

Revisión bibliográfica del monitoreo de comportamiento estructural a largo plazo de  
puentes viga cajón en concreto

Jose Luis Guerrero Castellanos

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

PhD en Ingeniería Estructural

Codirectora

Silvia Camila Vega Villamizar

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A Dios por brindarme fortaleza y sabiduría para afrontar cada uno de los retos en mi vida.

A mis padres, Clara Inés Castellanos Lizarazo y Basilio Guerrero Pinto, por ser mi guía, aliento, motor y apoyo incondicional. Este es el resultado del sacrificio y esfuerzo que han realizado por ver a sus hijos triunfar.

A mi hermano, Oscar Mauricio Guerrero Castellanos, por ser mi gran ejemplo a seguir y gran inspiración para batallar cada día por lo que tanto anhelamos.

A mi pareja, Angie Natalia Ojeda Niño, por brindarme todo su amor, apoyo y cariño incondicional, por creer en mí y acompañarme siempre a lo largo de este camino.

Este logro es por y para ustedes. Los amo con todo mi corazón.

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, donde tuve la gran oportunidad de aprender y crecer académicamente durante mi etapa de pregrado.

A mi director de proyecto, el docente Álvaro Viviescas Jaimes, por las oportunidades brindadas, el acompañamiento y orientación constante durante mi formación académica que fueron fundamentales para la culminación de esta.

A mi codirectora, la ingeniera Silvia Camila Vega Villamizar, por su paciencia, apoyo y dedicación a lo largo de este proyecto.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Metodología .....	16
2.1 Búsqueda de literatura.....	16
2.2 Análisis bibliométrico.....	17
2.2.1 Mapas de redes bibliométricas.....	18
2.2.2 Gráficos de análisis bibliométricos.....	19
2.3 Selección de documentos.....	25
3. Resultados .....	25
3.1 Línea base .....	25
3.1.1 Generalidades.....	26
3.1.2 Tipologías de puentes en Colombia.....	27
3.1.3 Efectos diferidos .....	28
3.1.4 Técnicas de detección de daño.....	32
3.1.4.1 Emisiones acústicas. ....	32
3.1.4.2 Ultrasonido.....	33
3.1.4.3 Ondas guiadas. ....	33
3.1.4.4 Termografía.....	34
3.1.4.5 Vibrómetros láser Doppler.....	35

3.1.4.6 Sistemas de posicionamiento global (GPS).....	36
3.1.4.7 Pruebas de vibración.....	36
3.1.4.7.1 Vibraciones por excitaciones ambientales (AVT).....	36
3.1.4.7.2 Vibración forzada (FVT).....	37
3.1.5 Características típicas de los tipos de instrumentación.....	38
3.1.5.1 Redes de sensores inalámbricos (WSN).....	39
3.1.5.2 Sensores de fibra óptica.....	41
3.1.5.3 Sensores de bajo costo.....	43
3.1.6 Óptima localización de la instrumentación.....	45
3.1.7 Toma de datos y resultados obtenidos de la instrumentación.....	47
3.1.7.1 Tiempo de registro y frecuencia de muestreo.....	47
3.1.7.2 Configuración de los datos.....	48
3.1.7.3 Metodología para la medición.....	48
3.1.7.4 Reporte de la medición.....	49
3.1.7.5 Recuperación de datos perdidos en sistemas de monitoreo.....	50
3.1.8 Métodos de tratamiento de señales.....	50
3.1.9 Monitoreo estructural de puentes: Contexto internacional, nacional y regional.....	51
3.1.9.1 Casos nacionales y regionales.....	52
3.1.9.2 Casos internacionales.....	57
4. Conclusiones.....	59
5. Recomendaciones.....	61
Referencias Bibliográficas.....	62

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Palabras clave y ecuaciones de búsqueda .....	16
Tabla 2. Puentes de grandes luces en Colombia .....	27
Tabla 3. Casos internacionales de deflexiones excesivas .....	30
Tabla 4. Geometría puentes casos nacionales y regionales .....	52
Tabla 5. Frecuencias naturales de puentes nacionales y regionales.....	57

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Cantidad de documentos encontrados en la búsqueda inicial .....	17
Figura 2. Visualización de superposición de la red de co-ocurrencia en base a las palabras clave .....	19
Figura 3. Información principal sobre la actividad científica en base a la combinación 1 .....	21
Figura 4. Producción científica por territorio .....	21
Figura 5. Gráfico de evolución temática.....	22
Figura 6. Mapa temático (Periodo de tiempo 1) .....	24
Figura 7. Mapa temático (Periodo de tiempo 2) .....	24
Figura 8. Mapa temático (Periodo de tiempo 3) .....	25
Figura 9. Puente Koror-Babeldaob .....	29
Figura 10. Comparación entre deflexiones medidas y esperadas en el Puente Děčín .....	30
Figura 11. Deflexiones esperadas en el tablero del puente luego de 30 años en servicio para varios valores de humedad relativa.....	31
Figura 12. Sensores piezoeléctricos de emisiones acústicas.....	33
Figura 13. Transductor ultrasónico de 120 kHz.....	34
Figura 14. Cámara termográfica .....	35
Figura 15. Equipos empleados en sistema de láser Doppler.....	36
Figura 16. Excitador de masa excéntrica rotacional .....	37
Figura 17. Componentes de sistemas de monitoreo estructural.....	38

Figura 18. Espectro de frecuencias para varios tipos de vibraciones y sensores para su medición .....	39
Figura 19. Sensor inalámbrico utilizado en el Puente Geumdang .....	40
Figura 20. Acelerómetro ADXL-345.....	41
Figura 21. Sensor basado en redes de Fibra de Bragg .....	43
Figura 22. Sistema CHEAP .....	44
Figura 23. Componentes de acelerómetro LARA.....	45
Figura 24. Sección longitudinal del Puente El Tablazo .....	53
Figura 25. Sección longitudinal del Puente El Ramo .....	54
Figura 26. Sección longitudinal del Puente Pujamanes .....	55
Figura 27. Sección longitudinal del Puente Gómez Ortiz.....	56
Figura 28. Puente Jinghang en China .....	57
Figura 29. Sección longitudinal del Puente sobre la Ruta Nacional de Japón.....	58

## Resumen

**Título:** Revisión bibliográfica del monitoreo de comportamiento estructural a largo plazo de puentes viga cajón en concreto \*

**Autor:** Jose Luis Guerrero Castellanos \*\*

**Palabras Clave:** Puentes viga cajón, monitoreo de salud estructural, instrumentación, sensores, efectos diferidos, detección de daños, localización óptima de sensores, tratamiento de señales.

**Descripción:** Debido a la complejidad topográfica del territorio colombiano y las diferentes patologías que suelen experimentar los puentes de grandes luces en concreto a lo largo de su vida útil, surge la necesidad de implementar sistemas de monitoreo estructural, para identificar cualquier problemática en tiempo real. En el presente documento se realiza una revisión bibliográfica y sistemática de literatura sobre el monitoreo del comportamiento y salud estructural a largo plazo de puentes viga cajón en concreto. La metodología implementada involucra la búsqueda de literatura en bases de datos científicas robustas y confiables, así como la aplicación de técnicas de análisis bibliométrico para evaluar la actividad científica, las tendencias y temas relevantes en esta área de investigación. Como resultado se presenta un estado del arte que aborda aspectos como el monitoreo de salud estructural, efectos diferidos y caracterización dinámica en puentes, junto con antecedentes y experiencias registradas, relevantes para monitoreos a largo plazo. Se observa un notable crecimiento en la investigación centrada en estos temas, con un enfoque en el desarrollo de nuevas técnicas de detección de daño, instrumentación y sensores.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. PhD en Ingeniería Estructural. Codirectora: Silvia Camila Vega Villamizar. Ingeniera Civil

### Abstract

**Title:** Literature review of the long-term structural behavior monitoring of concrete box girder bridges\*

**Author(s):** Jose Luis Guerrero Castellanos\*\*

**Key Words:** Box girder bridges, structural health monitoring, instrumentation, sensors, long-term effects, damage detection, optimum sensor location, signal treatment.

**Description:** Due to the topographic complexity of the Colombian territory and the different pathologies that long-span concrete bridges usually experience during their useful life, the need arises to implement structural monitoring systems to identify any problems in real time. In this paper, a systematic literature review on the monitoring of the long-term behavior and structural health of concrete box girder bridges is carried out. The methodology implemented involves a literature search in robust and reliable scientific databases, as well as the application of bibliometric analysis techniques to evaluate the scientific activity, trends and relevant topics in this area of research. As a result, a state of the art is presented about aspects such as structural health monitoring, delayed effects and dynamic characterization in bridges, together with background and recorded experiences, relevant for long-term monitoring. A remarkable growth in research focused on these topics is observed, with a focus on the development of new damage detection techniques, instrumentation and sensors.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. PhD in Structural Engineering. Co-director: Silvia Camila Vega Villamizar. Civil Engineering

## Introducción

En los últimos años se ha evidenciado una notable y creciente tendencia en la construcción de puentes en el territorio colombiano, producto de inversiones realizadas por parte del Gobierno Nacional en materia de infraestructura vial, a través de programas de vías de cuarta y quinta generación. Dada la complejidad geológica y topográfica presentes en el país, sumado al incremento de las velocidades de diseño, se requiere que los puentes adopten una mayor longitud, lo que ha llevado a un aumento en la construcción de puentes de sección viga cajón en concreto empleando la técnica de voladizos sucesivos, permitiendo abarcar luces entre 80 y 250 m de longitud (L. F. Rincón et al., 2019).

