados Unidos son a su vez los que mayor colaboración realizan en la detección de daño estructural. Los datos extraídos del motor de búsqueda de Scopus® indican que hubo un total de 147 colaboraciones entre países donde más de la mitad de la participación (58.5%) la tienen: China con el 21.1%, a continuación, Italia con el 20.4%, seguido por Estados Unidos con el 17%.

Figura 7

Colaboración entre países



Nota. Los países de color azul oscuro son los que más publicaciones han hecho y su ritmo disminuye con la intensidad del tono, las líneas rojas son las citas entre países entre 2013 y 2023. Tomado de Bibliometrix, 2024.

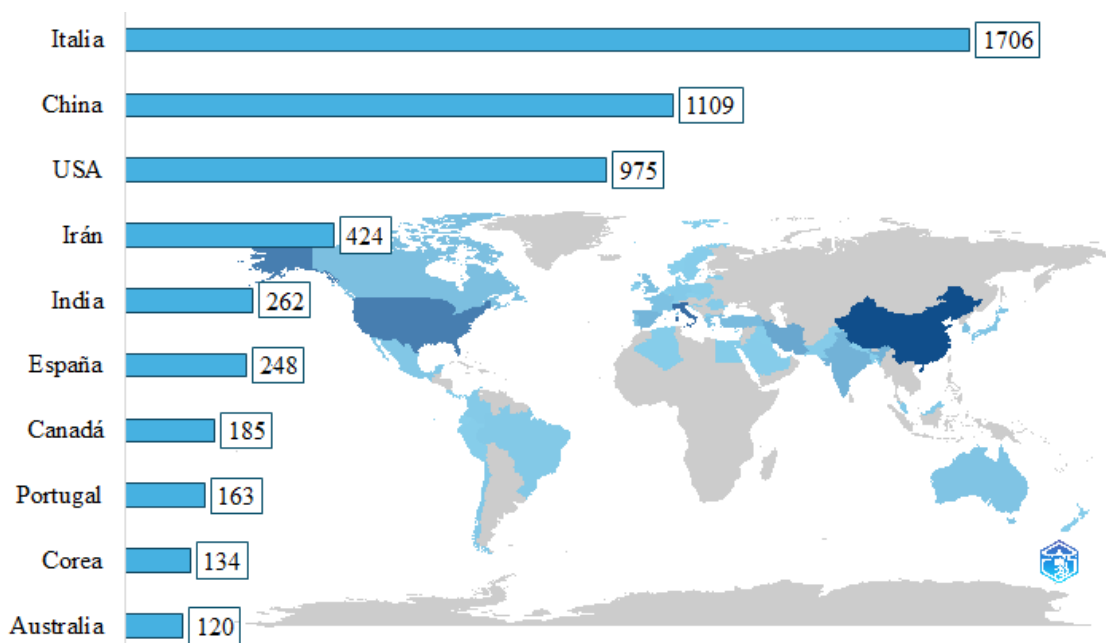
2.3.6 Países con mayor número de citas

El número total de citas es una forma en la cual se puede medir el impacto de la producción científica. Este indicador demuestra la importancia que han tenido las publicaciones y, de esta forma, cómo estas sirven de base para el trabajo de otros investigadores. La Figura 8 expone el total de citas que han tenido las publicaciones de cada país en la consulta que se realizó previamente en el motor de búsqueda de Scopus®. Los datos muestran que hubo un total de 6,138

de citas donde el 61.8% se distribuye solamente entre los 3 países que más publicaciones han realizado: Italia encabezando la lista con el 27.8%, seguidamente China con el 18.1% y luego Estados Unidos con el 15.9%.

Figura 8

Los diez países con más citas



Nota. El gráfico muestra los 10 países con más citas entre 2013 y 2023. Adaptado de Bibliometrix, 2024.

2.3.7 Factores de impacto

Con los documentos ya extraídos, se establece un último filtro de selección el cual consiste en evaluar el factor de impacto de cada una de las revistas de las que proceden los artículos. Esto para identificar los artículos más citados. El portal web Scimago® (Scimago Journal & Country Rank, s. f.) ofrece varios criterios de importancia de los cuales fueron considerados como los más relevantes los cuartiles Q1 y Q2 además del indicador índice H.

2.3.7.1 Factor de impacto por cuartil Q. El sistema de clasificación por cuartiles divide las revistas en cuatro grupos: Q1, Q2, Q3 y Q4, correspondiendo al 25% superior, el siguiente 25%, el tercer 25% y el 25% inferior del listado respectivamente. Las revistas más destacadas se encuentran en el cuartil Q1, con una disminución de importancia en los cuartiles sucesivos hasta llegar a Q4 (Mondragon, 2017).

El Sistema de Indexación y Homologación de Revistas Especializadas Publindex (Publindex, s. f.) evalúa la calidad de las revistas de CTel (Ciencia, tecnología e innovación) que solicitan ser parte del índice Bibliográfico nacional de Colombia. Se consideran aspectos como la tipología de los artículos y se asigna una categoría según el cuartil de la revista: A1 para Q1, A2 para Q2, B para Q3 y C para Q4, lo que permite la homologación de revistas extranjeras según su posición en estos cuartiles (Publindex, s. f.).

2.3.7.2 Factor de impacto por índice H. Es un indicador propuesto por Jorge E. Hirsch en 2005 empleado para medir la productividad científica de revistas, autores, organizaciones o países y se determina ordenando de mayor a menor los artículos científicos según el número de citas que hayan recibido: índice H es el número en el que coinciden el número de orden con el número de citas (Mondragon, 2017).

A continuación, en la Tabla 1 se enlistan de forma jerárquica las revistas de donde se obtuvieron los artículos para este estudio con su respectivo cuartil Q e índice H. Están organizadas jerárquicamente según el cuartil y el índice H más alto.

Tabla 1

Revistas de las que fueron tomados los artículos para este estudio

Revistas	País	Q	H
Sensors	Suiza	Q1	245
Journal of sound and vibration	Estados Unidos	Q1	210
Mechanical Systems and Signal Processing	Estados Unidos	Q1	209
Engineering structures	Reino Unido	Q1	187
Journal of Structural Engineering	Estados Unidos	Q1	178
Journal of Engineering Mechanics	Estados Unidos	Q1	145
Engineering Applications of Artificial Intelligence	Reino Unido	Q1	137
Soil dynamics and earthquake engineering	Reino Unido	Q1	130
Measurement: Journal of the International Measurement Confederation	Países Bajos	Q1	128
Advances in Engineering Software	Reino Unido	Q1	102
Engineering failure analysis	Países Bajos	Q1	100
Bulletin of Earthquake Engineering	Países Bajos	Q1	91
Structure and Infrastructure Engineering	Reino Unido	Q1	71
Advances in Structural Engineering	Estados Unidos	Q1	58
Structures	Reino Unido	Q1	54
Journal of Vibration and Control	Estados Unidos	Q2	86
Journal of Aerospace Engineering	Estados Unidos	Q2	59
Latin American Journal of Solids and Structures	Brasil	Q2	42
ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering	Estados Unidos	Q2	28

Nota. * Revistas de las que fueron recopilados los artículos, ordenadas jerárquicamente por su respectivo cuartil e índice H.

2.3.8 Investigación temática

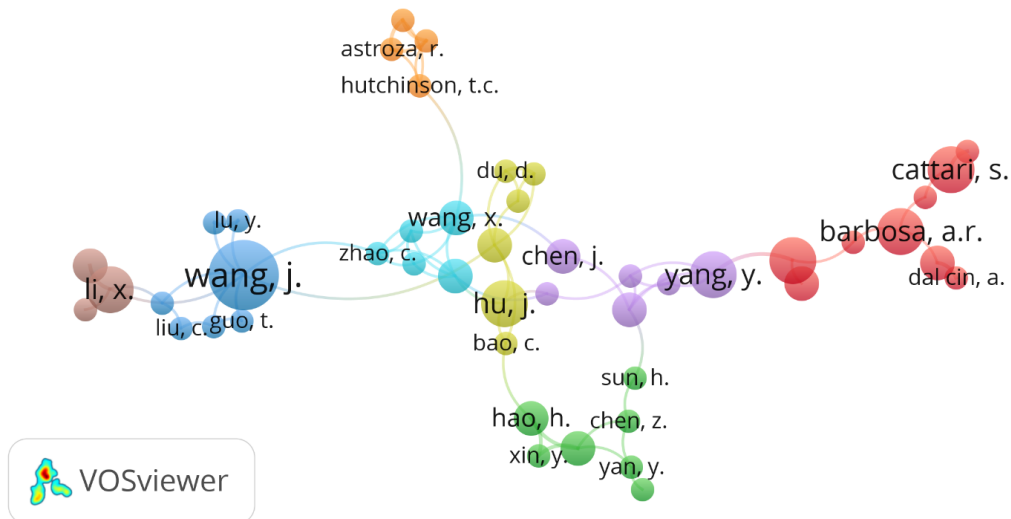
La investigación temática especifica las relaciones internas de varias clases de conceptos incluidas las palabras claves y áreas temáticas. Se representan de forma gráfica haciendo uso de un software para el procesamiento de los datos (Randall, 2010).

2.3.8.1 Cooperación entre autores. Para este análisis se emplea un software de uso libre llamado VOSviewer (VOSviewer *Visualizing scientific landscapes*, s. f.) la cual es una herramienta de software para construir y visualizar redes bibliométricas. Estas redes pueden incluir, por ejemplo, revistas, investigadores o publicaciones individuales y pueden construirse basándose en citas, acoplamiento bibliográfico, co-citación o relaciones de co-autoría. VOSviewer también ofrece una funcionalidad de minería de texto que se puede utilizar para construir y visualizar redes de co-existencia de términos importantes extraídos de un conjunto de literatura científica (VOSviewer, s. f.).

La Figura 9 es un esquema que se ha diseñado con el uso del software libre VOSviewer el cual permite esquematizar la relación de los autores a partir de las citas que han tenido los documentos publicados, dichas relaciones se pueden visualizar a partir de las redes que unen los círculos con los nombres de los autores. Este esquema facilita visualizar la relevancia que ha tenido el trabajo de los autores ya que posiciona de forma central y con un mayor tamaño a los que más han sido citados en las publicaciones de los autores a su alrededor. Los grupos o *cluster* diferenciados por colores son un conjunto de elementos incluidos en el mapa, no se superponen, lo que quiere decir que un elemento puede únicamente pertenecer a un *cluster*, esto simboliza una concentración de autores que han tenido varias interacciones en sus publicaciones principalmente porque hacen parte del mismo eje temático. Los *cluster* de los extremos señala a los autores que han tenido menos interacciones con los autores centrales, esto debido a diferentes factores como la antigüedad de sus investigaciones, tema investigativo de sus proyectos, rigurosidad y resultados (Van Eck & Waltman, 2018).

Figura 9

Relación de los autores de los documentos publicados

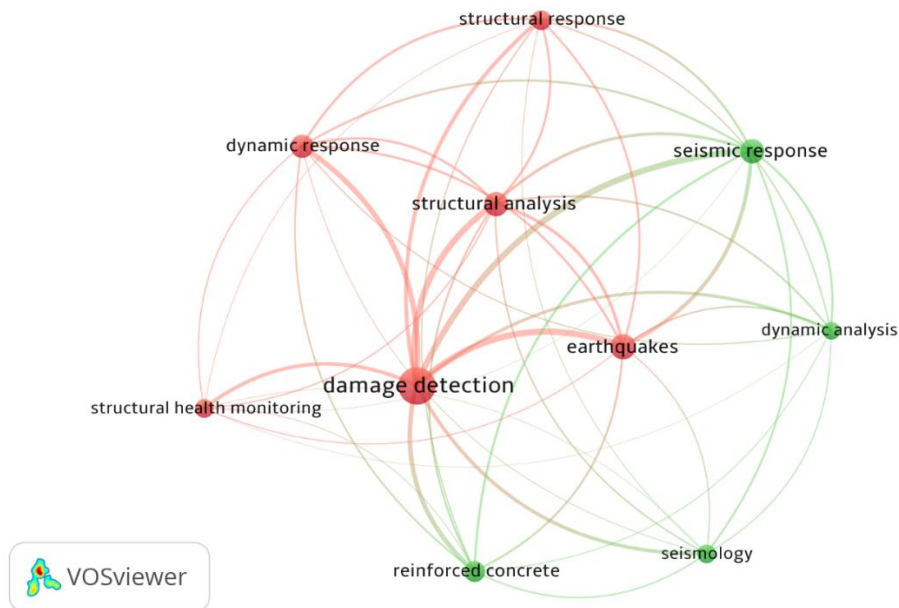


Nota. El gráfico muestra cómo los autores están relacionados entre sí. Usando colores para indicar qué grupos de autores han interactuado más en los documentos sobre la detección de daño estructural empleando respuestas dinámicas entre 2013 y 2023. Tomado de VOSviewer, 2024.