La literatura científica ha reportado que la tipología de puentes en cuestión es susceptible a presentar considerables deflexiones en el centro de luz durante etapa de servicio y a lo largo de su vida útil, generando problemas de funcionamiento si no se toman medidas correctivas adecuadas (N. Rincón et al., 2014). Estas deflexiones generalmente son provocadas por cargas de servicio que actúan sobre la estructura y pérdidas diferidas asociadas a fenómenos que aparecen con el paso del tiempo, tales como la fluencia lenta del concreto (Creep), la retracción del concreto (Shrinkage) y la relajación del acero de presfuerzo. Una investigación realizada por (Purba et al., 2023) estudió el problema de las deflexiones, incluso después de 30 y 100 años, en un puente construido por voladizos sucesivos en Indonesia, empleando el modelo B3 planteado por (Bažant & Baweja, 2000), donde la influencia de los efectos asociados a fenómenos dependientes del tiempo sobre el aumento de las deflexiones a largo plazo oscila entre el 81% y el 89%. Estos fenómenos han ocasionado, en algunos casos, el colapso de la estructura, como ocurrió en el puente

Koror-Babeldaob en Palau, que contaba con una luz de 241 m y alcanzó una deflexión de 1.61 m luego de varios años de haberse construido (Bažant et al., 2012).

Debido a los problemas expuestos, internacionalmente se han desarrollado sistemas de monitoreo de salud estructural en puentes, donde (Bayraktar et al., 2009) caracterizó dinámicamente el puente Kömürhan ubicado en Turquía, construido por voladizos sucesivos con una sección viga cajón, y luz central de 135 m, utilizando mediciones experimentales obtenidas de pruebas de vibración ambiental con acelerómetros, donde se identificaron 14 frecuencias naturales entre 0 y 14 Hz, además de 14 formas modales clasificadas en modos verticales, transversales y longitudinales. Los resultados de este estudio se compararon con los obtenidos a partir de un modelo numérico, observándose cierta diferencia a causa de incertidumbres aceptadas en la fase de diseño que no se tuvieron en cuenta en el modelo realizado, por lo cual se recomendó la calibración de este para reducir las diferencias presentadas y validar de manera más precisa información sobre el comportamiento estructural.

En Colombia, se ha observado un aporte científico significativamente menor en contraste con otros países; la caracterización dinámica llevada a cabo por (Muñoz et al., 2010) en el Viaducto César Gaviria Trujillo de tipología atirantada, construido por voladizos sucesivos y con una luz central de 211 m, permitió identificar elementos con una capacidad estructural adecuada en términos de ductilidad, resistencia y rigidez acorde con las solicitaciones sísmicas de la zona, a partir de pruebas de vibración ambiental con la instalación de alrededor de 300 sensores. Así mismo, se halló que el 40% de los tirantes del puente no cumplían con los estados de resistencia y fatiga mínimos. Por otra parte, (A. Viviescas Jaimes et al., 2018) realizó la caracterización de la línea base para el monitoreo de salud estructural mediante pruebas de vibración ambiental al puente Gómez Ortiz ubicado sobre la vía que conecta los municipios de Girón y Zapatoca en el

departamento de Santander, este puente tiene sección en viga cajón con dos luces centrales de 170 m y vanos de compensación de 85 m. El estudio empleó tres sensores triaxiales compuestos por acelerómetros sísmicos para la comparación de cuatro técnicas de identificación modal: El Método de Selección de Picos (Peak Picking, PP) (Naderpour & Fakharian, 2016), el Método de Descomposición del Dominio de la Frecuencia (Frequency Domain Decomposition, FDD) (Brincker et al., 2000) (Le & Argoul, 2016), el Método de Descomposición del Dominio de la Frecuencia Mejorado (Enhanced FDD, EFDD) (Jacobsen et al., 2006) y el Método de Identificación del Subespacio Estocástico (Stochastic Subspace Identification, SSI) (Brincker & Andersen, 2006). Las pruebas experimentales se realizaron con el fin de obtener las propiedades dinámicas de la estructura y realizar validaciones a partir de un modelo numérico, cuyos resultados muestran similitudes con diferencias menores al 1% en los valores de frecuencia identificados mediante las cuatro técnicas, mientras que se evidencian altas incertidumbres con diferencias mayores al 50% en las fracciones de amortiguamiento modal.

Adicionalmente, en el país se cuenta con carencias en criterios normativos y procedimientos enfocados en la detección de daños, como se evidencia en la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP14) (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2014), la cual plantea la posibilidad de instrumentar puentes, pero no brinda los procedimientos ni las guías necesarias para realizar los respectivos ensayos. Así mismo, el Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL) (Resolución 1518, 2017), implementado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) desde el año 1996, se enfoca únicamente en inspecciones visuales y subjetivas, limitando la detección de problemas internos en elementos estructurales y, por ende, la valoración real de los daños.

Considerando las limitaciones para la evaluación de la condición estructural de puentes viga cajón segmentales, tipología predominante en Colombia, así como la alta amenaza sísmica en varias regiones del país, surge la necesidad de llevar a cabo investigaciones orientadas al desarrollo de un sistema piloto para el monitoreo continuo y a largo plazo de la salud estructural de estos.

El presente documento se divide en 5 secciones. En la sección 1, se presentan los objetivos del trabajo. En la sección 2, se presenta la metodología implementada para el proceso de búsqueda de información relacionada con el tema planteado en bases de datos científicas, así como el análisis bibliométrico respectivo, que permite evaluar de manera cuantitativa la producción, tendencias y actividad científica. La sección 3 corresponde a los resultados de la revisión bibliográfica y sistemática de literatura; allí se abordan aspectos relacionados con el monitoreo de puentes viga cajón en concreto enfocado principalmente al monitoreo de salud estructural, modelamiento numérico, caracterización dinámica, instrumentación y procesamiento de información. Finalmente, se presentan las conclusiones en la sección 4, seguidas de recomendaciones para futuras investigaciones experimentales o numéricas en la sección 5.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Elaborar un análisis bibliométrico a partir de la revisión sistemática de literatura sobre el monitoreo del comportamiento estructural a largo plazo de puentes viga cajón en concreto construidos mediante voladizos sucesivos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Aplicar métodos de análisis bibliométrico y revisión bibliográfica para la sistematización, análisis y clasificación de la literatura científica relacionada con el tema de estudio.

Analizar los métodos, tecnologías e instrumentación empleados en el monitoreo estructural de puentes viga cajón, incluyendo sus ventajas y limitaciones.

Examinar los antecedentes experimentales y numéricos en la identificación de propiedades dinámicas y evaluación de la respuesta estructural a largo plazo de puentes viga cajón segmentales.

## 2. Metodología

Para la elaboración de este documento se realizó una revisión bibliográfica y sistemática de literatura. Para ello, se contempló el uso de bases de datos científicas robustas, con el fin de encontrar información suficiente y confiable. Además, se emplearon técnicas y herramientas de análisis bibliométrico para evaluar de manera cuantitativa la actividad científica en torno al tema de interés.

### 2.1 Búsqueda de literatura

La búsqueda de documentos se realizó principalmente en las bases de datos científicas Scopus®, Web of Science® y Science Direct®, las cuales se encuentran disponibles en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.

Para dar inicio con el proceso de búsqueda de literatura, se planteó inicialmente el tema a investigar, el cual se centra en el monitoreo del comportamiento y salud estructural a largo plazo de puentes en concreto de sección viga cajón construidos mediante voladizos sucesivos. Posterior a ello, se definieron las palabras clave con relación al tema planteado, junto con términos o sinónimos asociados a cada una de estas, los cuales se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Palabras clave y ecuaciones de búsqueda*

Combinaciones	Palabras clave	Ecuación de búsqueda
Combinación 1	Box girder bridges, segmental bridges, cantilever bridges, structural monitoring, structural health monitoring, SHM, instrumentation y sensors.	("box girder bridges" OR "segmental bridges" OR "cantilever bridges") AND ("structural monitoring" OR "structural health monitoring" OR "SHM") AND ("instrumentation" OR "sensors")
Combinación 2	Box girder bridges, concrete bridges, instrumentation, sensors, signal treatment y signal processing.	("box girder bridges" OR "concrete bridges") AND ("instrumentation" OR "sensors") AND ("signal treatment" OR "signal processing")
Combinación 3	Box girder bridges, concrete bridges, delayed effects y long term effects.	("box girder bridges" OR "concrete bridges") AND ("delayed effects" OR "long term effects")

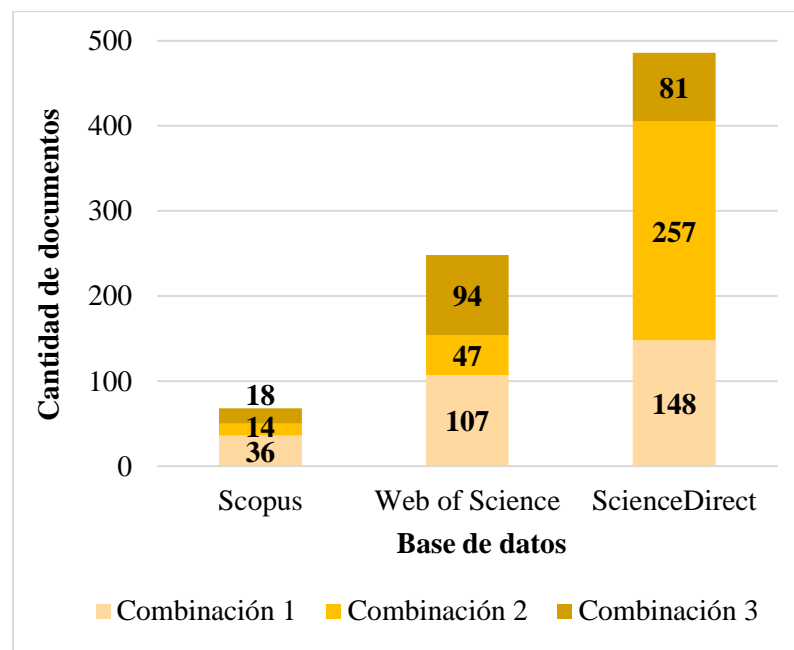
En base a las palabras clave propuestas, se establecieron tres combinaciones para las ecuaciones de búsqueda a utilizar en cada una de las bases de datos mencionadas. En cada ecuación, se utilizaron operadores lógicos booleanos para relacionar las palabras clave que la conforman. En la Tabla 1 se presenta la información a detalle sobre estas combinaciones.

De igual manera, como criterios de inclusión y exclusión se determinó que los tipos de documentos seleccionados corresponden a artículos científicos (Articles) y artículos de revisión (Review articles) que hayan sido publicados en los últimos 20 años en idiomas inglés y español.

La Figura 1 muestra el número de documentos encontrados en cada base de datos según las combinaciones iniciales planteadas.

**Figura 1**

*Cantidad de documentos encontrados en la búsqueda inicial*



## 2.2 Análisis bibliométrico

Una vez realizado el proceso de búsqueda, se generaron y descargaron los metadatos asociados a cada conjunto de artículos encontrado. Con esta información, se realizó un análisis

bibliométrico empleando las herramientas VOSviewer® y Biblioshiny®. De esta manera, se pudo examinar mediante mapas de redes las relaciones entre los términos presentes en cada publicación. De igual forma, se logró realizar un análisis cuantitativo completo y detallado sobre la información asociada a cada documento.

A continuación, se presenta el análisis de la información obtenida en la base de datos Web of Science®, la cual arrojó resultados de búsqueda suficientes para ello.

### **2.2.1 Mapas de redes bibliométricas**

Para la generación y visualización de mapas de redes bibliométricas, se empleó la herramienta VOSviewer®. Para ello, se realizó inicialmente una revisión y ajuste de términos repetidos en las palabras clave (Keywords) de cada documento a través del uso de tesauros, lo cual permitió mejorar de manera significativa la precisión en la generación de los mapas. Posteriormente, se realizó un análisis de co-ocurrencia basado en los términos o palabras clave, obteniéndose un mapa que representa las relaciones entre estas, junto con sus tendencias temporales.

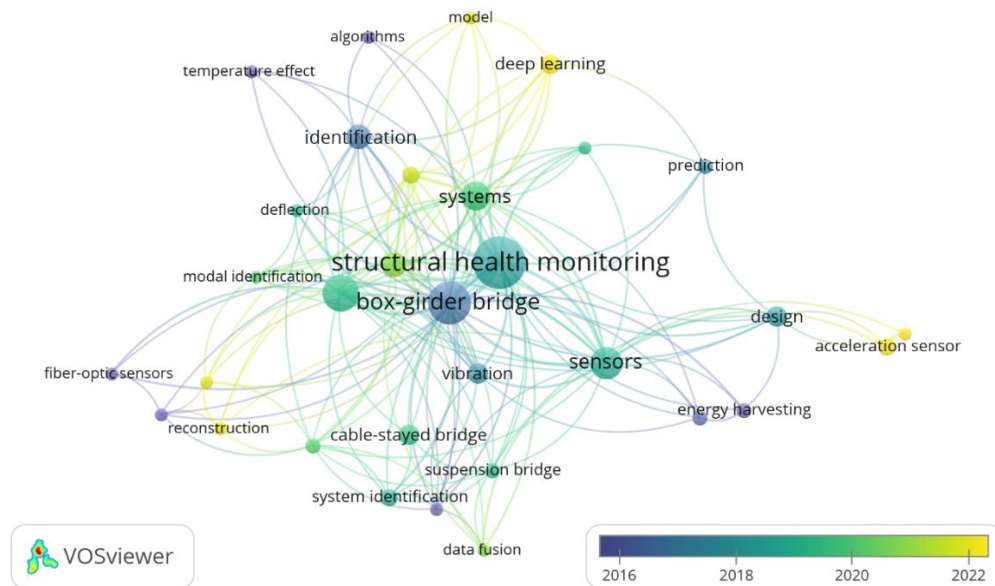
La Figura 2 presenta el mapa de relaciones de palabras clave que están más vinculadas con el tema de investigación propuesto. En este mapa se evidencia la evolución temporal en el uso de los términos empleados en los documentos científicos, donde los términos *box-girder bridge*, *structural health monitoring*, *vibration*, *fiber-optic sensors* y *energy harvesting* se emplearon principalmente entre los años 2016 y 2018; mientras que los términos *displacement measurement*, *sensors*, *acceleration sensor*, *modal identification*, *damage detection*, *optimization* y *deep learning* resaltan entre los años 2018 y 2023.

Según el mapa obtenido, se observa un elevado interés en la investigación centrada en sistemas de monitoreo de salud estructural en puentes viga cajón durante los años más recientes.

A su vez, se resalta el avance en estudios relacionados con el uso de métodos no destructivos y la implementación de nuevas tecnologías para el monitoreo de esta tipología de puentes.

## Figura 2

*Visualización de superposición de la red de co-ocurrencia en base a las palabras clave*



*Nota.* Adaptado de la herramienta VOSviewer®.

### 2.2.2 Gráficos de análisis bibliométricos

Mediante la herramienta Biblioshiny® se obtuvieron gráficos de análisis bibliométricos relacionados con los metadatos extraídos de las bases de datos. Entre estos, se encuentra el presentado en la Figura 3, el cual brinda la información principal sobre la producción científica asociada a los resultados de búsqueda. La información contenida en este gráfico se categoriza mediante 12 indicadores: Espacio de tiempo (Timespan), según el cual se analizan los documentos publicados en los últimos 17 años, mientras que en Fuentes (Sources) la información analizada proviene de 56 fuentes o Journals científicos. Por otra parte, el ítem de Documentos (Documents), analiza un total de 106 documentos, asociados a una Tasa de crecimiento anual (Anual Growth

Rate), la cual experimenta un aumento considerable del 9.93% anual en relación con la cantidad de documentos publicados, lo cual evidencia el interés hacia una mayor producción de artículos asociados al tema de consulta en los años más recientes. Adicional se cuenta con información de 360 Autores (Authors), que participaron en la elaboración del conjunto de documentos evaluado; por otro lado, se discrimina entre Autores de documentos de un solo autor (Authors of single-authored docs), con un total de 5 documentos escritos por un único autor; y Coautoría internacional (International Co-Autorship), observándose un porcentaje considerablemente alto (25.47%) de documentos elaborados entre autores de diferentes países o nacionalidades, lo cual indica un crecimiento en el desarrollo de investigaciones y colaboración entre autores a nivel global en torno al tema de análisis. Así mismo, se cuenta con Coautores por documento (Co-Authors per Doc), con un promedio de 3.75 coautores que contribuyeron en la realización de los documentos, denotando la tendencia de colaboración entre autores.

En torno al contexto de la producción científica se contó con el análisis de Palabras clave de autor (Author's Keywords), con un total de 395 palabras clave asignadas por los autores en sus artículos para resaltar los temas principales tratados en estos, adicional se contó con Referencias (References), evidenciándose un total de 3088 documentos citados en el conjunto de artículos sometidos al análisis bibliométrico. Finalmente, el análisis arrojó la Edad promedio de los documentos (Document Average Age), observándose que gran parte de los documentos fueron publicados hace poco más de 5 años. Los documentos analizados con la ecuación de búsqueda asociada a la combinación 1 presentó un Promedio de citas por documento (Average citations per doc), donde los artículos seleccionados para el análisis poseen un promedio de 18 citas respecto al total del conjunto de datos al que pertenece.

**Figura 3**

*Información principal sobre la actividad científica en base a la combinación 1*

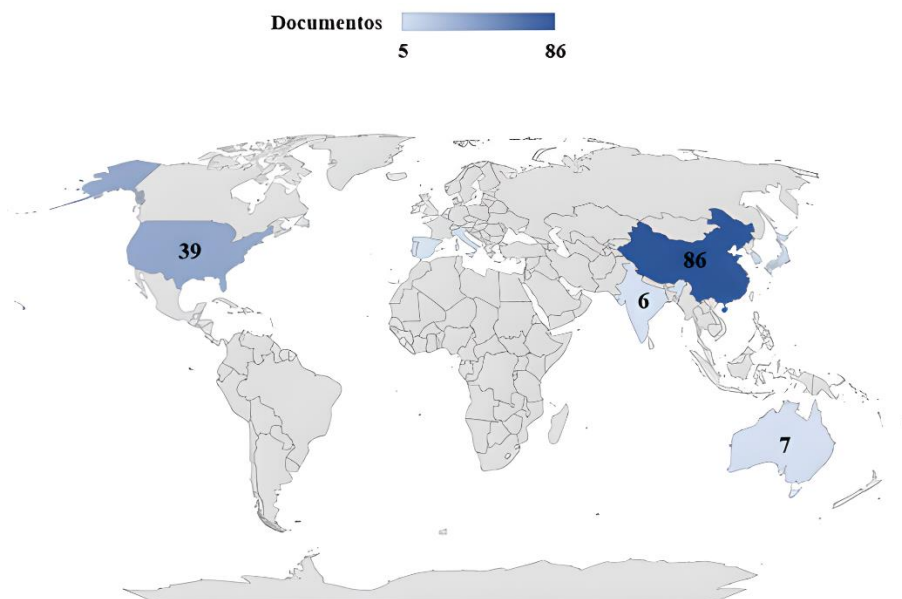


*Nota.* Adaptado de la herramienta Biblioshiny®.

Por otro lado, la Figura 4 representa la concentración de documentos por territorio, donde se destacan países como China con 86 documentos, Estados Unidos, con 39, Japón y Corea del Sur, ambos con 12, e Italia con 8. Estos países resaltan y son clave por su relevante contribución en la producción de publicaciones sobre el tema de investigación.