2.3.8.2 Nube de palabras clave. La Figura 10 muestra las 40 palabras clave más relevantes en los datos de los documentos publicados entre 2013 y 2023 acerca de la detección de daño estructural empleando Bibliometrix (Bibliometrix, s. f.), la escala de tamaño de las palabras define la frecuencia con la que fueron utilizadas en los documentos y puede deberse a que presentan avances atractivos para la investigación, las más importantes son: *damage detection* (detección de daño, 246 veces); *structural análisis* (análisis estructural, 84 veces); *numerical methods* (métodos numéricos, 78 veces); *structural health monitoring* (monitoreo de salud estructural, 76 veces); y *finite element method* (método de elementos finitos, 69 veces). Las palabras clave menos utilizadas son las que se encuentran en menor escala y puede deberse a que son temas que se encuentran en etapas bastante tempranas o que sus resultados aún no han sido suficientemente atractivos para

Figura 11

Relación de las palabras clave más usadas en los documentos publicados



Nota. El gráfico muestra la relación entre las 10 de palabras clave más utilizadas en los documentos publicados sobre la detección de daño estructural empleando respuestas dinámicas entre 2013 y 2023. Tomado de VOSviewer, 2024.

3. Clasificación de métodos de detección de daño estructural

Con base en la exploración bibliométrica del capítulo 2, se propone una clasificación de los artículos recopilados sobre la detección de daño a partir de la respuesta dinámica según el estado de avance de los estudios. Dentro de la clasificación se halla la etapa numérica la cual se concentra en la simulación computacional para el estudio del comportamiento estructural con el fin de poder detectar daños utilizando modelos matemáticos; la etapa experimental de laboratorio

donde se llevan a cabo ensayos controlados en modelos físicos simples para examinar el desempeño de las estructuras bajo ciertas condiciones; la etapa experimental de campo donde se realiza el estudio a edificios o modelos a escala real con el propósito de evaluar los métodos en escenarios más reales; y la etapa comercial que se basa en tecnologías cuya aplicabilidad es ofrecida en el mercado.

La clasificación propuesta obtiene una jerarquización según el sistema de medición de la NASA llamado *Technology Readiness Levels TRL* (Manning, 2023) el cual es utilizado para evaluar el nivel de madurez de una tecnología en particular. Cada proyecto de tecnología se evalúa según los parámetros de cada nivel de tecnología y luego se le asigna una calificación TRL basada en el progreso del proyecto según como lo indica la Figura 12. De esta forma es posible una comprensión integral y multidimensional en la detección de daño estructural, incluyendo tanto su factibilidad práctica como su fundamentación teórica (Manning, 2023).

Figura 12

Descripción de cada calificación de TRL



Nota. La calificación TRL permite comprender qué tan cerca está un proyecto de ser implementado en una misión real. Adaptado de Manning, 2024.

3.1 Etapa numérica (TRL 3)

Se puede determinar que un artículo está en etapa numérica cuando se centra en el desarrollo y la aplicación de modelos computacionales para simular y analizar el comportamiento dinámico de las estructuras. Estos modelos numéricos pueden basarse en métodos como el análisis

de elementos finitos o la modelización de sistemas dinámicos, que permiten representar con precisión la respuesta estructural ante diversas condiciones de carga y daño. La característica distintiva de este enfoque es su capacidad para realizar análisis detallados y exhaustivos, explorando una amplia gama de escenarios y parámetros de forma eficiente. El enfoque numérico facilita la evaluación de múltiples estrategias de detección de daños y la optimización de técnicas para el monitoreo estructural. La Tabla 2 contiene los artículos hallados en esta etapa.

Tabla 2

Artículos en etapa numérica (TRL 3)

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
3 (Numérico)	1	Damage detection of building structures under ambient excitation through the analysis of the relationship between the modal participation ratio and story stiffness (2018)	El modelo trató de una estructura de 4 pisos tipo marco en 3D de hormigón armado modelada en OpenSees®. A partir de pruebas de vibración ambiental se midió las respuestas dinámicas. Se examinó la relación entre la variación del índice de participación modal y la pérdida de rigidez del piso en estado sano y dañado para detectar satisfactoriamente los pisos que han sufrido pérdidas de rigidez.
	2	Bayesian Two-Phase Gamma Process Model for Damage Detection and Prognosis (2018)	El modelo fue una estructura de 3 pisos tipo marco de masa concentrada simulada en MATLAB® y utilizando la metodología Box-Jenkins se seleccionó el modelo ARMA que mejor se ajustó para las mediciones de vibración. El método permitió un pronóstico de años antes de que el indicador de daño alcanzara un umbral crítico.
	3	Bayesian Model-Data Fusion for Mechanistic Postearthquake Damage Assessment of Building Structures (2016)	Para el estudio se empleó un modelo de edificio de 10 pisos tipo marco simulado en DRAIN-2DX®, se utilizó como entrada el terremoto de Northridge de 1994. Se implementó el filtro Bayesiano para estimar la respuesta y la incertidumbre en todos los pisos y luego un análisis estadístico que determinó la desviación estándar de los filtros de Kalman EKF y filtros sin aroma UKF

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
3 (Numérico)	4	Multi-storey shear type buildings under earthquake loading: Adversarial learning-based prediction of the transient dynamics and damage classification (2023)	El modelo trató de un edificio a cortante de 39 pisos, el método consistió en el uso de redes neuronales de propagación inversa con el fin de detectar daños en edificios que han sido parcialmente instrumentados codificando las señales de entrada en tres tipos de variables latentes en donde la primera variable llamada "categórica" codifica la posible condición de daño. Las cargas de entrada de vibración fueron tomadas de señales sísmicas registradas en STEAD.
	5	Aftershock damage prediction of reinforced-concrete buildings using capacity spectrum assessments (2020)	Se realizó una simulación numérica de un edificio de 8 pisos en OpenSees® ejecutando una evaluación del espectro de capacidad reduciendo el amortiguamiento equivalente y la rigidez por pisos. El estado de daño se obtuvo evaluando los ángulos máximos de deriva de cada piso.
	6	Model updating method for damage detection of building structures under ambient excitation using modal participation ratio (2019)	La estructura objetivo trató de un modelo matemático de un edificio de 4 pisos de masa concentrada la cual fue expuesta a excitación ambiental y luego se midió las respuestas dinámicas. El método de índice de participación modal denotó valores representativos de la historia temporal de la respuesta modal y con un análisis de la variación del índice, se determinó la presencia de daño por piso.
	7	Structural damage identification of high-rise buildings: An artificial neural network based hybrid procedure (2023)	El modelo fue una estructura tipo marco en 3D de 30 pisos modelado en SAP2000® de donde se extrajeron las respuestas dinámicas. A partir de un enfoque de dos pasos basado en la estadística se desarrolló una red neuronal artificial capaz de obtener información del estado general. Finalmente se diseñó otra red neuronal artificial capaz de detectar elementos dañados.
	8	Assessment of expected damage on buildings subjected to Lorca earthquake through an energy-based seismic index method and nonlinear dynamic response analyses (2014)	Se diseñó un modelo tipo marco de 4 pisos en IDARC® al cual se le atribuyó los datos de vibración de un terremoto ocurrido en España en el 2011. Con el método de análisis modal de vibración y partiendo de las respuestas dinámicas, se predijo razonablemente la distribución de energía de deformación plástica, lo que condujo a la detección de daño a nivel de piso.

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
3 (Numérico)	9	Numerical damage localisation for building systems including dynamic soil-structure interaction (2019)	El método propuso el desarrollo de dos modelos de edificios, uno de 5 pisos y otro de 15 pisos para evaluar con qué tipo de altura es más aproximado. Las respuestas dinámicas se obtuvieron a partir del método de subestructura. El método propuesto evaluó los cambios acumulativos en la curvatura de la función de respuesta de frecuencia de los desplazamientos entre el estado sano y el dañado arrojando mejores resultados para el de 15 pisos.

3.2 Etapa experimental de laboratorio (TRL 4)

Un artículo de investigación que se ubica en etapa experimental de laboratorio se caracteriza por su énfasis en la realización de pruebas rigurosas en un entorno controlado, como un laboratorio especializado. Este tipo de enfoque se distingue por su cuidadosa manipulación de variables y condiciones experimentales para estudiar de manera precisa el comportamiento estructural afrontando diferentes estímulos, además, estas investigaciones suelen involucrar la aplicación de modelos o estructuras a escala. La Tabla 3 contiene los artículos hallados en esta etapa.

Tabla 3

Artículos en etapa experimental de laboratorio (TRL 4)

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
4 (Experimental de laboratorio)	1	Real-Time Structural Health Monitoring and Damage Identification Using Frequency Response Functions along with Finite Element Model Updating Technique (2022)	Se diseñó un modelo tipo marco metálico de 2 pisos 2D a escala de 40cm x 35cm, se sometió a excitación constante a pasos incrementales para medir las aceleraciones. Con el uso de MATLAB® se obtuvo las matrices globales de rigidez y masa. Se desarrolló un modelo de elementos finitos el cual es actualizado con el método de Berman y Nagy con el propósito de que se puedan predecir las respuestas dinámicas e identificar los daños estudiando la reducción en la respuesta de frecuencia.

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
4 (Experimental de laboratorio)	2	Damage detection of structures with parametric uncertainties based on fusion of statistical moments (2019)	El modelo planteado fue un edificio tipo marco 3D de 12 pisos de altura a escala. La fusión de momentos estadísticos adoptó una actualización del modelo y comparando las funciones de densidad de probabilidad de los parámetros de rigidez elemental estructural antes y después del ensayo, fue posible realizar la detección de daños en los elementos.
	3	Damage identification in shear-type structures using a proper orthogonal decomposition approach (2015)	Se diseñó un modelo de edificio a escala de 3 pisos de altura. Con el software ARTeMIS® se obtuvieron las frecuencias naturales. El proceso de identificación de daño se basó en un modelo de elementos finitos realizando una descomposición de valores singulares de la matriz de respuesta dinámica, luego utilizando un algoritmo de optimización de enjambre de partículas se actualizó el modelo para identificar la ubicación y gravedad del daño.
	4	Building Damage Estimates Using Slowness Change in Propagating Waves (2017)	El modelo constó de una estructura 3D de edificio de 5 pisos de altura, igualmente se diseñó un modelo digital en SAP2000® para obtener los modos de vibrar. Se aplicó la interferometría sísmica para extraer las ondas que se propagan entre cualquier par de sensores puestos en la estructura de la cual se deriva la respuesta del edificio y, haciendo ensayos en estado saludable, dañado controladamente y analizando el retraso en el tiempo de viaje de las ondas fue posible determinar la ubicación de daño por piso.
	5	Artificial intelligence-based damage localization method for building structures using correlation of measured structural responses (2023)	Para el estudio se empleó un modelo de edificio 3D de 3 pisos a escala sometido a una excitación inicial y un modelo digital semejante en OpenSees®. Se entrenó una red neuronal de aprendizaje no supervisado basada en la técnica de inteligencia artificial, la cual, a partir de una correlación de los indicadores de daño mostró discrepancia posibilitando la ubicación del daño.
	6	Damage detection of high-rise building using an eigenvalue problem-based inverse solution (2022)	Se diseñó un modelo físico a escala en 2D tipo marco de 3 pisos y 2 modelos numéricos de elementos finitos de 20 y 30 pisos. El procedimiento de solución inversa se aplicó basándose en problemas de valores propios directamente del sistema simplificado de los modelos para detectar los pisos dañados en función de los dos primeros vectores propios.