**Figura 4**

*Producción científica por territorio*

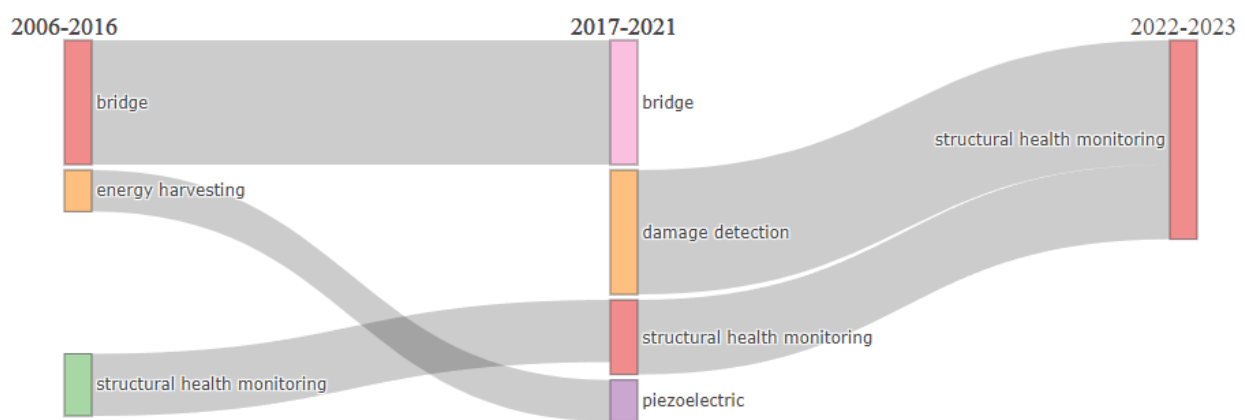


En la Figura 5, se presenta el gráfico de evolución temática en base a las palabras clave del conjunto de datos analizados. Allí se observan las tendencias o cambios que han experimentado los clústeres temáticos a lo largo de dos o más periodos de tiempo. Para el contexto de esta revisión se asignaron tres periodos, el primero comprendido entre los años 2006 y 2016, el segundo entre 2017 y 2021, y el tercero entre 2022 y 2023. De esta manera se pudo obtener un análisis más detallado.

Se logra apreciar que los términos *bridge* y *structural health monitoring* no varían entre los periodos asignados, mientras que los términos *energy harvesting* y *damage detection* han tendido a remplazarse en años más recientes por *piezoelectric* y *structural health monitoring*, respectivamente. Este hallazgo es de gran importancia debido a que contribuye al uso adecuado de las palabras clave según las tendencias de los últimos años.

### Figura 5

Gráfico de evolución temática



Nota. Adaptado de la herramienta Biblioshiny®.

Como complemento a la información anterior, se presentan la Figura 6, Figura 7 y Figura 8, en las cuales se resumen los temas o palabras clave más relevantes en cada periodo de tiempo

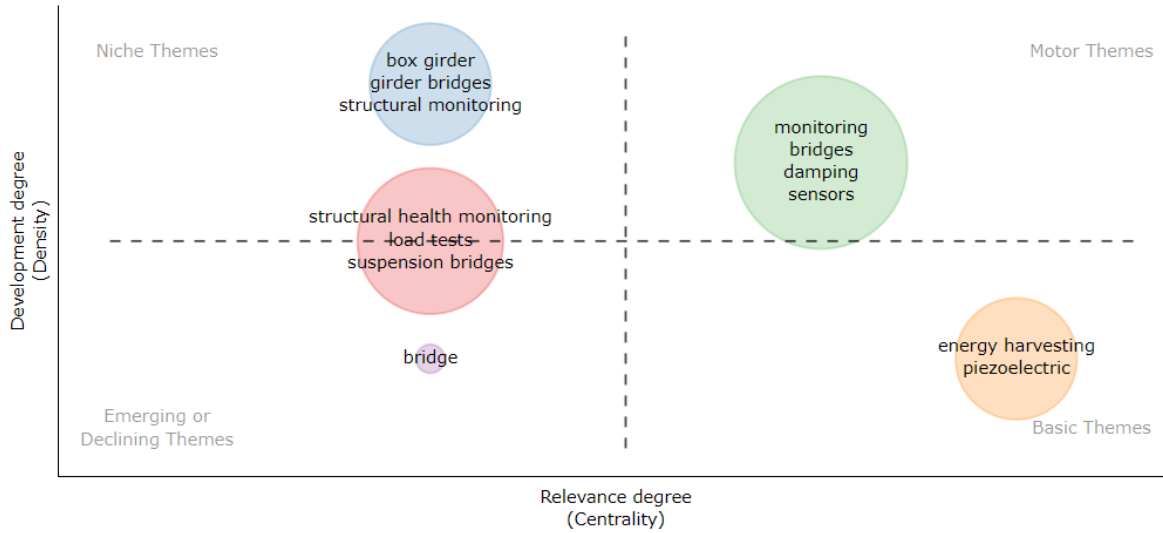
considerado. Estas se clasifican en cuadrantes categorizados como: Temas de Nicho (Niche Themes), que hacen referencia a temas de investigación específicos que captan la atención de un número reducido de investigadores; Temas Motores (Motor Themes), los cuales son temas de investigación ampliamente abordados; Temas Emergentes o en Declive (Emerging or Declining Themes), que se relacionan con temas que están ganando o perdiendo relevancia e interés; y Temas Básicos (Basic Themes), que se refieren a aquellos que fundamentan la base de cierta área de investigación.

En estos gráficos, se puede evidenciar la evolución que han tenido los ejes temáticos *structural health monitoring*, que pasó de ser un tema emergente en el periodo 1 a un tema básico en los periodos 2 y 3; *damage detection*, que inició como un tema emergente en el periodo 2 y pasó luego a ser un tema básico en el periodo 3; *fiber bragg grating*, el cual se clasificó como un tema básico en el periodo 2 y después como un tema de nicho en el periodo 3; y *sensors*, que pasó de ser un tema motor en el periodo 1 a un tema de nicho en el periodo 3. Además, se resaltan los temas *deep learning* y *data reconstruction* como temas emergentes en el periodo más reciente.

La importancia de estos gráficos radica en que muestran la dinámica de los ejes temáticos presentados en base a las palabras clave principales del conjunto de documentos bajo análisis, permitiendo tener un panorama más claro y amplio sobre las tendencias de investigación actuales.

**Figura 6**

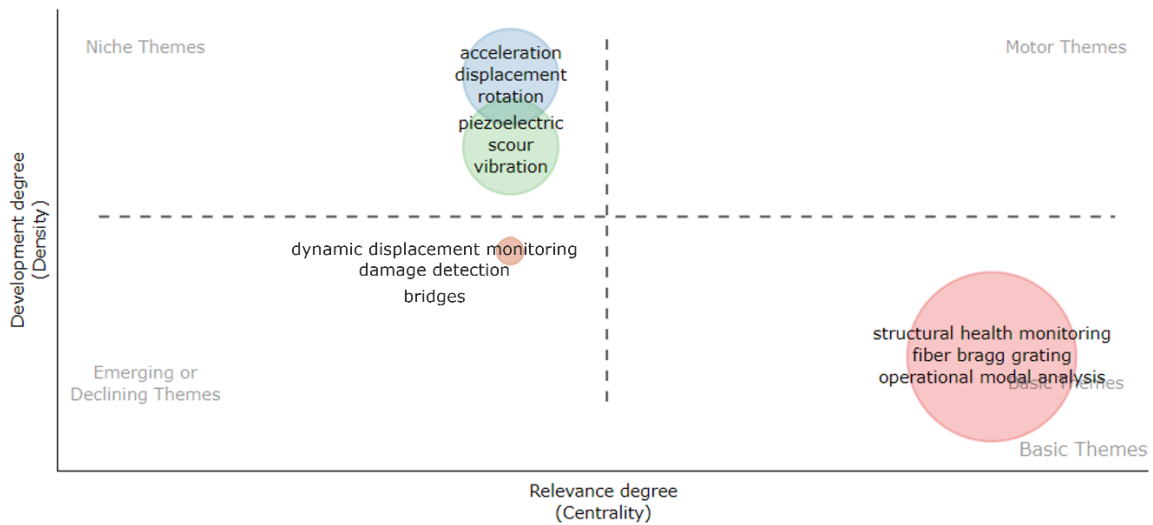
*Mapa temático (Periodo de tiempo 1)*



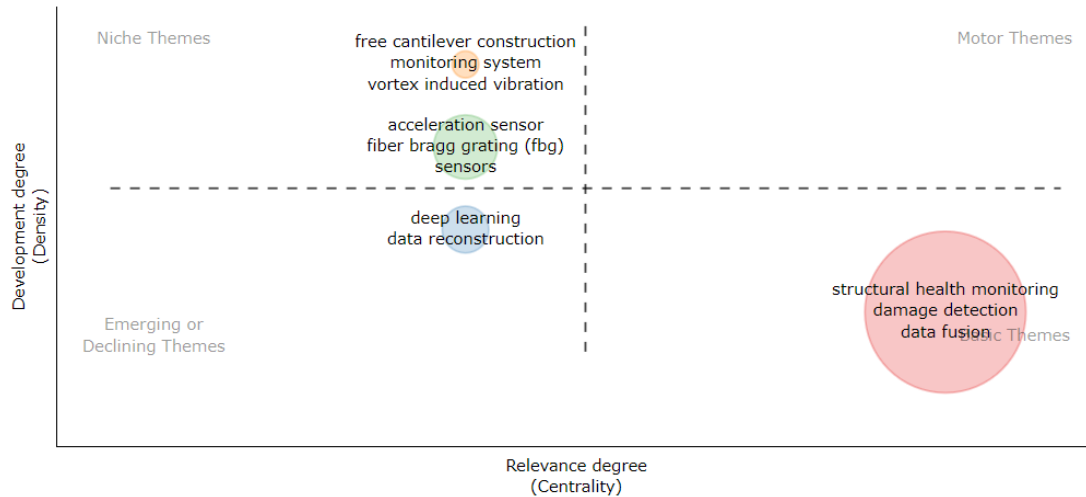
*Nota.* Adaptado de la herramienta Biblioshiny®.

**Figura 7**

*Mapa temático (Periodo de tiempo 2)*



*Nota.* Adaptado de la herramienta Biblioshiny®.

**Figura 8***Mapa temático (Periodo de tiempo 3)*

*Nota.* Adaptado de la herramienta Biblioshiny®.

### 2.3 Selección de documentos

A partir de la información obtenida de las bases de datos, se llevó a cabo un proceso de filtrado iniciando con la lectura de los títulos y abstracts de cada documento, con el fin de descartar aquellos que no aportaban o no estaban relacionados con el tema planteado. Posteriormente, se procedió a realizar una revisión y lectura más detallada de los documentos preseleccionados, donde finalmente se escogieron los documentos definitivos que se emplearon en la elaboración del estado del arte.

## 3. Resultados

### 3.1 Línea base

La definición de una línea base es de suma relevancia para los monitoreos de salud estructural a largo plazo, debido a que indica un estado inicial del puente a partir del cual se puede

analizar la variación de las propiedades dinámicas a lo largo del tiempo. Así mismo, permite evaluar cambios en la estructura, detectar daños en etapas tempranas y evaluar la integridad estructural. Generalmente, la línea base se obtiene mediante la recolección de un conjunto de datos en pruebas de campo y el desarrollo de un modelo de elementos finitos calibrado (Liu et al., 2009).

El estudio realizado por (A. Viviescas Jaimes et al., 2018) es un ejemplo claro de la generación de una línea base para evaluar la salud estructural en un puente viga cajón en concreto a escala real, donde a partir de un modelo de elementos finitos calibrado en función de las propiedades dinámicas experimentales obtenidas de pruebas de vibración ambiental realizadas sobre el Puente Gómez Ortiz, es posible comparar el comportamiento inicial de la estructura con el esperado a lo largo de su vida útil. De esta manera, se pueden detectar a tiempo posibles daños en el puente posterior a la ocurrencia de eventos de gran magnitud, como sismos o crecidas del río.

### ***3.1.1 Generalidades***

Dada la importancia de este tipo de estructuras para la comunicación y conectividad entre puntos geográficos distantes ha surgido en los últimos años una creciente necesidad e interés de conocer a detalle su comportamiento ante cargas de servicio. Esto con el fin de identificar posibles daños y tomar acciones preventivas aprovechando el desarrollo de nuevas tecnologías. El incremento de velocidades de diseño sugiere abordar puentes de grandes luces con sección viga cajón en concreto, empleándose la técnica de construcción por voladizos sucesivos como respuesta ante dicha necesidad. Esta técnica se caracteriza por la construcción del tablero del puente mediante tramos sucesivos o dovelas que se apoyan del tramo anterior. El proceso se puede realizar in situ o a través de dovelas prefabricadas, iniciando desde las pilas y finalizando en los centros de luz, donde se unen las dovelas de ambos extremos (Valle et al., 2017).

A nivel internacional, el desarrollo de sistemas de monitoreo continuo de salud estructural aplicados a la tipología mencionada ha logrado identificar en tiempo real problemas asociados a diferentes patologías (deflexiones excesivas, fisuras, socavación, etc.). Sin embargo, en Colombia se ha observado un aporte científico significativamente menor (A. Viviescas Jaimes et al., 2018). Por ende, es relevante para la academia dedicar esfuerzos al estudio del comportamiento estructural de puentes por voladizos sucesivos a lo largo de su vida útil, a partir de la variación de su respuesta dinámica, parámetro de especial relevancia en el país por la alta amenaza sísmica que se presenta en algunas zonas.

### 3.1.2 Tipologías de puentes en Colombia

La Tabla 2 presenta un resumen de algunos de los puentes de grandes luces construidos en Colombia en los últimos 40 años, donde se observa el dominio de puentes construidos por voladizos sucesivos en contraste con otras tipologías, especialmente en años recientes. Esto se debe principalmente a la solución de grandes luces que otorga la construcción de voladizos sucesivos, además de una amplia experiencia adquirida en el país para su construcción (Santos Durán et al., 2021), lo cual justifica la importancia de desarrollar sistemas de monitoreo estructural centrados en esta tipología dominante.

**Tabla 2**

#### *Puentes de grandes luces en Colombia*

Nombre puente	Tipología	Departamento	Luz central (m)	Año
Puente Laureano Gómez	Atirantado	Atlántico	140	1974
Puente Juanambú	Voladizos sucesivos	Nariño	90	1976
Puente Farallones	Voladizos sucesivos	Cundinamarca	142	1991
Viaducto César Gaviria Trujillo	Atirantado	Risaralda	211	1997
Puente Plato	Voladizos sucesivos	Magdalena - Bolívar	130	1997
Puente Pipiral	Voladizos sucesivos	Meta	125	2002
Puente Guillermo Gaviria Correa	Voladizos sucesivos	Santander - Antioquia	200	2006
Puente Humea	Voladizos sucesivos	Meta	120	2009

Nombre puente	Tipología	Departamento	Luz central (m)	Año
Viaducto Helicoidal	Voladizos sucesivos	Risaralda - Caldas	50	2010
Puente Gilberto Echeverri Mejía	Atirantado	Antioquia	108	2012
Puente Cajamarca	Voladizos sucesivos	Tolima	137	2012
Puente El Ramo	Voladizos sucesivos	Santander	90	2013
Viaducto Gualanday	Voladizos sucesivos	Tolima	128	2014
Puente Geo Von Lengerke	Voladizos sucesivos	Santander	155	2014
Viaducto Provincial	Atirantado	Santander	292	2015
Puente Pujamanes	Voladizos sucesivos	Santander	122	2015
Puente Mata de Cacao	Voladizos sucesivos	Santander	180	2015
Puente El Tablazo	Voladizos sucesivos	Santander	186	2015
Viaducto La Unión	Voladizos sucesivos	Santander	111	2016
Puente Moravia	Voladizos sucesivos	Antioquia	185	2016
Puente Madre Laura	Voladizos sucesivos	Antioquia	84	2016
Puente Guillermo Gómez Ortiz	Voladizos sucesivos	Santander	170	2013
Puente Roncador	Voladizos sucesivos	Bolívar	160	2017
Puente de San Miguel	Voladizos sucesivos	Meta	62	2017
Puente Perdices 1	Voladizos sucesivos	Meta	80	2017
Puente 3 Río Sáname	Voladizos sucesivos	Meta	50	2017
Puente Puerto Salgar	Voladizos sucesivos	Caldas	180	2018
Viaducto Gualanday II	Voladizos sucesivos	Tolima	128	2018
Puente Alberto Pumarejo	Atirantado	Atlántico	380	2019
Puente Hisgaura	Atirantado	Santander	330	2019
Puente Honda	Atirantado	Tolima	248	2020
Puente Catalino Parra	Voladizos sucesivos	Bolívar	150	2021
Viaducto Río Sucio	Voladizos sucesivos	Santander	120	2022
Viaducto Álvaro Mutis Jaramillo	Voladizos sucesivos	Tolima	170	2022

*Nota.* Adaptado de (Hernandez-Sierra et al., 2021).

### 3.1.3 Efectos diferidos

Los puentes en concreto construidos por voladizos sucesivos suelen presentar efectos diferidos que se derivan en la pérdida inmediata o a largo plazo de la integridad estructural, así como deflexiones excesivas, principalmente en los centros de luz. Estos problemas son ocasionados usualmente por fenómenos que afectan el comportamiento de los materiales como el concreto y el acero de presfuerzo (Parra & Zea, 2016).

Dentro de los fenómenos que generan pérdidas inmediatas se encuentra el acunamiento, el cual se experimenta en los tendones de acero tensado cuando uno de estos se libera del gato hidráulico, produciéndose una fricción inversa que asienta la cuña una distancia aproximada de 7

mm dentro del sistema de anclaje (Hewson, 2012). Por otro lado, están los fenómenos que producen pérdidas a largo plazo como el Creep (Fluencia lenta del concreto) que corresponde a la deformación gradual y retardada del concreto como respuesta a cargas sostenidas en el tiempo, y el Shrinkage (Retracción del concreto), que consiste en la deformación progresiva debido a procesos químicos y térmicos (Barthélémy et al., 2015). A estos se le puede sumar también la relajación del acero de presfuerzo, el cual se define como la pérdida de tensión del acero sometido a esfuerzos durante largos periodos de tiempo (Magura et al., 1964).

En un contexto internacional, el caso más común de efectos diferidos en términos de deflexiones excesivas es el del Puente Koror-Babeldaob estudiado por (Bažant et al., 2012). Este puente de concreto pretensado en sección viga cajón segmental, con una luz principal de 241 m y que se encontraba ubicado en Palau, colapsó en el año 1996, meses después de presentar una deflexión máxima en el centro de luz de 1.61 m, incumpliendo claramente con la deflexión final esperada según el diseño de 0.3 m. En la Figura 9, se muestra la evidencia fotográfica del puente antes y después de colapsar. Así mismo, en (Bažant et al., 2012) se menciona el caso del Puente Děčín ubicado en República Checa, el cual alcanzó a experimentar deflexiones cercanas a los 30 cm, superando las deflexiones máximas previstas, tal como se observa en la Figura 10.

### Figura 9

#### *Puente Koror-Babeldaob*



(a)

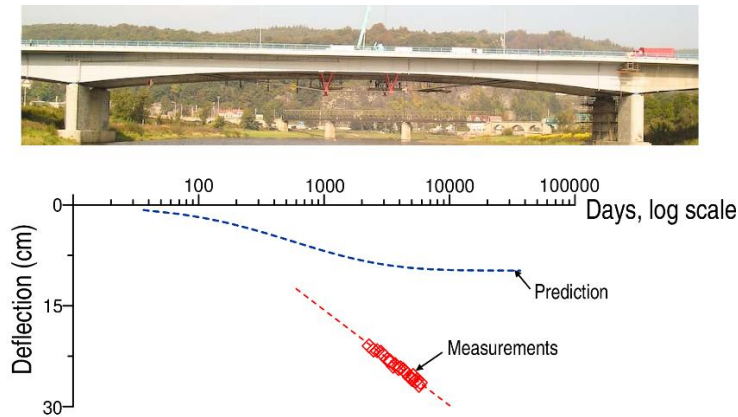


(b)

*Nota.* (a) Posterior a su construcción. (b) Luego de colapsar. Adaptado de (Bažant et al., 2012).