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
4 (Experimental de laboratorio)	7	Structural Nonlinear Damage Identification Algorithm Based on Time Series ARMA/GARCH Model (2016)	La estructura de estudio trató de un edificio a escala en 3D de 3 pisos. Se construyó un modelo de autorregresión-movimiento promedio (ARMA) de referencia con las respuestas de aceleración medidas, el cual definió la característica no lineal sensible al daño como la desviación estándar condicional del error residual, luego, el rendimiento del algoritmo se evaluó mediante datos experimentales del modelo de 3 pisos para detectar los pisos dañados.
	8	Response surface-based structural damage identification using dynamic responses (2021)	Se diseñó un modelo de un edificio 3D a escala de 6 pisos de alto y un modelo de elementos finitos de las mismas características para ser actualizado por la técnica de metodología de superficie de respuesta (RSM) para identificar daños, en la que el modelo de superficie de respuesta diseñado con MATLAB® y Design Expert® se utilizó como modelo sustituto para la actualización del modelo de elementos finitos.
	9	Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations (2021)	El modelo experimental fue un edificio 3D de concreto de 38 pisos a escala 1:20. Al medir las respuestas dinámicas se evaluaron métodos de entropía a partir de la técnica estadística ANOVA para determinar qué mediciones no lineales ofrecen las capacidades más discriminantes, luego las medidas no lineales fueron clasificadas para evaluar el estado de salud de la estructura.
	10	Damage Detection of Seismically Excited Buildings Based on Prediction Errors (2018)	El modelo diseñado trató de una maqueta a escala de 5 pisos tipo pórtico y un ejemplo numérico de las mismas dimensiones. El método propuesto se basó en errores de predicción generando un banco de estimadores de Kalman los cuales estimaban respuestas basadas en el comportamiento de la estructura en estado sano. Se calcularon índices de daño que podían interpretarse mediante índices estadísticos determinando la ubicación y estado de daño.
	11	Novelty detection on a laboratory benchmark slender structure using an unsupervised deep learning algorithm (2023)	Se planteó un marco de aluminio a escala de 2 pisos. El estudio se llevó a cabo con el algoritmo de Codificadores Automáticos Dispersos (SAE) para identificar alteraciones estructurales en una estructura esbelta. La metodología propuesta obtuvo una naturaleza de análisis no supervisado, con lo cual no requirió de observaciones previamente etiquetadas ni valores de salida deseados.

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
4 (Experimental de laboratorio)	12	Gibbs Sampling for Damage Detection Using Complex Modal Data from Multiple Setups (2021)	Para este método se diseñó una estructura a escala tipo marco de corte de 4 pisos de altura. El método se basó en el muestreo de Gibbs para la detección probabilística. La formulación propuesta se basó en las muestras posteriores de los parámetros de los estados saludables y dañados. El método estudiado también funcionó como una herramienta de calibración para modelos de elementos finitos con amortiguación incorporada.

3.3 Etapa experimental de campo (TRL 5)

Puede un artículo ser clasificado en la etapa experimental de campo cuando se basa en la aplicación directa de métodos y técnicas en entornos del mundo real. Este tipo de investigación se distingue por su implementación en estructuras reales o datos de estas. Dichos estudios suelen incorporar la instrumentación estructural con sensores para la obtención de respuestas dinámicas en condiciones operativa, además, un artículo que adopta el enfoque experimental de campo contribuye significativamente a la validación y aplicación práctica de técnicas cuando se encuentran en fase de laboratorio. La Tabla 3 contiene los artículos hallan en esta etapa.

Tabla 4

Artículos en etapa experimental de campo (TRL 5)

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
5 (Experimental de campo)	1	Bayesian seismic strong-motion response and damage estimation with application to a full-scale seven story shear wall structure (2019)	La estructura de prueba fue un modelo a tamaño real de un edificio de muros de corte de 7 pisos. El artículo presentó un modelo de marco de análisis Bayesiano para la estimación de la respuesta acompañado de un filtro de Kalman sin perfume. El método utilizado demostró resultados semejantes con los observados en la estructura sobre los daños que se presentaron en los ensayos.

TRL	Ranking	Título/año	Modelo de prueba
5 (Experimental de campo)	2	Seismic damage detection of an instrumented RC frame structure with deconvolution interferometry (2022)	El modelo de la prueba fue una estructura de hormigón armado de 7 pisos de altura a tamaño real. La estructura fue expuesta a vibraciones semejantes a las de 4 terremotos base que fueron elegidos por superar la magnitud de 6,0. Se empleó la técnica de interferometría sísmica para identificar los cambios en las características dinámicas de la estructura analizando la onda transversal propagada por el edificio y el cambio de la onda durante los eventos de estudio. Se determinó el escenario en el que se presentó daño comparando los perfiles de velocidad de las ondas transversales para cada evento.

En los TRL 6, 7 y 8 no se clasificó ningún estudio ya que como lo define Manning, se requiere de prototipos o modelos de representación completamente funcionales que se puedan emplear en entornos reales. Aunque algunos modelos se desarrollaron en modelos físicos a escala real, aún no son completamente funcionales, requieren de una serie de ajustes y profundización en el estudio para que cumplan con las expectativas de los autores. En el capítulo (8) Prospectiva se hablará sobre las aspiraciones y planes de ciertos autores en continuar el desarrollo de las técnicas propuestas.

3.4 Etapa comercial (TRL 9)

Se considera que un artículo tiene está en etapa comercial cuando presenta características específicas que lo distinguen por su aplicabilidad práctica y potencial de comercialización. Estas características pueden incluir el empleo de técnicas innovadoras y eficaces para la detección de daños, como el análisis de respuestas dinámicas en tiempo real o el desarrollo de algoritmos computacionales. Además, el artículo puede destacarse por su enfoque en la optimización de costos y recursos otorgándole valor a su implementación en el entorno industrial. Entre la búsqueda que se realizó no se encontró ningún trabajo o artículo científico que implementara sus métodos en la

industria o comercio, pero se obtuvo información sobre algunas organizaciones y empresas que ofrecen servicios sobre el monitoreo de salud estructural y detección de daño sin hacer una revisión de patentes debido a la discreción de información manejada por las empresas, las cuales son:

1. SEGCYC Soluciones con ingenio (<https://www.segcyc.com>) con sede en Bucaramanga, Colombia. Es una empresa de construcción y consultoría cuyo dictamen estructural tiene como finalidad conocer el estado real de los elementos de cualquier estructura y de los materiales que la conforman, a través de un análisis estructural basado en los datos tomados en campo con ensayos y pruebas realizadas para conocer la calidad de los materiales y el estado de degradación posible. Pone de servicio el realizar un análisis donde se busca cuantificar la susceptibilidad estructural (SEGCYC, s.f.).
2. EFE PRIMA CE (<https://www.efeprimace.co/proteccion-sismica/monitoreo-estructural/#catalogo>) es una empresa con sede en Medellín y Armenia, Colombia. Está destinada a la mitigación de desastres por terremoto, líder a nivel nacional en consultoría de diseño estructural, protección sísmica de estructuras y supervisión técnica. Su catálogo de sistemas de monitoreo estructural está formado por: ROBO-CONTROL permanente de MAGEBA (Mageba-Group, s.f.) el cual es un sistema remoto de monitoreo que funciona base de varios sensores; Sistema de instrumentación Sísmica el cual ofrece una instrumentación eficiente y a la medida para estructuras (EFE PRIMA CE, 2022).
3. IPE Control (<https://ipecontrol.com>) con sede en la ciudad de Granada, España. Es una empresa especializada en análisis de daños en los edificios y prestaciones estructurales.

IPE Control realiza pruebas y ensayos de laboratorio para determinar las propiedades y estado de conservación de los elementos constructivos (IPE Control, 2019).

4. Variables empleadas en los estudios

Las variables empleadas en los estudios son aquellos datos de entrada que son requeridos para poder predecir el comportamiento de la estructura y de tal modo detectar los daños estructurales según lo indique la metodología de cada método. Estas variables no son más que las respuestas dinámicas de una estructura las cuales se definen a continuación:

4.1 Aceleración

La aceleración, definida matemáticamente como la derivada de la velocidad respecto al tiempo, representa la variación instantánea de la velocidad en un punto específico de la estructura. Esta magnitud vectorial puede descomponerse en componentes según los ejes cartesianos, y es inducida por cargas dinámicas. Su estudio es fundamental para evaluar la respuesta estructural ante excitaciones externas en las estructuras. Los autores que emplearon esta variable en su estudio son:

1. Park & Oh (2018) en TRL 3, emplearon la excitación de ruido blanco para la carga en el modelo simulado en OpenSees® y utilizaron la técnica de Newmark para realizar un análisis dinámico para producir las respuestas dinámicas, entre las que se encuentra la aceleración para seguidamente determinar el Índice de Participación Modal (MPR), el cual se comparó con la rigidez de la estructura en estado dañado.
2. Prakash & Narasimhan (2018) en TRL 3, obtuvieron la aceleración a partir de unas simulaciones empleando MATLAB® utilizando la metodología Box-Jenkins con el

- objetivo de determinar los coeficientes del Modelo de Autorregresión-Movimiento Promedio (ARMA) los cuales sirvieron para detectar los índices de daño.
3. Erazo & Hernandez (2016) en TRL 3, propusieron un marco el cual mide las respuestas dinámicas de una estructura, entre esas la aceleración, de un edificio con un número limitado de pisos instrumentados a partir de un filtro Bayesiano para reconstruir los historiales temporales de desplazamiento y velocidad y a partir de ellas, se determinó la calidad de impacto y la incertidumbre para la función de índice de daños.
 4. Gatti et al. (2023) en TRL 3, diseñaron una red neuronal de propagación inversa en una base de datos de acelerogramas sintéticos para obtener las respuestas dinámicas del edificio, entre esas, la aceleración siendo codificada como una variable latente para clasificar la posible condición de daño de la estructura.
 5. Pan & Kusunoki (2020) en TRL 3, midieron la aceleración a partir de una simulación mediante el análisis histórico del modelo diseñado en OpenSees® siguiendo las directrices japonesas para la evaluación de estructuras. Con las respuestas dinámicas se ejecutó la evaluación del espectro de capacidad y acompañada del modelo numérico, se validaron los estados de daño evaluando las derivas.
 6. Park et al. (2019) en TRL 3, obtuvieron las respuestas dinámicas, entre esas la aceleración, de un edificio instrumentado a las que luego le aplicaron un análisis de filtro de banda de mediciones de la historia temporal de respuesta para emplear el método de índice de participación modal, denotando valores representativos de la historia temporal de la respuesta modal y finalizando con un análisis de la variación del índice.

7. Singh et al. (2022) en TRL 4, midieron las aceleraciones con acelerómetros inalámbricos en el modelo experimental a escala de 2 pisos, luego, se transformó la aceleración en una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia para obtener las frecuencias naturales. Finalmente se generó un modelo analítico con las respuestas dinámicas para aplicar y resolver las condiciones de contorno para producir valores y vectores propios.
8. Yang et al. (2019) en TRL 4, instrumentaron el modelo de 12 pisos sobre la mesa vibratoria para medir la aceleración la cual, junto a las demás respuestas dinámicas las emplearon para las matrices de movimiento de la estructura. El método propuesto determinó los momentos estadísticos de aceleración y los comparó con los cambios relativos de rigidez de la estructura.
9. Wang et al. (2015) en TRL 4, midieron las aceleraciones del modelo a partir del uso de sensores las cuales luego se consideraron en la descomposición de daños singulares para obtener los modos ortogonales apropiados POM, seguidamente se utilizó la técnica de actualización de modelos para identificar las ubicaciones y severidades de los daños empleando la técnica de algoritmo de optimización de enjambre de partículas y los modos POM.
10. Chen & Yu (2016) en TRL 4, obtuvieron las respuestas de aceleración gracias a la instrumentación del modo de edificio a escala de 3 pisos las cuales se midieron en estado saludable. Se construyó un Modelo Autorregresión-Movimiento Promedio (ARMA) de referencia empleando las aceleraciones como datos de entrada, la cual definió la característica no lineal sensible al daño como la desviación estándar condicional del error residual.

11. Anjneya & Roy (2021) en TRL 4, emplearon excitación con ruido blanco gaussiano de media cero en el modelo a escala de 6 pisos para luego medir las aceleraciones con acelerómetros en cada piso y uno en la base para el movimiento horizontal del suelo. Emplearon las respuestas dinámicas como parámetros de entrada en la metodología de superficie de respuesta junto con un modelo numérico para la actualización de modelos.
12. Amezquita-Sanchez (2021) en TRL 4, midieron las respuestas dinámicas de aceleración a partir de una instrumentación parcial de un modelo con acelerómetros distribuidos de forma estratégica para edificios de gran altura el cual fue sometido a excitaciones dinámicas con el objetivo de identificar patrones o características para determinar la condición de la estructura. Se empleó tres métodos de entropía y una evaluación estadística para las mediciones no lineales.
13. Chang & Chou (2018) en TRL 4, instrumentaron el modelo a escala de 5 pisos con acelerómetros, transductores lineales de desplazamiento variable y acelerómetros uniaxiales que permitieron medir las aceleraciones de la estructura una vez fue ensayada. El método empleado basado en un banco de estimadores de Kalman utilizó las respuestas dinámicas en estado saludable y dañado, lo que luego fue interpretado mediante índices estadísticos los errores para determinar la ubicación y ocurrencia de daños.
14. Finotti et al. (2023) en TRL 4, emplearon acelerómetros piezométricos en el modelo experimental para medir las aceleraciones horizontales de la estructura. Las aceleraciones se emplearon en unos subconjuntos de validación para la metodología propuesta la cual era de naturaleza no supervisada.