**Figura 10**

*Comparación entre deflexiones medidas y esperadas en el Puente Děčín*



*Nota.* Adaptado de (Bažant et al., 2012).

Otros casos de puentes en concreto de grandes luces con la tipología analizada en donde se observaron deflexiones excesivas en los centros de luz producto de pérdidas inmediatas o a largo plazo son mencionados por (Han et al., 2023) y se resumen en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Casos internacionales de deflexiones excesivas*

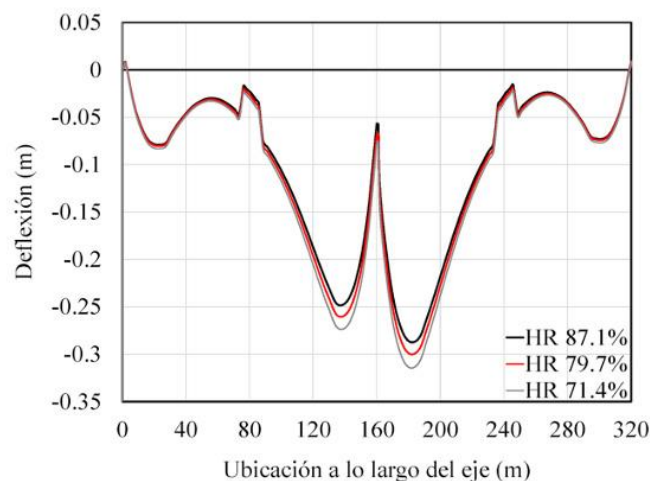
Nombre puente	Luz mayor (m)	Año	País	Deflexión (cm)
Puente de Kingston	143.3	1970	Reino Unido	>30
Puente Koror-Babeldaob	241	1978	Palau	161
Puente Parrots	195	1979	Estados Unidos	63.5
Puente Stovset	220	1993	Noruega	20
Puente Jinsha	120	1994	China	22
Puente Río Huangshi Yangtze	245	1995	China	30.5
Puente Río Jiangjin Yangtze	240	1997	China	31.7
Puente Stolma	301	1998	Noruega	9.2

*Nota.* Adaptado de (Han et al., 2023).

En Colombia, son pocos los casos documentados al respecto, no obstante, en el estudio desarrollado por (Santos Durán et al., 2021), se analizó un puente de 320 m de luz total, de tipología viga cajón de voladizos sucesivos representativo de las tendencias y prácticas de diseño y construcción en el país. El análisis se llevó a cabo a partir de un modelo numérico en el que se consideraron diferentes condiciones de humedad relativa, con el fin de identificar los efectos a largo plazo en el concreto y acero de presfuerzo en un periodo de tiempo de 30 años. En la Figura 11, se observa la deflexión esperada en el tablero durante etapa de servicio luego de 30 años de finalizada la construcción, en función del porcentaje de humedad relativa, donde se estiman deflexiones máximas en el centro del vano central cercanas a los 30 cm para humedades relativas de 71.4%, 79.7% y 87.1%.

### Figura 11

*Deflexiones esperadas en el tablero del puente luego de 30 años en servicio para varios valores de humedad relativa*



*Nota.* Adaptado de (Santos Durán et al., 2021).

### ***3.1.4 Técnicas de detección de daño***

La evaluación de la salud estructural en puentes y obras civiles emplea diferentes técnicas enfocadas en la detección de daño, entre estas, se encuentran técnicas visuales como las implementadas por el Instituto Nacional de Vías a través de SIPUCOL en Colombia (Resolución 1518, 2017). Sin embargo, estas presentan limitaciones debido a su naturaleza subjetiva, por tal razón, el interés por el uso de métodos no destructivos para la identificación de daños ha incrementado, desarrollándose técnicas como emisiones acústicas, ultrasonidos, ondas guiadas, termografía, métodos capacitivos, vibrómetros láser Doppler y sistemas de posicionamiento global (GPS). No obstante, se ha comprobado que estos métodos sólo son aplicables en áreas o puntos locales de la estructura, en este sentido, se suelen emplear técnicas de identificación de daño basadas en vibraciones y en la variación de las propiedades dinámicas de la estructura como la masa, la rigidez y la disipación de energía, lo cual permite evaluar posibles daños a partir de una visión global de la estructura (H.-P. Chen & Ni, 2018).

#### **3.1.4.1 Emisiones acústicas.**

La emisión acústica (Acoustic Emission, AE) se clasifica como una técnica de detección de daño no destructiva que consiste en la medición de ondas acústicas o de tensión que presentan un rango de frecuencia de 20 kHz a 1.0 MHz. Estas ondas se propagan por toda la estructura y son producidas por impactos, cambios rápidos de carga, deformaciones, fisuras u otros eventos de daño en los materiales (H.-P. Chen & Ni, 2018).

Los sensores piezoeléctricos son los más comunes para registrar las señales de las ondas, en tanto que, en el estudio llevado a cabo por (Anay et al., 2020) se utilizaron dos tipos de sensores AE para evaluar las condiciones de daño en un puente de vigas de hormigón pretensado de tres

tramos durante una prueba de carga. Los sensores empleados corresponden a un sensor de banda ancha WDI y un sensor resonante R6i mostrados en la Figura 12.

### Figura 12

*Sensores piezoeléctricos de emisiones acústicas*



*Nota.* (a) banda ancha WDI y (b) resonante R6i. Adaptado de (PHYSICAL ACOUSTICS, s/f-b) y (PHYSICAL ACOUSTICS, s/f-a).

#### 3.1.4.2 Ultrasonido.

El principio básico de esta técnica consiste en producir ondas de ultrasonido mediante un transmisor, las cuales viajan a través de la estructura y son captadas finalmente por un receptor para su procesamiento de señales. El rango de frecuencia de este método es muy similar al de las emisiones acústicas, facilitando la detección de grietas planas orientadas de manera perpendicular a la dirección en que se propaga la onda. Generalmente las variables que se obtienen son el tiempo de transmisión, que permite identificar la ubicación del daño, y la amplitud del ultrasonido, que brinda información sobre la magnitud del daño (H.-P. Chen & Ni, 2018).

#### 3.1.4.3 Ondas guiadas.

Las pruebas basadas en ondas guiadas o de Lamb se clasifican como un tipo de método activo de ultrasonido, que consiste en la generación de ondas mecánicas que se propagan por las superficies de la estructura. Para la generación y medición de las ondas se emplean principalmente

transductores como el que se presenta en la Figura 13, los cuales tienen la capacidad de convertir señales eléctricas en mecánicas y viceversa. Las señales medidas son procesadas por medio de métodos de tratamiento de señales para obtener información sobre el estado de daño de la estructura (H.-P. Chen & Ni, 2018).

### Figura 13

*Transductor ultrasónico de 120 kHz*



*Nota.* Adaptado de (Yuhuan Clangsonic Ultrasonic Co. Ltd, s/f).

#### 3.1.4.4 Termografía.

La termografía es un método que involucra el uso de cámaras termográficas (Figura 14) o sensores infrarrojos para el monitoreo de los flujos de calor o variaciones de temperatura producidas por fuentes externas sobre la superficie de los elementos que conforman una estructura (H.-P. Chen & Ni, 2018). Se han desarrollado dos enfoques principales: el pasivo y el activo. El enfoque pasivo no requiere la aplicación de un estímulo térmico, simplemente se basa en la radiación térmica natural de la estructura que resulta de las diferencias de temperatura con el entorno, mientras que, en el enfoque activo, se inducen variaciones térmicas mediante fuentes como lámparas halógenas o escaneos láser (Palma et al., 2023).

**Figura 14**

*Cámara termográfica*



*Nota.* Adaptado de (QCLAB - Defelsko - Magnaflux, s/f).

**3.1.4.5 Vibrómetros láser Doppler.**

Esta técnica se centra en el uso de vibrómetros de láser Doppler (Figura 15), los cuales son transductores de velocidad sin contacto que funcionan bajo el principio del efecto Doppler aplicado a un rayo láser que se propaga a través de una superficie sólida. Para aplicar este método a la detección de daños, se puede emplear un enfoque basado en las propiedades modales de la estructura, asumiendo que los daños causarían variaciones en dichas propiedades. De esta técnica se resalta una alta resolución espacial de medición, además de que es un método sin contacto y, por lo tanto, facilita su implementación en la práctica. Para aplicaciones en puentes de concreto y otras estructuras civiles, la evaluación de la condición estructural debe operarse bajo excitación ambiental. Este tipo de excitación es más adecuado, ya que permite realizar análisis modal en condiciones de servicio de la estructura sin requerir el uso de excitadores artificiales (H.-P. Chen & Ni, 2018).

**Figura 15**

*Equipos empleados en sistema de láser Doppler*



*Nota.* Adaptado de (Atecorp.com, s/f).

**3.1.4.6 Sistemas de posicionamiento global (GPS).**

Los sistemas de posicionamiento global (GPS) se basan en el uso de satélites que proporcionan mediciones precisas de desplazamientos relativos a frecuencias comprendidas entre 20 y 100 Hz. Estos sistemas resultan efectivos para el monitoreo en tiempo real del comportamiento de los desplazamientos o deflexiones en estructuras civiles de gran envergadura bajo condiciones de cargas ambientales. Un sistema GPS comúnmente consta de tres componentes: satélites que orbitan la Tierra, estaciones de control y monitoreo en la superficie terrestre, y receptores GPS (H.-P. Chen & Ni, 2018).

**3.1.4.7 Pruebas de vibración.*****3.1.4.7.1 Vibraciones por excitaciones ambientales (AVT).***

Las pruebas de vibración por excitaciones ambientales (AVT) consisten en la medición de vibraciones en estructuras sin la necesidad de utilizar alguna fuente de excitación artificial. En lugar de ello, se aprovechan las vibraciones producidas por fuentes de origen ambiental, como el viento, el tráfico o los microsismos. A partir de estas mediciones, es posible obtener las características dinámicas propias de la estructura y controlar su integridad a lo largo de su vida útil

mediante la detección de posibles daños (Gómez et al., 2010). Las excitaciones producidas por el ambiente pueden producir señales de tipo estacionarias o no estacionarias; en las primeras, sus propiedades no cambian con el tiempo, mientras que, en las segundas, sí se presentan variaciones (Razavi et al., 2021), las cuales pueden producir problemas de estabilidad en el estado de las vibraciones y, por consiguiente, generar dispersiones en los resultados (Gómez et al., 2010).

#### ***3.1.4.7.2 Vibración forzada (FVT).***

Las pruebas de vibración forzada (FVT) se emplean para obtener la caracterización dinámica de una estructura sometida a vibraciones controladas y sistemáticas generadas por fuerzas artificiales, esto permite reducir las incertidumbres que se pueden producir a causa de las fuentes ambientales. Las pruebas dinámicas que implican fuentes de excitación artificiales se caracterizan por tener una fuerza de entrada con magnitud y dirección conocida. Entre los métodos más comunes para generar estas fuerzas se encuentran el impacto, la liberación de carga y el uso de agitadores (Riveros Jerez et al., 2021). Estos métodos implican el uso de equipos tales como excitadores de masa excéntrica rotacional (Figura 16) y agitadores impulsivos, también conocidos como shakers (Zwolski & Bień, 2011).

#### **Figura 16**

*Excitador de masa excéntrica rotacional*



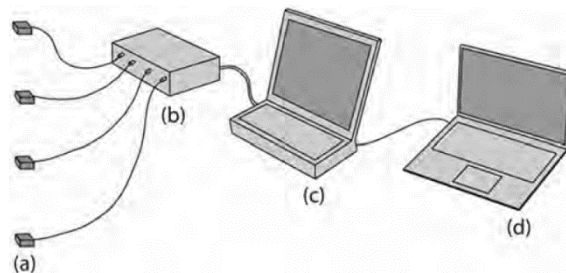
*Nota.* Adaptado de (Zwolski & Bień, 2011).

### 3.1.5 Características típicas de los tipos de instrumentación para monitoreo estructural

En términos generales, los componentes o instrumentación de un sistema de monitoreo en estructuras civiles se pueden agrupar mediante las siguientes categorías: Sensores, conectividad de sensores, adquisición de datos y registro, comunicaciones y sistema de gestión de datos (Figura 17) (INVIAS, 2022).

#### Figura 17

##### *Componentes de sistemas de monitoreo estructural*



*Nota.* (a) Sensores. (b) Conectividad. (c) Adquisición de datos. (d) Gestión de datos. Adaptado de (Rodríguez Suesca, 2021).

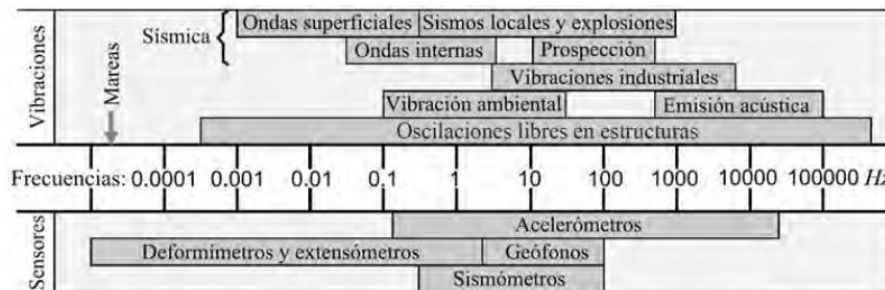
Los sistemas de monitoreo estructural están compuestos por sensores que permiten medir parámetros como aceleraciones, rotaciones, esfuerzos o deflexiones a través del tiempo, a partir de esta información es posible estimar cambios en el comportamiento de las estructuras instrumentadas (Komarizadehasl et al., 2021). Los tipos de sensores más utilizados son los acelerómetros, los cuales están diseñados para ser sensibles ante fuerzas inerciales y vibraciones, se resaltan los acelerómetros tipo microelectromecánicos (MEMs), piezo-eléctricos e IEPE, los cuales cuentan con un rango de respuesta en frecuencia de 0-200 Hz, 0.5-10000 Hz y 0.05-450 Hz, respectivamente (INVIAS, 2022).

En este sentido, es de suma importancia conocer los rangos de frecuencia y amplitudes de las señales a medir para una adecuada elección de la instrumentación. La Figura 18, muestra un

espectro de frecuencias típico asociado a los diferentes tipos de vibraciones que pueden actuar sobre estructuras civiles, así como los sensores utilizados para su medición (Rodríguez Suesca, 2021).

### Figura 18

*Espectro de frecuencias para varios tipos de vibraciones y sensores para su medición*



*Nota.* Adaptado de (Rodríguez Suesca, 2021).

Para el caso de puentes, las frecuencias objetivo están comprendidas generalmente entre 0.1 y 30 Hz, y las frecuencias debidas a vibraciones ambientales se encuentran entre 0.1 y 15 Hz (Rodríguez Suesca, 2021).

#### 3.1.5.1 Redes de sensores inalámbricos (WSN).

Gracias a los avances en las tecnologías de sistemas MEMs, se han implementado redes de sensores inalámbricos (WSN) para el monitoreo de salud estructural en puentes. Estas redes generalmente están compuestas de sensores de bajo consumo de energía que se conectan entre sí de manera inalámbrica, permitiendo medir variables como temperatura, desplazamientos, aceleraciones y vibraciones sin la necesidad de emplear redes de cables complejas (Buckley et al., 2021) (Ghahremani et al., 2022).

Algunos estudios realizados evidencian la eficacia en la implementación de WSN en sistemas de monitoreo estructural de puentes, tal es el caso del Puente Geumdang, ubicado en

Icheon, Corea del Sur, el cual cuenta con una sección en viga cajón de concreto postensado, y fue instrumentado empleando acelerómetros capacitivos inalámbricos de bajo costo (Figura 19). El propósito fue registrar la respuesta de aceleración vertical del puente durante excitaciones ambientales y forzadas. Además, se compararon las ventajas en términos de costos, rendimiento y calidad de datos recolectados que ofrece el sistema inalámbrico sobre los sistemas tradicionales de acelerómetros piezoeléctricos conectados a unidades centralizadas de adquisición de datos mediante cables coaxiales (Lynch et al., 2006).

Así mismo, (Ali et al., 2021) implementó con éxito un sistema WSN de bajo consumo compuesto por acelerómetros de referencia ADXL-345 (Figura 20) para el monitoreo de salud estructural del Puente Jinnah en Karachi, Pakistán, el cual es de concreto pretensado y contaba con 20 años de antigüedad en el momento del estudio. Aplicando técnicas avanzadas de procesamiento de señales y algoritmos de extracción modal a los datos de vibración medidos, se pudo verificar la desviación en la frecuencia natural y las formas modales del puente, permitiendo la detección de zonas con presencia de daño.

### **Figura 19**

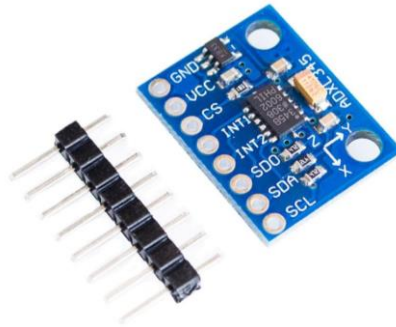
*Sensor inalámbrico utilizado en el Puente Geumdang*



*Nota.* Adaptado de (Lynch et al., 2006).

**Figura 20**

*Acelerómetro ADXL-345*



*Nota.* Adaptado de (Electronilab, s/f).

A pesar de las grandes ventajas ofrecidas por las WSN, se han reportado también algunas limitantes asociadas principalmente al consumo de energía requerido y a la carga de baterías utilizadas para el funcionamiento del sistema a largo plazo. Por esta razón, se suelen emplear recolectores o cosechadoras de energía piezoeléctrica que aprovechan las vibraciones ambientales en los puentes para la generación de energía eléctrica utilizable, la cual puede ser empleada en los sistemas de monitoreo estructural continuos (Solai et al., 2021) (Infantes et al., 2023).

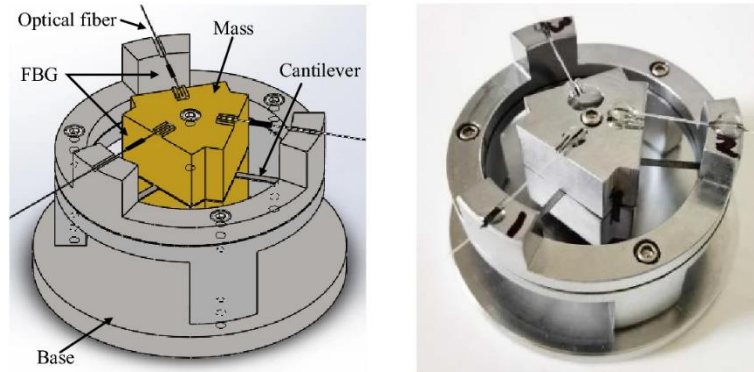
**3.1.5.2 Sensores de fibra óptica.**

Una alternativa que ha tomado relevancia en los sistemas de monitoreo estructural de puentes es el uso de sensores basados en fibra óptica, los cuales se fundamentan en el principio de reflexión interna total y operan en función de la cantidad e intensidad de luz que viaja a través de la fibra óptica (Moreno-Gomez et al., 2018).

A partir de estos, es posible medir deformaciones o aceleraciones producto de vibraciones ambientales en puentes de concreto pretensado con sección viga cajón (Scott et al., 2013). De esta manera se logra la obtención de sus propiedades dinámicas, como frecuencias naturales, factores de amortiguación, desplazamientos y curvaturas modales, útiles para la identificación de posibles

daños. Un claro ejemplo de esto es el caso del Puente de Tilff en Bélgica, el cual fue instrumentado con acelerómetros para la medición de aceleraciones verticales y sensores de fibra óptica, basados en el principio de interferometría de baja coherencia, para la medición de deformaciones axiales. Con los datos medidos, se estimaron los parámetros modales mediante el método de identificación del subespacio estocástico y se compararon con los obtenidos a través de un modelo de elementos finitos (FEM). De este estudio, se pudo identificar una reducción de rigidez del 51%, debido a daños distribuidos espacialmente sobre el puente, los cuales fueron identificados posteriormente mediante inspecciones visuales (Reynders et al., 2007).