15. Das & Debnath (2021) en TRL 4, mediante múltiples configuraciones de acelerómetros se midieron las aceleraciones del modelo que fue sometido a múltiples casos de vibración y daños. Las aceleraciones fueron usadas en la validación del modelo obtenido así los valores y vectores propios de valor complejo.
16. Erazo et al. (2019) en TRL 5, construyeron un modelo a escala real de un edificio de muros de corte la cual fue sometida a registros sísmicos de amplitud creciente hasta que se observaron daños. Se emplearon acelerómetros para medir las aceleraciones. La aceleración en junto las demás respuestas dinámicas, se emplearon para el desarrollo de un modelo de marco de análisis Bayesiano para la estimación de respuesta cuando la instrumentación es escasa basándose en el uso del filtro de Kalman sin perfume.
17. Wen et al. (2022) en TRL 5, instrumentaron cuidadosamente un modelo a escala real con 29 acelerómetros registrando las aceleraciones de la estructura y del suelo. Los acelerómetros registraron datos de terremotos entre 1995 y 1999 en donde el último año la estructura sufrió daños debido al terremoto de Chi-Chi. Las aceleraciones permitiendo recrear perfiles de velocidad de las ondas transversales que, al compararse mediante un análisis de viga de corte elástica isotrópica, permitió detectar los escenarios y pisos de daño.

4.2 Amortiguamiento

El amortiguamiento es un fenómeno físico que consiste en la disipación de la energía mecánica debido a la fricción interna y externa de componentes o partículas. Esta disipación se manifiesta como una disminución continua de la amplitud de las vibraciones, lo que contribuye a que la estructura busque volver al estado de reposo. La importancia del amortiguamiento radica en

su capacidad para mitigar los efectos de las vibraciones forzadas y prolongar la estabilidad de las estructuras. Los autores que emplearon esta variable en su estudio son:

1. Park & Oh (2018) en TRL 3, establecieron un índice de amortiguamiento del 2% para el modelo numérico que desarrollaron en OpenSees® para seguidamente determinar junto con las demás respuestas dinámicas el Índice de Participación Modal (MPR), el cual se comparó con la rigidez de la estructura en estado dañado.
2. Prakash & Narasimhan (2018) en TRL 3, determinaron un índice de amortiguamiento del 5% para el modelo numérico y seguidamente determinar los coeficientes del Modelo de Autorregresión-Movimiento Promedio (ARMA) los cuales sirvieron para detectar los índices de daño.
3. Erazo & Hernandez (2016) en TRL 3, seleccionaron un índice de amortiguamiento del 5% que fue empleado en la ecuación de equilibrio dinámico para el análisis matemático que luego se tuvo en cuenta para el modelo de análisis Bayesiano.
4. Gatti et al. (2023) en TRL 3, propusieron un índice de amortiguamiento del 5% el cual fue utilizado en el diseño del modelo numérico y del método empleado de la red neuronal de propagación inversa (RepGAN).
5. Pan & Kusunoki (2020) en TRL 3, emplearon un índice de amortiguamiento del 5% para luego en el espectro de capacidad inducir disminuciones en el amortiguamiento.
6. Park et al. (2019) en TRL 3, determinaron un índice de amortiguamiento del 2% el cual luego emplearon en el análisis matricial del modelo numérico.
7. Benavent-Climent et al. (2014) en TRL 3, establecieron un índice de amortiguamiento del 5% para ser incluido en el análisis matricial del modelo.

8. Chen et al. (2019) en TRL 3, propusieron un índice de amortiguamiento del 5% del que luego emplearon el modelo de Rayleigh de la estructura y la amortiguación del medio del suelo para considerar simultáneamente el sistema edificio-suelo.
9. Wang et al. (2015) en TRL 4, adoptaron el supuesto de Rayleigh para calcular el amortiguamiento estructural del modelo el cual se tuvo en cuenta para el análisis modal.
10. Oh, et al. (2023) en TRL 4, asignaron un índice de amortiguamiento del 2% en el modelo numérico tridimensional en OpenSees®.
11. Chang & Chou (2018) en TRL 4, establecieron un coeficiente de amortiguamiento de entrada de 2% que fue implementado en el análisis matemático del método.
12. Das & Debnath (2021) en TRL 4, consideraron el modelo de Rayleigh con un coeficiente de amortiguamiento que variaba desde 1% al 10% simulando amortiguamiento viscoso en el modelo matemático ya que el modelo físico presentaba un amortiguamiento viscoso suplementario. Se emplearon los valores de amortiguamiento en los análisis matriciales de movimiento del modelo físico.
13. Erazo et al. (2019) en TRL 5, consideraron para la amortiguación un índice de amortiguamiento no mencionado en el estudio y, utilizaron una matriz de amortiguamiento modal de las respuestas dinámicas previamente medidas con lo que luego se construyó el modelo de análisis Bayesiano para las estimaciones de las respuestas dinámicas en los casos que la instrumentación es insuficiente.
14. Wen et al. (2022) en TRL 5, adoptaron un coeficiente de amortiguamiento que se determinó a partir de una relación con un factor de calidad Q , el cual se obtuvo de la pendiente de la gráfica de la envolvente de respuesta impulsiva de la estructura frente a cada uno de los eventos. En el desarrollo del método de la interferometría de

deconvolución se consideró una relación de amortiguación que permitía observar las disminuciones de energía de la onda transversal.

4.3 Desplazamiento

El desplazamiento es conocido como el vector que une la posición inicial y final de un punto en una estructura. Esta magnitud puede ser medida en cualquier dirección del espacio y es inducida por la acción de cargas estáticas y dinámicas. La evaluación de los desplazamientos estructurales es de suma importancia para garantizar la seguridad y funcionalidad de las edificaciones ya que, deformaciones excesivas pueden comprometer la estabilidad de la estructura.

Los autores que emplearon esta variable en su estudio son:

1. Park & Oh (2018) en TRL 3, emplearon la excitación de ruido blanco para la carga en el modelo simulado en OpenSees® y utilizaron la técnica de Newmark para realizar un análisis dinámico para producir las respuestas dinámicas, entre las que se encuentra el desplazamiento para seguidamente determinar el Índice de Participación Modal (MPR), el cual se comparó con la rigidez de la estructura en estado dañado.
2. Erazo & Hernandez (2016) en TRL 3, propusieron un marco el cual mide las respuestas dinámicas de una estructura, entre esas el desplazamiento, de un edificio con un número limitado de pisos instrumentados a partir de un filtro Bayesiano para reconstruir los historiales temporales de desplazamiento y velocidad y a partir de ellas, se determinó la calidad de impacto y la incertidumbre para la función de índice de daños.
3. Gatti et al. (2023) en TRL 3, diseñaron una red neuronal de propagación inversa en una base de datos de acelerogramas sintéticos para obtener las respuestas dinámicas del edificio, entre esas, el desplazamiento siendo codificado como una variable latente para clasificar la posible condición de daño de la estructura.

4. Pan & Kusunoki (2020) en TRL 3, midieron los desplazamientos a partir de una simulación mediante el análisis histórico del modelo diseñado en OpenSees® siguiendo las directrices japonesas para la evaluación de estructuras. Con las respuestas dinámicas se ejecutó la evaluación del espectro de capacidad y acompañada del modelo numérico, se validaron los estados de daño evaluando las derivas.
5. Park et al. (2019) en TRL 3, obtuvieron el desplazamiento de un edificio instrumentado a la que luego le aplicaron un análisis de filtro de banda de mediciones de la historia temporal de respuesta para emplear el método de índice de participación modal.
6. Nguyen & Livaoglu (2023) en TRL 3, diseñaron un modelo en SAP2000® de la estructura de donde se extrajo los desplazamientos. A partir del método de 2 pasos basado en la estadística desarrolló redes neuronales artificiales empleando como datos de entrada las respuestas dinámicas y realizando comparaciones entre redes para determinar la ubicación del daño.
7. Benavent-Climent et al. (2014) en TRL 3, diseñaron un modelo en IDARC® para calcular las respuestas dinámicas, entre esas el desplazamiento, de un edificio a partir de datos sísmicos que se registraron entre 2003 y 2008 basándose en estructuras parcialmente instrumentadas. Los desplazamientos se utilizaron en los análisis matriciales como también en las relaciones entre desplazamientos y demanda energética para la vulnerabilidad sísmica.
8. Chen et al. (2019) en TRL 3, emplearon la técnica de subestructura para obtener las respuestas de desplazamiento para el modelo. Luego, se empleó en la evaluación de los cambios acumulativos de curvatura de frecuencia de desplazamientos entre los edificios en estado sano y dañado.

9. Yang et al. (2019) en TRL 4, instrumentaron el modelo de 12 pisos sobre la mesa vibratoria para medir los desplazamientos los cuales, junto a las demás respuestas dinámicas las emplearon para las matrices de movimiento de la estructura. El método propuesto determinó los momentos estadísticos de desplazamiento y los comparó con los momentos estadísticos de aceleración de octavo orden.
10. Oh, et al. (2023) en TRL 4, obtuvieron los desplazamientos luego de instrumentar el modelo a escala de 3 pisos sometido a una excitación inicial. Los desplazamientos se utilizaron para entrenar una red neuronal convolucional en función del número de pisos que serviría para luego predecir los desplazamientos de los pisos siguientes cuando se poseen estructuras de gran altura parcialmente instrumentadas.
11. Nguyen & Livaoglu (2022) en TRL 4, midieron los desplazamientos horizontales a partir de una instrumentación con acelerómetros por piso que llevaron a cabo en un modelo experimental de 3 pisos. Los desplazamientos se emplearon para determinar las rigideces relativas de cada piso y llevarse luego a un análisis de condensación guyanesa para generar matrices reducidas del movimiento dinámico de la estructura.
12. Chang & Chou (2018) en TRL 4, midieron los desplazamientos horizontales con acelerómetros LVDT los cuales se emplearon en el análisis de daños por derivas excesivas.
13. Erazo et al. (2019) en TRL 5, construyeron un modelo a escala real de un edificio de muros de corte la cual fue sometida a registros sísmicos de amplitud creciente hasta que se observaron daños. Se emplearon dispositivos GPS y transductores de desplazamiento LVDT para medir los desplazamientos de puntos específicos de la estructura. Los desplazamientos, acompañados de otras respuestas dinámicas, se

utilizaron para desarrollar un modelo de marco de análisis Bayesiano, con el objetivo de estimar la respuesta dinámica en situaciones donde la instrumentación es limitada, basado en la aplicación del filtro de Kalman sin perfume.

4.4 Frecuencia natural

La frecuencia natural se conoce como la frecuencia a la que una estructura tiende a vibrar libremente después de ser excitada por una fuerza o una aceleración inicial. Esta frecuencia depende las propiedades mecánicas de la estructura como la masa, la rigidez y el amortiguamiento. La frecuencia natural es de importante cuidado cuanto a la estabilidad se refiere debido a que si una estructura alcanza su frecuencia natural entrará al fenómeno de resonancia haciendo que aparezcan deformaciones increíblemente grandes que producirán fallas inminentes y el posible colapso de la estructura. Es una variable importante cuando se desea diseñar estructuras que no vibren tanto. Los autores que emplearon esta variable en su estudio son:

1. Park & Oh (2018) en TRL 3, obtuvieron la frecuencia natural a partir de la transformada rápida de Fourier empleando las demás respuestas dinámicas para seguidamente determinar el Índice de Participación Modal (MPR), el cual se comparó con la rigidez de la estructura en estado dañado.
2. Gatti et al. (2023) en TRL 3, calcularon la frecuencia natural del sistema, pero no especificaron su uso dentro del análisis.
3. Park et al. (2019) en TRL 3, obtuvieron la frecuencia natural de un edificio instrumentado a la que luego le aplicaron un análisis de filtro de banda de mediciones de la historia temporal de respuesta para emplear el método de índice de participación modal.

4. Singh et al. (2022) en TRL 4, transformaron la aceleración en una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia para obtener las frecuencias naturales. Finalmente se generó un modelo analítico con las respuestas dinámicas para aplicar y resolver las condiciones de contorno para producir valores y vectores propios.
5. Yamaguchi et al. (2017) en TRL 4, midieron la frecuencia natural a partir de la instalación de sensores en el modelo además de un análisis matemático. Se empleó la frecuencia natural en el análisis dinámico de la estructura, asimismo en las gráficas de respuesta tanto de la estructura como del suelo.
6. Nguyen & Livaoglu (2022) en TRL 4, calcularon a través de la simulación de un modelo de elementos finitos las frecuencias naturales para los escenarios en estado sano y dañado, los cuales posteriormente fueron empleados para el análisis matricial de las ecuaciones de movimiento.
7. Anjneya & Roy (2021) en TRL 4, utilizaron la excitación de ruido blanco gaussiano con media cero en el modelo a escala de 6 pisos, midiendo luego las frecuencias naturales registrando el movimiento con acelerómetros. Las respuestas dinámicas se implementaron como variables de entrada en la metodología de superficie de respuesta en conjunto de una simulación numérica para la actualización de modelos.
8. Chang & Chou (2018) en TRL 4, midieron las frecuencias naturales, pero únicamente en el modelo numérico para hacer la validación del método.

4.5 Modos de vibrar

Los modos de vibrar se definen como las formas en las que una estructura vibra libremente en respuesta después de que ha sido excitada por una fuerza o un aceleramiento inicial. Cada modo posee una frecuencia natural y una forma modal asociada. Los modos de vibrar permiten:

determinar la respuesta de la estructura a diferentes escenarios de excitaciones, diseñar estructuras que sean resistentes a las vibraciones e identificar daños estructurales. Los modos de vibrar pueden ser determinados mediante un análisis matemático que comprende la matriz de masa, matriz de amortiguamiento, matriz de rigidez, el vector de desplazamiento y el vector de fuerza que actúa sobre la estructura. Los autores que emplearon esta variable en su estudio son:

1. Park et al. (2019) en TRL 3, aplicaron la transformada de Fourier a las respuestas dinámicas previamente mencionadas para obtener los modos de vibrar de la estructura modelo.
2. Nguyen & Livaoglu (2023) en TRL 3, diseñaron un modelo en SAP2000® de la estructura de donde se extrajo los modos de vibrar. A partir del método de 2 pasos basado en la estadística desarrolló redes neuronales artificiales empleando como datos de entrada las respuestas dinámicas y realizando comparaciones entre redes para determinar la ubicación del daño.
3. Benavent-Climent et al. (2014) en TRL 3, diseñaron un modelo en IDARC® para calcular las respuestas dinámicas, entre esas, los modos de vibrar que fueron luego utilizados en el análisis pushover estático no lineal con el fin de obtener las curvas de deriva de los pisos.
4. Singh et al. (2022) en TRL 4, obtuvieron los modos de vibrar a partir del análisis matricial.
5. Wang et al. (2015) en TRL 4, calcularon los modos de vibrar con el análisis matricial, se graficaron los cambios y se emplearon para comprar los modos ortogonales apropiados y el algoritmo de optimización de enjambre de partículas.

6. Yamaguchi et al. (2017) en TRL 4, diseñaron un modelo numérico en SAP2000® para obtener una aproximación de los modos de vibrar, y luego de un análisis gráfico determinar las formas críticas que deberían ser considerarse.
7. Nguyen & Livaoglu (2022) en TRL 4, a partir del desarrollo de un modelo de elementos finitos se obtuvieron los valores de frecuencias naturales para los escenarios en estado dañado y estado saludable, luego, se emplearon en el análisis matricial para las ecuaciones de movimiento.
8. Nguyen & Livaoglu (2022) en TRL 4, emplearon MATLAB® para determinar los modos de vibrar y obtener gráficas de ello, las cuales, junto con las respuestas dinámicas, se aplicó el procedimiento de solución inversa para comparar los vectores propios más bajos y valores propios medidos en un estado saludable y dañado.
9. Anjneya & Roy (2021) en TRL 4, emplearon la descomposición de dominio de frecuencia (FDD) para extraer los modos de vibrar de las respuestas dinámicas del modelo. Luego, los modos de vibrar se utilizan para actualizar el modelo de superficie de respuesta (RS) el cual, a partir de diferentes combinaciones de parámetros modales permite comprobar las capacidades relativas para la detección y cuantificación de daño.

5. Herramientas computacionales e instrumentos

En el campo de la detección de daño estructural, es indispensable contar con herramientas computacionales e instrumentación adecuadas que permitan analizar la respuesta estructural de manera precisa y eficiente para el correcto procesamiento y análisis de datos. El uso de modelos computacionales permite diseñar simulaciones para el estudio del comportamiento estructural bajo

diferentes condiciones de carga lo que facilita la localización de daños. Por otra parte, el implemento de instrumentación como acelerómetros, sensores de vibración y deformación proporcionan en tiempo real la toma de datos facilitando el monitoreo del estado de salud que puedan provocar daños. En este capítulo, se mencionan los diferentes métodos e instrumentos que fueron empleados en los artículos para esta revisión.

1. Damage detection of building structures under ambient excitation through the analysis of the relationship between the modal participation ratio and story stiffness (Park & Oh, 2018). Realizaron un análisis dinámico utilizando excitación de ruido, modelaron la estructura de estudio en OpenSees®. Al obtener las respuestas dinámicas previamente mencionadas, estudiaron la relación entre el índice de participación modal y la rigidez de cada piso, observando que, al cambiar la rigidez, los parámetros modales y el índice de participación también cambia, lo que permite examinar la relación entre índice y la pérdida de rigidez en estructuras dañadas.
2. Bayesian Two-Phase Gamma Process Model for Damage Detection and Prognosis (Prakash & Narasimhan, 2018). Emplearon el modelo ARMA utilizando los gráficos de control multivariado para generar indicadores de degradación de la resistencia estructural. El método de actualización Bayesiano permitió ajustar las estimaciones a lo largo del tiempo usando los datos de las respuestas dinámicas para la detección del daño.
3. Bayesian Model–Data Fusion for Mechanistic Postearthquake Damage Assessment of Building Structures (Erazo & Hernandez, 2016). Idearon un estudio para estructuras parcialmente instrumentadas de las cuales se puedan obtener algunas de las respuestas sísmicas. También investigaron la robustez a errores moderados en el modelo

- estructural y de movimiento del suelo, empleando un modelo híbrido no lineal y el registro del terremoto de Northridge de 1994. El método propuesto fue el modelo de análisis Bayesiano empleando el filtro de Kalman sin aroma que permitió determinar la condición de estado de la estructura.
4. Multi-storey shear type buildings under earthquake loading: Adversarial learning-based prediction of the transient dynamics and damage classification (Gatti et al., 2023). Propusieron una red neuronal de propagación inversa la cual codificó las señales de entrada en tres tipos de variables latentes: categóricas, continuas y de ruido. Las variables categóricas indicaron la posible condición de daño relacionada con las respuestas estructurales previas. El método fue ensayado en un modelo de una estructura de 39 pisos siendo posible detectar los pisos dañados.
 5. Aftershock damage prediction of reinforced-concrete buildings using capacity spectrum assessments (Pan & Kusunoki, 2020). Ejecutaron la evaluación del espectro de capacidad reduciendo la amortiguación equivalente y con una simulación numérica de un edificio de 8 pisos en OpenSees® validaron los estados de daño evaluando los ángulos máximos de deriva de cada piso.
 6. Model updating method for damage detection of building structures under ambient excitation using modal participation ratio (Park et al., 2019). Propuso como método el índice de participación modal el cual supone que la estructura está bajo excitación ambiental y denota valores representativos de la historia temporal de la respuesta modal, aplicando reducción de la rigidez y analizando la variación del índice de participación modal, determinaron la presencia de daño por piso.

7. Structural damage identification of high-rise buildings: An artificial neural network based hybrid procedure (Nguyen & Livaoğlu, 2023). Desarrollaron un modelo de 30 pisos en SAP2000® para obtener las respuestas dinámicas y a partir de un enfoque de dos pasos basados en la estadística diseñaron una red neuronal artificial con la cual fue posible obtener información de los pisos dañados, luego generaron una segunda red neuronal artificial que fue capaz de detectar los elementos con daño.
8. Assessment of expected damage on buildings subjected to Lorca earthquake through an energy-based seismic index method and nonlinear dynamic response analyses (Benavent-Climent et al., 2014). Se basaron en las respuestas dinámicas de un terremoto ocurrido en España en el 2011 basándose en datos recopilados de estructuras parcialmente instrumentadas con acelerómetros construidas entre el 2003 y el 2008. Con ayuda del software IDARC® diseñaron un modelo base de 4 pisos donde llevaron a cabo un análisis modal de vibración para predecir razonablemente la distribución de energía de deformación plástica lo cual permite detectar el nivel de daño por piso.
9. Numerical damage localisation for building systems including dynamic soil-structure interaction (Chen et al., 2019). El método propuesto evaluó los cambios acumulativos en la curvatura de la función de respuesta de frecuencia de los desplazamientos entre el modelo sano y el modelo dañado y aplicaron el caso del sistema edificio-suelo para validar su efectividad. El método arrojó resultados más aproximados para los modelos de mayor altura.
10. Real-Time Structural Health Monitoring and Damage Identification Using Frequency Response Functions along with Finite Element Model Updating Technique (Singh et al., 2022). Midieron las aceleraciones en un modelo experimental a escala de 2 pisos

usando acelerómetros inalámbricos bajo excitación constante de 100 a 400 rpm. Las mediciones se transformaron al dominio de la frecuencia para obtener las frecuencias naturales y determinar los modos de vibración. Desarrollaron un modelo de elementos finitos, actualizado con el método de Berman y Nagy, para predecir respuestas dinámicas e identificar daños a través de la reducción en la respuesta de frecuencia. En el procesamiento de datos con la ayuda de MATLAB® generaron las matrices globales de masa y rigidez, resolviendo las condiciones de contorno para obtener valores y vectores propios.

11. Damage detection of structures with parametric uncertainties based on fusion of statistical moments (Yang et al., 2019). Obtuvieron las respuestas dinámicas como aceleración, desplazamiento, frecuencia natural y formas modales de un modelo 3D a escala de 12 pisos ensayado en una mesa vibratoria y empleando acelerómetros. La fusión de momentos estadísticos permitió actualizar el modelo, y al comparar las funciones de densidad de probabilidad de la rigidez estructural antes y después del ensayo, se pudieron detectar daños en los elementos.
12. Damage identification in shear-type structures using a proper orthogonal decomposition approach (Wang et al., 2015). Midió las aceleraciones de un modelo de edificio a escala de tres pisos en 3D equipado con un acelerómetro por piso. Las frecuencias naturales las obtuvieron a partir de un análisis en ARTEMIS®. La identificación de daños se dividió en dos pasos, primero, basándose en un modelo de elementos finitos realizaron una descomposición de valores singulares de la matriz de respuesta de aceleración para obtener los modos ortogonales adecuado, luego,

- empleando el algoritmo de optimización de enjambre de partículas se actualizó el modelo que conllevaba a la detección y ubicación del daño.
13. Building Damage Estimates Using Slowness Change in Propagating Waves (Yamaguchi et al., 2017). Instalaron sensores en cada nivel de un modelo 3D de 5 pisos para medir las frecuencias naturales. Las formas modales las obtuvieron con SAP2000®. Los autores emplearon la técnica de la interferometría sísmica para extraer las ondas propagadas entre los sensores, lo que permite analizar la respuesta del edificio. Realizaron pruebas en condiciones saludables y con daño controlado. El análisis del retraso en el tiempo de viaje de las ondas permitió identificar el piso afectado.
 14. Artificial intelligence-based damage localization method for building structures using correlation of measured structural responses (Oh, et al., 2023). Propusieron un modelo 3D de 3 pisos y midieron los desplazamientos con sensores luego de que le indujeran una excitación inicial al modelo. Entrenaron una red neuronal de aprendizaje no supervisado utilizando inteligencia artificial, la cual, mediante la correlación de indicadores de daño, detectó discrepancias y permitió localizar el daño. Complementaron el estudio con un modelo numérico desarrollado en OpenSees®.
 15. Damage detection of high-rise building using an eigenvalue problem-based inverse solution (Nguyen et al., 2022). Midieron los desplazamientos a un modelo experimental de 3 pisos empleando un acelerómetro por piso. Las frecuencias naturales y los modos de vibración los obtuvieron mediante modelos numéricos de elementos finitos para estructuras de 20 y 30 pisos respectivamente. Aplicaron el procedimiento de solución inversa, basado en problemas de valores propios al sistema simplificado para detectar

- pisos dañados empleando los dos primeros vectores propios y valores propios medidos en estado dañado. El método fue validado exitosamente en modelos numéricos de hasta 30 pisos y un modelo experimental a escala de 3 pisos.
16. Structural Nonlinear Damage Identification AlgorithmBased on Time Series ARMA/GARCH Model (Chen & Yu, 2016). Midieron las aceleraciones de un edificio a escala 3D de 3 pisos en estado saludable empleando acelerómetros. Construyeron un Modelo de Autorregresión-Movimiento Promedio (ARMA) de referencia utilizando las respuestas dinámicas, definieron la característica no lineal sensible al daño como la desviación estándar condicional del error residual. Evaluaron el rendimiento del algoritmo con datos experimentales del modelo de 3 pisos para detectar pisos dañados. Los resultados indicaron que el método estimó eficazmente la extensión del daño no lineal.
17. Response surface-based structural damage identification using dynamic responses (Anjneya & Roy, 2021). Construyeron un modelo de una estructura 3D a escala de 6 pisos de alto a al cual le indujeron movimientos con una mesa vibradora. Las aceleraciones fueron medidas con acelerómetros en cada piso y uno en la base que registró las aceleraciones horizontales del suelo. Las frecuencias naturales las midieron a partir del ensayo de vibración libre conociendo las propiedades mecánicas de los materiales del modelo. La metodología de superficie de respuesta (RSM) generó una relación entre los parámetros de entrada y algunas de las respuestas dinámicas empleando puntos de diseño generados a través de diseño de experimentos. Diseñaron un modelo de elementos finitos el cual fue actualizado por la técnica RSM, lo que sirvió para la detección de daño.

18. Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations (Amezquita-Sanchez, 2021). Diseñaron un modelo 3D de un edificio de concreto de 38 pisos a escala 1:20, al que le indujeron diferentes tipos de daño. Midieron las aceleraciones con acelerómetros que se pusieron en ciertos pisos para hacer más rentable la instrumentalización. Analizaron las respuestas dinámicas utilizando seis medidas no lineales: entropía de Shannon, de Renyi, aproximada, muestral, de permutación y de dispersión, con el fin de identificar patrones que permitieran evaluar el estado estructural. Posteriormente, los valores que obtuvieron de tres de esas medidas los evaluaron mediante el análisis de varianza ANOVA para identificar cuáles de estas mediciones no lineales ofrecían mayor capacidad discriminante en la evaluación de la condición estructural.
19. Damage Detection of Seismically Excited Buildings Based on Prediction Errors (Chang & Chou, 2018). Diseñaron un modelo a escala de un pórtico metálico de 5 pisos sobre una mesa vibratoria, validándose con un ejemplo numérico de las mismas dimensiones. El modelo físico lo instrumentaron con acelerómetros y transductores LVDT; se emplearon 2 acelerómetros uniaxiales y un LVDT en cada piso, además de uno en la mesa vibratoria. Los acelerómetros midieron las respuestas dinámicas de aceleración y frecuencias, mientras que los LVDT captaron desplazamientos. Los datos de los LVDT los usaron para evaluar el daño estructural a partir de índices de deriva y desplazamientos permanentes. El método de detección de daño se basó en errores de predicción. Identificaron un modelo de entrada-salida de la estructura no dañada utilizando un enfoque de identificación en el dominio de frecuencia. El modelo se convirtió en un banco de estimadores Kalman, los errores de predicción que calcularon

- a partir de las diferencias entre las respuestas medidas las interpretaron como índices de daño.
20. Novelty detection on a laboratory benchmark slender structure using an unsupervised deep learning algorithm (Finotti et al., 2023). Diseñaron como modelo físico un marco de aluminio a escala de 2 pisos sobre una mesa vibratoria y lo instrumentaron con 4 acelerómetros unidireccionales piezoeléctricos con los que midieron las aceleraciones horizontales. Aplicaron una carga de impacto utilizando péndulo. Los autores investigaron el rendimiento del algoritmo de Codificadores Automáticos Dispersos (SAE) para identificar alteraciones estructurales en una estructura esbelta sometida a diferentes escenarios de vibración y daños.
 21. Gibbs Sampling for Damage Detection Using ComplexModal Data from Multiple Setups (Das & Debnath, 2021). Desarrollaron un ejercicio de validación a partir de una estructura tridimensional de 4 pisos unida con amortiguadores viscosos suplementarios y una estructura de acero de laboratorio considerando múltiples casos de daños y diferentes ubicaciones de sensores. En este artículo los autores presentaron una técnica novedosa para la detección probabilística de daño fundamentada en la técnica de muestreo de Gibbs mediante la utilización de datos modales complejos de múltiples configuraciones de sensores cuando la cantidad de los mismos es limitada. Consideraron en el método aplicado una amortiguación viscosa
 22. Bayesian seismic strong-motion response and damage estimation with application to a full-scale seven story shear wall structure (Erazo et al., 2019). Emplearon el uso de acelerómetros, dispositivos GPS y transductores de desplazamiento (LVDT) para medir las respuestas dinámicas de la estructura. Los autores presentaron un modelo de

- análisis Bayesiano utilizando un filtro de Kalman sin perfume para combinar un modelo estructuras con mediciones limitadas, mejorando la capacidad de predicción. El modelo de ensayo era una estructura a escala real de un edificio de muros de corte de siete pisos la cual se hizo vibrar con excitaciones incrementales hasta presentar fallas. Para reducir la incertidumbre del modelado, estimaron simultáneamente con la respuesta dinámica un conjunto de parámetros que definen los modelos estructurales, estrategia conocida como estimación conjunta de la respuesta del sistema.
23. Seismic damage detection of an instrumented RC frame structure with deconvolution interferometry (Wen et al., 2022). Los autores tomaron como modelo una estructura de armazón de hormigón armado de 7 pisos de altura a escala real la cual fue instrumentada de forma estratégica con 29 acelerómetros, 3 de ellos en campo libre para medir la aceleración del suelo. Los acelerómetros registraron datos de varios terremotos ocurridos entre 1995 y 1999 pero para el estudio fueron seleccionados aquellos con una magnitud 6,0 o mayor. El estudio describe el uso de la interferometría sísmica en deconvolución para identificar cambios en las características dinámicas de una estructura, analizando la propagación de ondas transversales y la variación de su velocidad durante diferentes eventos. Los autores modelaron una viga de corte elástica isotrópica homogénea de dos capas en donde la capa 1 va del primer piso al cuarto piso y la capa 2 va del cuarto piso al séptimo piso. El análisis de los perfiles de velocidad de las ondas para cada uno de los eventos en la capa de arriba y la capa de debajo de la viga modelada permitió determinar el escenario en el que se presentó el daño.

6. Síntesis de resultados

En este capítulo se presenta en la Tabla 5, una síntesis de la literatura relevante analizada en este trabajo de investigación. La tabla contiene: las ventajas y desventajas de cada trabajo, sus autores, el nombre de la revista, el cuartil de Scimago® y el índice H de cada revista.

Tabla 5

Tabla de síntesis de las ventajas y desventajas de los métodos propuestos en los artículos consultados

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
		Damage detection of building structures under ambient excitation through the analysis of the relationship between the modal participation ratio and story stiffness (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Este estudio no requiere la extracción de parámetros modales ampliamente utilizados en estudios anteriores sobre la detección de daños, simplemente utiliza un índice de participación modal MPR el cual es un valor representativo de la respuesta modal extraída de las respuestas dinámicas medidas en pruebas de vibración ambiental debido a la dificultad de medición luego de un sismo cuando el edificio no está instrumentado. 	<ul style="list-style-type: none"> Este estudio asume que se requiere la actualización del modelo utilizando la respuesta modal o MPR de un edificio saludable para construir un modelo de referencia, que pueda usarse para simulaciones del estado dañado de un edificio para determinar la función de severidad de daño. No logra identificar los elementos dañados, solamente pisos completos. 	Hyo Seon Park Byung Kwan Oh	Journal of Sound and Vibration (Q1)	210
		Bayesian Two-Phase Gamma Process Model for Damage Detection and Prognosis (2018)	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad de detectar puntos de alteración y cambios en la ruta de degradación, utilizando un enfoque basado puramente en datos sin la necesidad de datos de fallas experimentales. El método propuesto se puede aplicar en cualquier momento durante el funcionamiento del sistema, y el tiempo de falla se puede predecir en función de este umbral. 	<ul style="list-style-type: none"> Es difícil evitar completamente las falsas alarmas por diversas razones, como el ruido de medición y la selección imperfecta del modelo. El método no puede detectar cambios repentinos, por ejemplo, una pérdida súbita de rigidez del miembro o una conexión comprometida. 	G. Prakash S. Narasimhan	Journal of Engineering Mechanics (Q1)	145
		Bayesian Model-Data Fusion for Mechanistic Postearthquake Damage Assessment of Building Structures (2016)	<ul style="list-style-type: none"> Permite conocer la respuesta dinámica de una edificación a partir del espectro de sismo registrado, esto para cuando las edificaciones están parcialmente o no instrumentadas. El modelo puede capturar el comportamiento no lineal del diseño de vigas débiles y columnas fuertes. 	<ul style="list-style-type: none"> El método ofrece la posibilidad de hacer el estudio sin conocer la respuesta dinámica de la edificación pero, luego menciona que la posibilidad de hacer una predicción falsa es alta. 	Kalil Erazo Eric M. Hernandez	Journal of Engineering Mechanics (Q1)	145

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
		Multi-storey shear type buildings under earthquake loading: Adversarial learning-based prediction of the transient dynamics and damage classification (2023)	<ul style="list-style-type: none"> El principal beneficio que ofrecen las estrategias basadas en wavelets el cual es una transición de un sistema de valor de tiempo a un sistema de tiempo (frecuencia), es la capacidad de preservar señales discontinuas y no estacionarias con una representación tiempo-frecuencia parsimoniosa. 	<ul style="list-style-type: none"> Aunque puede funcionar como un método de alerta temprana, no permite ubicar los elementos dañados, solamente evalúa el daño de forma integral de la estructura. 	Filippo Gatti Luca Rosafalco Giorgia Colombero Stefano Mariani Alberto Corigliano	Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Q1)	130
		Aftershock damage prediction of reinforced-concrete buildings using capacity spectrum assessments (2020)	<ul style="list-style-type: none"> Predice los daños que pueden ser ocasionados por una réplica en donde en ocasiones, pueden ser más graves que el sismo principal. Está basado en los datos obtenidos del sismo principal para estudiar y predecir las posibles fallas de una réplica, dado que está basado en datos no requiere de un modelo numérico de la estructura. 	<ul style="list-style-type: none"> Las secuencias sísmicas reales dependiendo del tipo de sitio podrían presentar diferentes efectos sobre las demandas de las estructuras, en este sentido, se requieren análisis estadísticos y un factor de reducción más preciso de las réplicas, algo que se dejará para estudios posteriores. 	Haoran Pan Koichi Kusumoki	Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Q1)	130
		Model updating method for damage detection of building structures under ambient excitation using modal participation ratio (2019)	<ul style="list-style-type: none"> No necesita extraer un parámetro modal, sino que utiliza el índice de participación modal que se define por un valor representativo de las respuestas modales extraído de las respuestas de vibración medidas con sensores con excitación ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> Su evaluación sólo es llevada a cabo en estructuras de dos dimensiones (x,y). 	Hyo Seon Park JunHee Kim Byung Kwan Oh	Measurement: Journal of the International Measurement Confederation (Q1)	128

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
3 (Numérico)	7	Structural damage identification of high-rise buildings: An artificial neural network based hybrid procedure (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Permite encontrar fallas en columnas, entrepisos y muros de corte en edificios de gran altura. • El método con redes neuronales posibilita abordar estudios en edificios de gran altura cuyas características basadas en vibraciones son complicadas debido a los grados de libertad posibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los niveles de ruido pueden ser una limitante para ubicar daños en columnas arrojando falsas predicciones. • Uno de los inconvenientes de la implementación de redes neuronales para estructuras grandes es la construcción de combinaciones de muestreo, ya que la cantidad de parámetros desconocidos deseados es enorme, en el orden de centenas de miles o millones. 	Quy Thue Nguyen Ramazan Livaoglu	Engineering Failure Analysis (Q1)	100
	8	Assessment of expected damage on buildings subjected to Lorca earthquake through an energy-based seismic index method and nonlinear dynamic response analyses (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • El método del índice sísmico basado en energía predice razonablemente la distribución de energía de deformación plástica entre los pisos. 	<ul style="list-style-type: none"> • El método no contempla varios factores y pueden influir en la predicción de los resultados como la calidad de los materiales o los efectos del suelo. 	A. Benavent-Climent A. Escobedo J. Donaire-Avila E. Oliver-Saiz A. L. Ramírez-Márquez	Bulletin of Earthquake Engineering (Q1)	91
	9	Numerical damage localisation for building systems including dynamic soil-structure interaction (2019)	<ul style="list-style-type: none"> • El método muestra buenas predicciones con gran robustez para diversas rigideces del suelo. • Permite encontrar y examinar daños en la sección de la estructura que no es visible, es decir la que se encuentra bajo el suelo. • Encuentra daños con índices de daño pequeños de hasta 1%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene un mejor rendimiento en escenarios libres de ruido y con un nivel de severidad de daño leve. • La no linealidad en el estado del suelo puede ser un impedimento para que el método sea aplicado. 	Shi-Shuenn Chen Jun-Yang Shi Yi-Ying Wu	Structure and Infrastructure Engineering (Q2)	71

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
	1	Real-Time Structural Health Monitoring and Damage Identification Using Frequency Response Functions along with Finite Element Model Updating Technique (2022)	<ul style="list-style-type: none"> Propone que este método puede aplicarse no sólo en edificaciones sino a cualquier estructura para la cual se pueda preparar un modelo de elemento finitos y analizar un análisis vibratorio. Su precisión es bastante acertada incluso sometiendo el modelo a estímulos vibratorios de diferentes frecuencias. Los sensores inalámbricos simplifican el trabajo logístico. 	<ul style="list-style-type: none"> Sólo ha sido probado con modelos de hasta 2 pisos con lo cual es muy limitada su aplicabilidad. 	Tarunpreet Singh Shankar Sehgal Chander Prakash Saurav Dixit	Sensors (Q1)	245
	2	Damage detection of structures with parametric uncertainties based on fusion of statistical moments (2019)	<ul style="list-style-type: none"> La comparación de resultados del método propuesto supera a otros índices existentes basados en momentos estadísticos en la identificación experimental. 	<ul style="list-style-type: none"> La predicción de resultados empeora a medida que hay mayor contaminación por ruido, esto es difícil de controlar si se hace el análisis con una estructura real. El método expuesto no es útil cuando la estructura se encuentra en un estado de gran no linealidad. 	Y. Yang JL Li CH Zhou Ley SS L. Lv	Journal of Sound and Vibration (Q1)	210
	3	Damage identification in shear-type structures using a proper orthogonal decomposition approach (2015)	<ul style="list-style-type: none"> El método es eficaz bajo la influencia de un ruido de medición con una intensidad de hasta el 5%, arrojando un error absoluto máximo del 1.1%. 	<ul style="list-style-type: none"> El modelo ignora los momentos rotacionales que pueden aparecer en los pisos cuando un sismo real aparece. 	Dansheng Wang Wei Xiang Peng Zeng Hongping Zhu	Journal of Sound and Vibration (Q1)	210

4 (Experimental de laboratorio)

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
	4	Building Damage Estimates Using Slowness Change in Propagating Waves (2017)	<ul style="list-style-type: none"> Al aplicar métodos de respuesta de propagación de ondas los parámetros de las ondas de alta frecuencia que se propagan son sensibles a daños estructurales locales. El método fue probado en una estructura a gran escala de acero de 5 pisos arrojando resultados positivos en el análisis de cambio de velocidad de propagación de ondas. 	<ul style="list-style-type: none"> Los daños sólo pueden identificarse cuando los cambios relacionados pueden detectarse por encima del nivel de ruido o error asociado con las mediciones y el análisis de datos. Para disminuir el porcentaje de error se deben tomar tiempos de registro bastante prolongados de hasta 90 minutos. 	Mayako Yamaguchi Masahiro Kuruta Masatoshi Miyazawa	Journal of Structural Engineering (Q1)	178
	5	Artificial intelligence-based damage localization method for building structures using correlation of measured structural responses (2023)	<ul style="list-style-type: none"> Detecta daños en los que la rigidez de los pisos se redujo desde un 20%. El estudio realizado detecta daños con alta precisión en modelos numéricos de hasta 10 pisos. Aunque se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, es un aporte bastante significativo empleando inteligencia artificial en donde los autores prometen el desarrollo del método para una detección más sensible y poder medir el daño. 	<ul style="list-style-type: none"> Si se presentan microfallas por temblores de baja intensidad es posible que no sean detectados. Solo ha sido probado con modelos físicos de baja altura de hasta 4 pisos. La red neuronal requiere de muchos ajustes y correlaciones de indicadores de daño aumentando la dificultad de interpretación y riesgos de error. 	Byung Kwan Oh Woo Chan Jung Hyo Seon Park	Engineering Applications of Artificial Intelligence (Q1)	137
	6	Damage detection of high-rise building using an eigenvalue problem-based inverse solution (2022)	<ul style="list-style-type: none"> Prometedor para detectar daños en edificios de gran altura. Sólo requiere un acelerómetro uniaxial por piso para medir la respuesta dinámica. El procedimiento de detección de daño se valida con éxito en estructuras de 20 y 30 pisos. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede haber predicciones falsas debidas a al ambiente. En condiciones reales la temperatura, radiación solar y los elementos no estructurales tienen una influencia significativa en la precisión de datos. Para trabajos futuros, el procedimiento deberá verificarse directamente para detectar daños en edificios reales considerando completamente los efectos del ruido. 	Quy Thue Nguyen Ramazan Lavaglu	Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Q1)	130

4 (Experimental de laboratorio)

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
	7	Structural Nonlinear Damage Identification Algorithm Based on Time Series ARMA/GARCH Model (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • El método propuesto de detección de daños no lineales puede proporcionar resultados con una precisión más alta que aquellos utilizando únicamente el modelo de autorregresión media móvil (ARMA). • La solución obtenida por el modelo ARMA/GARCH es más robusta frente a la variedad operativa y • El modelo ARMA/GARCH es capaz de identificar algunos daños no lineales relativamente pequeños. 	<ul style="list-style-type: none"> • No logra identificar daños relativamente pequeños ya que el algoritmo no es sensible. • El método debe ser refinado debido a que aunque puede determinar que la estructura tiene fallo, aún no tiene el criterio para ubicar el daño. 	Liu-je Chen Ling Yu	Advances in Structural Engineering (Q1)	102
	8	Response surface-based structural damage identification using dynamic responses (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • La metodología de superficie de respuesta se puede utilizar para reemplazar el lento paso de actualización, basado en el modelo de elementos finitos con un modelo sustituto basado en superficie de respuesta. 	<ul style="list-style-type: none"> • La presentación de ruido de 40 dB arroja una cuantificación adecuada, pero a medida que el ruido aumenta, los resultados empeoran lo cual da un punto malo debido a que en la mayoría de ciudades grandes a raíz del tráfico, el ruido supera esta cuantía. 	Kumar Anjneya Koushik Roy	Structures (Q1)	54
	9	Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • Emplea el método análisis de varianza y entropía de Shannon el cual es una medida no lineal eficiente para la detección de daños en estructuras civiles, porque se obtiene una precisión del 98% para el monitoreo de edificios de gran altura. • No requiere una rigurosa instrumentación de la edificación, como en otros métodos en los que se necesitan acelerómetros en cada planta aumentando el costo de operación y mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • El método sólo permite conocer el estado de la salud de la estructura como conjunto, es decir, si la estructura está en un estado saludable, incipiente, moderado, severo o cerca al colapso más no determina la ubicación o los elementos dañados. 	Juan P. Amezcua-Sanchez	Journal of Vibration and Control (Q2)	86

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
	10	Damage Detection of Seismically Excited Buildings Based on Prediction Errors (2018)	<ul style="list-style-type: none"> El método propuesto detecta con éxito el daño en términos de ubicación y nivel. 	<ul style="list-style-type: none"> El método es centrado solamente para encontrar un elemento dañado a la vez, con lo cual es necesario profundizar el estudio en investigaciones futuras. 	Chia-Ming Chang Jau-Yu Chou	Journal of Aerospace Engineering (Q2)	59
	11	Novelty detection on a laboratory benchmark slender structure using an unsupervised deep learning algorithm (2023)	<ul style="list-style-type: none"> Una ventaja de la metodología propuesta, es que los datos se procesan directamente en el dominio del tiempo, evitando la estimación y seguimiento de parámetros modales además, la influencia de factores externos como la temperatura está implícitamente modelada por una red neuronal de Autoencoders Dispersos. No necesita observaciones previamente etiquetadas ni variables de salida deseadas. 	<ul style="list-style-type: none"> El método requiere profundización ya que sus datos han sido validados solo para estructuras planas esbeltas. 	Rafaele Piazzaroli Finotti Clayton Felício da Silva Pedro Henrique Eveling O Flávio de Souza Barbosa Alexandre Abrahão Cury Rafael Cerqueira Silva	Latin American Journal of Solids and Structures (Q2)	42
4 (Experimental de laboratorio)	12	Gibbs Sampling for Damage Detection Using Complex Modal Data from Multiple Setups (2021)	<ul style="list-style-type: none"> Conserva la ventaja típica de no requerir coincidencia de modos. El enfoque de muestreo de Gibbs es eficiente en la identificación estructural y se sugiere como una técnica útil en el monitoreo que utiliza sensores limitados. La técnica propuesta puede también emplearse como una alternativa útil para la calibración de modelos de elementos finitos, con amortiguación sin requisito de coincidencia de modo basado en datos modales complejos. 	<ul style="list-style-type: none"> El método permite conocer de forma global el piso afectado pero no da más información sobre el elemento afectado en particular y la severidad de daño. 	Ayan Das Nirmalendu Debnath	ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering (Q2)	28

TRL	Ranking	Título/año	Ventajas	Desventajas	Autor(es)	Título de la Revista (Q)	Index-H
5 (Experimental de campo)	1	Bayesian seismic strong-motion response and damage estimation with application to a full-scale seven story shear wall structure (2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene la capacidad de estimar con precisión la respuesta tiempo-historia y las demandas de interés de ingeniería, como desplazamientos y aceleraciones del piso, derivas entre pisos, corte de la base y momento de vuelco inducido por fuertes excitaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • La precisión de la respuesta prevista se puede emplear para la estimación de respuesta y daño en estructuras ínicamente sujetas a fuertes terremotos. 	Kaill Erazo Babak Moavenic Satish Nagarajaiah	Engineering Structures (Q1)	187
	2	Seismic damage detection of an instrumented RC frame structure with deconvolution interferometry (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • El método fue probado con datos de un terremoto que indujo a la estructura en un estado no lineal, con lo cual su aplicación puede encontrar potenciales daños en estructuras fuertemente dañadas por sismos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere una instrumentación rigurosa de la estructura. 	Weiping Wen Xulin Li Duofa Ji Changhai Zhai	Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Q1)	130

Nota. * Las ventajas y desventajas permiten analizar las virtudes y defectos que cada método posee al momento de ser empleado. La información fue obtenida de la lectura individual realizada a cada artículo.

Distinguir las ventajas y desventajas de los métodos permite hacer un análisis directo sobre las virtudes y falencias que cada uno posee y pueden depender de la sensibilidad de las herramientas empleadas, del análisis numérico, de la metodología, del tipo de medición que se realiza en la estructura, del tipo de instrumento, la eficiencia según el tipo de inspección y el tiempo invertido para la toma de datos y procesamiento, la forma en la que se deben interpretar los resultados y las limitaciones que se puedan presentar durante el proceso.

7. Prospectiva

El trabajo futuro es una nueva ventana hacia el desarrollo de tecnologías e instrumentos que permitan resolver problemas de una manera más simplificada y precisa. En el análisis que se realizó sobre los artículos recopilados para este estudio se encontraron algunas apuestas interesantes en cada una de las etapas de maduración de proyectos con el fin de mejorar los métodos y herramientas en la detección de daño estructural. A continuación, se hablará sobre la propuesta que más destacó en cada clasificación de la etapa de maduración basado en las ventajas, desventajas, herramientas y precisión.

7.1 Prospectiva en la etapa numérica

El artículo *Structural damage identification of high-rise buildings: An artificial neural network based hybrid procedure* (Nguyen & Livaoğlu, 2023) ofrece una visión de futuro brillante debido a que su método emplea redes neuronales artificiales ofreciendo una alta gama de posibilidades. El método propuesto para la identificación de daño es confiable ya que fue validado en un modelo numérico de edificio de 30 pisos o 90 metros y en 3D, algo sumamente beneficioso ya que la mayoría de los métodos son validados en modelos de estructuras planas. La información

modal requerida solamente necesita una instrumentación sencilla que consta de un acelerómetro biaxial por piso representando solamente el 2% de la cantidad total de grados de libertad disponibles haciendo que el tratamiento de datos sea considerablemente acotado. En estudios futuros, el método debe poder considerar los niveles de ruido ya que su sensibilidad hace que niveles de ruido superiores al 1.5% alteren los resultados arrojando datos falsos independientemente de la severidad de daño, además que al tratarse de una red neuronal la construcción y combinación de muestreo que realiza la red requiere de altos recursos computacionales.

7.2 Prospectiva en la etapa experimental de laboratorio

La investigación *Artificial intelligence-based damage localization method for building structures using correlation of measured structural responses* (Oh et al., 2023) proporciona una de las apuestas más interesantes, ya que desarrolla un método de localización de daños basado en el aprendizaje no supervisado o inteligencia artificial realizando un análisis de correlación de las discrepancias entre los indicadores de daño. Inicialmente se desarrolló un estudio numérico en donde se consiguió un importante avance para que el método pasara de detectar la reducción de la resistencia de la estructura del 50% al 20% aumentando de este modo su precisión. Asimismo, fue ensayado en una estructura a escala de 3 pisos en 3D obteniendo resultados positivos identificando con éxito varias ubicaciones de daño en la estructura. Para futuros estudios el autor propone el desarrollo de un método más sensible para la detección de daño cuando la disminución de la resistencia estructural es menor que el 20% alcanzado, aumentando la posibilidad de la rehabilitación estructural cuando ocurren terremotos menores.

7.3 Prospectiva en la etapa experimental de campo

La publicación *Bayesian seismic strong-motion response and damage estimation with application to a full-scale seven story shear wall structure* (Erazo et al., 2019) tiene un importante potencial para la evolución investigativa en la detección de daño estructural ya que es de los pocos estudios que han llevado a cabo la experimentación con estructuras a escala real, para este caso de 7 pisos y además, sometiendo la estructura a eventos de sismo para tener un resultado mucho más a fin con la realidad. El método presenta un marco Bayesiano para la estimación de la respuesta sísmica permitiendo evaluar la integridad estructural. Se demostró que los resultados de la estimación están en concordancia con las mediciones, es decir, incluso en el caso de utilizar clases de modelos simplificados se pueden lograr predicciones de respuesta precisa que pueden ser observadas en la estructura experimental después de realizar las pruebas. Los trabajos futuros deben centrarse en aumentar la precisión del sistema ya que como los autores lo indican, el método sólo arroja resultados reales cuando las vibraciones son fuertes y aparecen daños considerables.

8. Conclusiones

En este trabajo fue presentado el estado del arte en la detección de daño estructural en edificaciones empleando respuestas dinámicas. Existe una gran cantidad de técnicas y métodos en la literatura analizada en donde se habló de las que poseen un mayor impacto y las que podrían ofrecer nuevas rutas de investigación futura para profundizar en los estudios de detección de daño estructural. Asimismo, se tuvieron en cuenta factores de impacto como el índice H y el cuartil de las revistas en la que los artículos fueron publicados.

Los métodos fueron clasificados dependiendo de su etapa de maduración siguiendo lo propuesto por la NASA en los niveles de preparación tecnológica (TRL) para de este modo analizar la perspectiva de la evolución de proyectos en los que se espera que en un futuro próximo puedan ser llevados a cabo a la aplicación para la solución real de problemas.

Se identificaron y se mencionaron las variables empleadas en los métodos en donde se destacó que la más usada es la aceleración con una participación en el 74% de los artículos, seguida del amortiguamiento con el 61%, después el desplazamiento con el 57%, luego los modos de vibrar con el 39%, y finalmente la frecuencia natural con el 35%.

Se definió las herramientas computacionales o análisis numéricos empleados en cada método encontrando una gran gama de opciones que los autores han decidido llevar tomar para sus investigaciones. El top 3 que destaca son el Modelo de Análisis Bayesiano con un 13% de participación en las publicaciones, seguido del Algoritmo de Aprendizaje Profundo No Supervisado con 9% y luego el Índice de Participación Modal (IPM) con 9%.

Se expuso los equipos o instrumentos de medición empleados en el caso de los estudios que poseen una componente experimental de laboratorio o de campo en donde se puede analizar que la mayoría son instrumentos sencillos y fáciles de encontrar en el mercado como lo son los acelerómetros y las galgas extensiométricas. Esto indica que la instrumentación para ser aplicado en situaciones reales resulta ser en la mayoría de los casos sencilla.

Se diseñó una tabla de síntesis (Tabla 5) donde recopila información relevante sobre cada uno de los métodos propuestos por la literatura estudiada. En ella, se destacan las ventajas y desventajas con relación a la aplicabilidad de cada uno de los métodos. Asimismo, se incluyó la clasificación de cada revista para que el lector tenga a mano una referencia rápida, importante al

momento de consultar los trabajos de investigación sobre detección de daño abordados en este estudio.

En cuanto a trabajos futuros, se espera la realización de experimentos de campo en estructuras a escala real con modelos completamente funcionales, junto con el modelo de lógica Bayesiana, el cual demuestra ser la técnica más prometedora siendo probada en un modelo de edificio a escala real de 7 pisos arrojando resultados satisfactorios. Aunque los autores mencionaron que los trabajos futuros deben centrarse en aumentar la precisión del sistema, se espera que ésta sea la técnica que desarrolle un modelo completamente eficaz y funcional el cual pueda ser probado en edificios reales ocupados para cumplir con las especificaciones de categorización en TRL 9 propuesto por Manning.

Referencias bibliográficas

- Amezquita-Sanchez, J. P. (2020). Entropy algorithms for detecting incipient damage in high-rise buildings subjected to dynamic vibrations. *Journal Of Vibration And Control*, 27(3-4), 426-436. <https://doi.org/10.1177/1077546320929145>
- Anjneya, K., & Roy, K. (2021). Response surface-based structural damage identification using dynamic responses. *Structures*, 29, 1047-1058. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.033>
- Benavent-Climent, A., Escobedo, A., Donaire-Ávila, J., Oliver-Sáiz, E., & Ramírez Márquez, A. L. (2013). Assessment of expected damage on buildings subjected to Lorca earthquake through an energy-based seismic index method and nonlinear dynamic response analyses. *Bulletin Of Earthquake Engineering*, 12(5), 2049-2073. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9513-9>
- Bibliometrix - home. (s. f.). <https://www.bibliometrix.org/home/>
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). Time series analysis: Forecasting and control, Wiley, Hoboken, NJ.
- Chang, C., & Chou, J. (2018). Damage Detection of Seismically Excited Buildings Based on Prediction Errors. *Journal Of Aerospace Engineering*, 31(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000835](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000835)
- Chen, L., & Yu, L. (2013). Structural Nonlinear Damage Identification Algorithm Based on Time Series ARMA/GARCH Model. *Advances In Structural Engineering*, 16(9), 1597-1609. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.9.1597>
- Chen, S., Shi, J., & Wu, Y. (2019). Numerical damage localisation for building systems including dynamic soil-structure interaction. *Structure & Infrastructure Engineering/Structure And Infrastructure Engineering*, 15(3), 362-375. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1552711>
- Chopra, A. K. (2011). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (4th ed.). Pearson Education.

- Clough R.W. & Penzien J. (1995). Dynamics of structures, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, 1993. No. of pages: 738. ISBN 0-07-011394-7. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics (Print)*, 24(3), 457-462. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290240311>
- Das, A., & Debnath, N. (2021). Gibbs Sampling for Damage Detection Using Complex Modal Data from Multiple Setups. *ASCE-ASME Journal Of Risk And Uncertainty In Engineering Systems. Part A. Civil Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.1061/ajrua6.0001135>
- Doebling, S. W., Farrar, C., & Prime, M. B. (1998). A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods. *The Shock And Vibration Digest/The Shock And Vibration Digest*, 30(2), 91-105. <https://doi.org/10.1177/058310249803000201>
- Eafit, U. (s. f.). *Monitoreo de salud estructural de edificios - Innovación EAFIT / Transferencia de Tecnología y Conocimiento - Universidad EAFIT*. www.eafit.edu.co. <https://www.eafit.edu.co/innovacion/transferencia/Paginas/monitoreo-de-edificios.aspx>
- EFE Prima CE. *Sistemas de monitoreo estructural y medidores de tensión estructural | F' C*. (2022, 9 marzo). <https://www.efeprimace.co/proteccion-sismica/monitoreo-estructural/#catalogo>
- Egenhofer, M. J. & Mark, D. M. (2002). *Geographic Information Science*. https://books.google.com.co/books?id=kH8gcJvVWfIC&pg=PA110&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Erazo, K., & Hernández, E. (2016). Bayesian Model–Data Fusion for Mechanistic Postearthquake Damage Assessment of Building Structures. *Journal Of Engineering Mechanics*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943.7889.0001114](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943.7889.0001114)
- Erazo, K., Moaveni, B., & Nagarajaiah, S. (2019). Bayesian seismic strong-motion response and damage estimation with application to a full-scale seven story shear wall structure. *Engineering Structures/Engineering Structures (Online)*, 186, 146-160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.017>
- Finotti, R. P., Da Silva, C. F., Oliveira, P. H. E., Barbosa, F. P., Cury, A., & Silva, R. (2023). Novelty detection on a laboratory benchmark slender structure using an unsupervised deep learning algorithm. *Latin American Journal Of Solids And Structures*, 20(9). <https://doi.org/10.1590/1679-78257591>

- Gatti, F., Rosafalco, L., Colombera, G., Mariani, S., & Corigliano, A. (2023). Multi-storey shear type buildings under earthquake loading: Adversarial learning-based prediction of the transient dynamics and damage classification. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, *173*, 108141. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108141>
- Ingenieros Asesores. (2023, 2 octubre). *¿Qué es la monitorización de la salud estructural?* <https://ingenierosasesores.com/actualidad/monitorizacion-de-salud-estructural-en-edificios/>
- IPE Control. *Control de Estructuras | IPE CONTROL | Empresa acreditada*. (2019, 12 marzo). <https://ipecontrol.com/>
- Mageba-Group, *Mageba* (s. f.). <https://www.mageba-group.com/latam/es/>
- Manning, C. G. (2023, 27 septiembre). Technology readiness levels - NASA. NASA. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>
- Mondragon. (2017). *Indices de impacto de las publicaciones* Unibertsitatea. <https://www.mondragon.edu/es/web/biblioteka/indices-de-impacto-de-las-publicaciones#:~:text=SJR%20expresa%20el%20n%C3%BAmero%20de,que%20recibe%20la%20publicaci%C3%B3n%20citante>
- Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2022). Damage detection of high-rise buildings using an eigenvalue problem-based inverse solution. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, *152*, 107019. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107019>
- Nguyen, Q. T., & Livaoğlu, R. (2023). Structural damage identification of high-rise buildings: An artificial neural network based hybrid procedure. *Engineering Failure Analysis*, *150*, 107350. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107350>
- Oh, B. K., Jung, W. C., & Park, H. S. (2023). Artificial intelligence-based damage localization method for building structures using correlation of measured structural responses. *Engineering Applications Of Artificial Intelligence*, *121*, 106019. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106019>
- Pan, H., & Kusunoki, K. (2020). Aftershock damage prediction of reinforced-concrete buildings using capacity spectrum assessments. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, *129*, 105952. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105952>

- Park, H. S., Kim, J. H., & Oh, B. K. (2019). Model updating method for damage detection of building structures under ambient excitation using modal participation ratio. *Measurement*, 133, 251-261. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.023>
- Park, H. S., & Oh, B. K. (2018). Damage detection of building structures under ambient excitation through the analysis of the relationship between the modal participation ratio and story stiffness. *Journal Of Sound And Vibration*, 418, 122-143. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.12.036>
- Prakash, G., & Narasimhan, S. (2018). Bayesian Two-Phase Gamma Process Model for Damage Detection and Prognosis. *Journal Of Engineering Mechanics*, 144(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001386](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001386)
- Publindex. (s. f.). <https://scienti.minciencias.gov.co/publindex/#/noticias/lista>
- Randall, J. H. (2010). Conceptual Structure. En *Studies in natural language and linguistic theory (Print)* (pp. 11-34). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8308-2_2
- Scopus content / Elsevier. (s. f.). www.elsevier.com. <https://www.elsevier.com/products/scopus/content>
- Scimago Journal & Country Rank. (s. f.). <https://www.scimagojr.com/>
- SegCyc. (s. f.). <https://www.segcyc.com/>
- Singh, T., Sehgal, S., Prakash, C., & Dixit, S. (2022). Real-Time Structural Health Monitoring and Damage Identification Using Frequency Response Functions along with Finite Element Model Updating Technique. *Sensors (Basel)*, 22(12), 4546. <https://doi.org/10.3390/s22124546>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal Of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Valente, M., Milani, G., Grande, E., & Formisano, A. (2019). Historical masonry building aggregates: advanced numerical insight for an effective seismic assessment on two row housing compounds. *Engineering Structures*, 190, 360-379. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.025>
- VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. (s. f.). VOSviewer. <https://www.vosviewer.com/>

- Wang, D., Xiang, W., Zeng, P., & Zhu, H. (2015). Damage identification in shear-type structures using a proper orthogonal decomposition approach. *Journal Of Sound And Vibration*, 355, 135-149. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.06.043>
- Weingardt, R. G. (2011). Thomas Lincoln Casey and the Washington Monument. *Leadership And Management In Engineering*, 11(3), 271-280. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)lm.1943-5630.0000129](https://doi.org/10.1061/(asce)lm.1943-5630.0000129)
- Wen, W., Li, X., Ji, D., & Zhai, C. (2022). Seismic damage detection of an instrumented RC frame structure with deconvolution interferometry. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 155, 107170. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107170>
- Yamaguchi, M., Kurata, M., & Miyazawa, M. (2017). Building Damage Estimates Using Slowness Change in Propagating Waves. *Journal Of Structural Engineering*, 143(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001683](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001683)
- Yang, Y., Li, J., Zhou, C., Law, S., & Lv, L. (2019). Damage detection of structures with parametric uncertainties based on fusion of statistical moments. *Journal Of Sound And Vibration*, 442, 200-219. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.10.005>