Dentro de los tipos de sensores de fibra óptica más comunes se encuentran los sensores basados en redes de Fibra de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) (Figura 21). Estos se destacan por ocupar poco espacio y ofrecer estabilidad, inmunidad electromagnética y alta precisión en la medición de señales de vibración de baja frecuencia (2-50 Hz) (Hong et al., 2021). Gracias a estas características, resultan útiles para la instrumentación de puentes de grandes luces en sección viga cajón en concreto (Scott et al., 2013) (Yau et al., 2013) (S. Z. Chen et al., 2018). Además, se pueden utilizar para el monitoreo de estos a largo plazo, tal como lo demuestra (Nishio, 2017), el cual evaluó la calidad de los datos recolectados durante un periodo de dos años en un puente viga cajón de concreto pretensado construido en 1973, resaltando la importancia de contar con un sistema que sea preciso, capaz de recopilar y almacenar adecuadamente una gran cantidad de datos.

**Figura 21***Sensor basado en redes de Fibra de Bragg*

*Nota.* Adaptado de (Hong et al., 2021).

Por otro lado, están los sensores de Reflectometría Óptica en el Dominio del Tiempo (OTDR) que se caracterizan por contar con una resolución espacial de 5 m y una respuesta de frecuencia máxima de 1 kHz (Lu et al., 2010). Así mismo, están los sensores basados en el principio de microflexión y modulación de intensidad, los cuales introducen curvaturas intencionales dentro de un cable de fibra óptica para inducir una pérdida de intensidad de la luz a lo largo del sensor. A medida que se tensa el cable de fibra óptica, el radio de las curvaturas y la cantidad de pérdida de luz cambian, permitiendo establecer una correlación entre la modulación de la intensidad de la luz y la tensión a lo largo de la longitud del sensor (Harries et al., 2013).

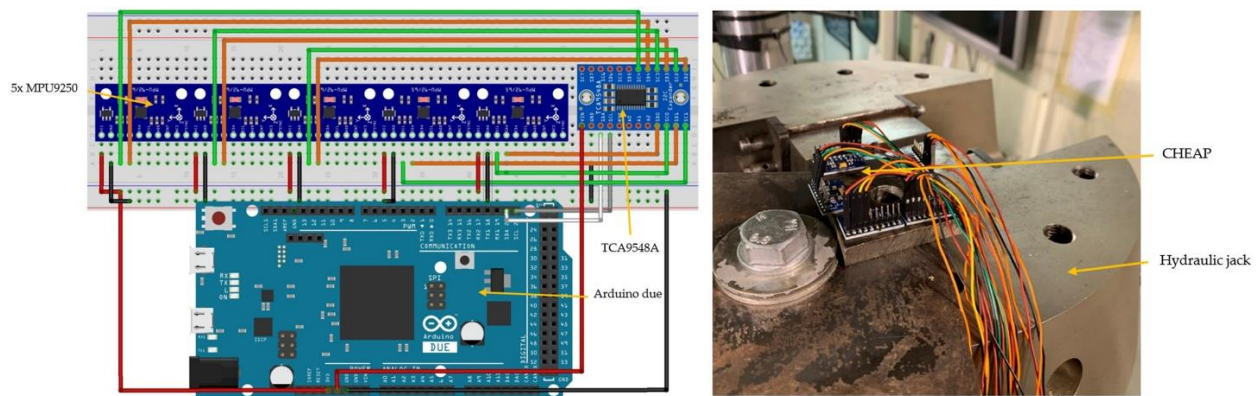
### **3.1.5.3 Sensores de bajo costo.**

A pesar de la gran variedad de metodologías y tipos de sensores disponibles para el monitoreo estructural, el alto costo en algunos de estos representa una limitación, por esta razón, se han realizado estudios que se centran en desarrollar sistemas e instrumentación de bajo costo. Tal es el caso de (Komarizadehasl et al., 2021), los cuales presentan a detalle el funcionamiento de un sistema denominado CHEAP (Cost Hyper-Efficient Arduino Product) (Figura 22),

compuesto por cinco acelerómetros de bajo costo conectados a un microcontrolador Arduino encargado de la adquisición de datos, permitiendo medir de manera precisa aceleraciones en estructuras. Así mismo, en este estudio se compara el precio de este sistema con algunos tradicionales, revelando una notable diferencia y ventaja.

## Figura 22

### Sistema CHEAP



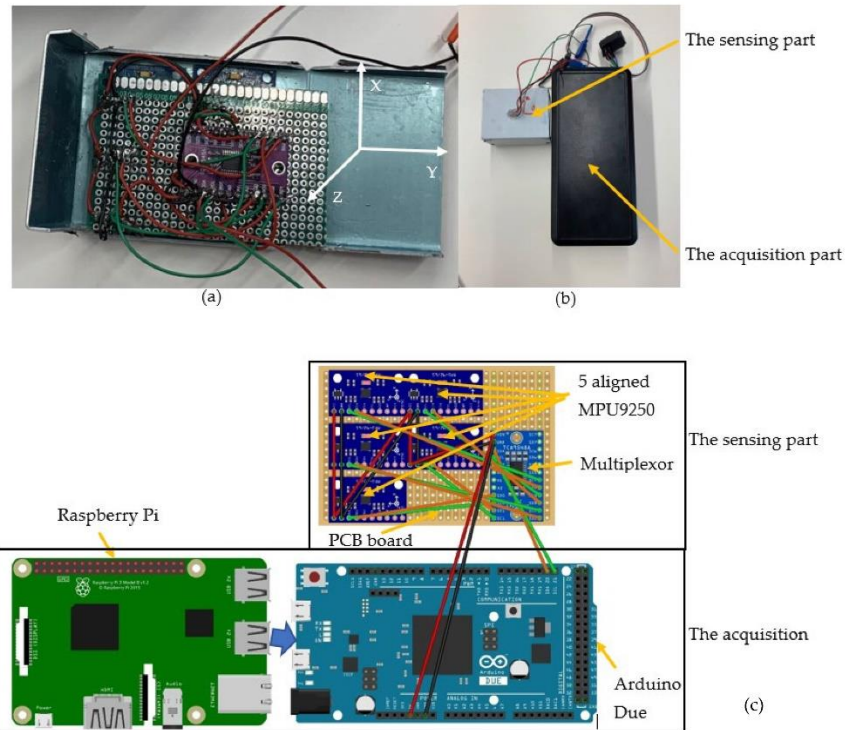
*Nota.* Adaptado de (Komarizadehasl et al., 2021).

Algunas experiencias y aplicaciones de sensores de bajo costo en puentes han sido documentadas por (Komarizadehasl et al., 2022), los cuales identificaron inicialmente algunas desventajas en acelerómetros basados en tecnologías de Arduino y Raspberry Pi, tales como alta densidad de ruido, baja frecuencia de muestreo y problemas de sincronización. Debido a estas limitaciones, decidieron desarrollar un nuevo acelerómetro triaxial de bajo costo basado en tecnología de Arduino, al que denominaron LARA (Low-cost Adaptable Reliable Accelerometer) (Figura 23). Para validar la efectividad y precisión de LARA, se realizó una prueba de análisis de frecuencia en un puente de luz corta, comparando las medidas obtenidas a partir de este con las de un sensor comercial de alta precisión. Al verificar los resultados de ambos sensores, se observan diferencias muy pequeñas entre las frecuencias medidas, presentándose un error máximo del

1.28%. En este mismo estudio, se destacan varias ventajas que presenta LARA sobre el sistema CHEAP (Komarizadehasl et al., 2021) presentado anteriormente.

**Figura 23**

*Componentes de acelerómetro LARA*



*Nota.* Adaptado de (Komarizadehasl et al., 2022).

### 3.1.6 Óptima localización de la instrumentación

Con el fin de optimizar el proceso de adquisición de datos, obtener la mayor cantidad de información posible y reducir tiempos de ejecución en las campañas experimentales, es indispensable implementar técnicas enfocadas en brindar ubicaciones idóneas de la instrumentación utilizada en los monitoreos de salud estructural. Normalmente, la cantidad de puntos de monitoreo y su ubicación se establecen en función de las dimensiones y complejidad de la estructura, así como de sus formas y frecuencias modales de interés. Existen dos tipos de

métodos principales para la localización de la instrumentación: los métodos subóptimos, basados en técnicas iterativas, y los métodos basados en estrategias de optimización formal (Rodríguez Suesca, 2021).

En (Riveros et al., 2013) se reportó una serie de métodos de ubicación de sensores para la detección de daños en estructuras a partir del Enfoque Probabilístico Bayesiano. Dentro de estos, se encuentra el método de independencia efectiva (Effective Independence Method, EFI) propuesto por (Kammer, 1991), el cual se centra en clasificar las ubicaciones candidatas de los sensores en función de su contribución en la independencia lineal de los modos objetivo, eliminando de forma iterativa las ubicaciones que no contribuyen significativamente. Por lo cual, la configuración final de los sensores tiende a maximizar el determinante de la correspondiente Matriz de Información de Fisher utilizada en este método. Así mismo, se presenta el método de sensibilidad del vector propio (Eigenvector Sensitivity Method, ES) desarrollado por (Shi et al., 2000) y el método de cuantificación de daños (Damage Measurability Method, DM) implementado por (Xia, 2002). Por otra parte, (Zhou et al., 2014) han contribuido con un método basado en la implementación de algoritmos genéticos que permiten determinar de manera óptima el número y ubicación de sensores inalámbricos para la identificación de parámetros modales en puentes.

Uno de los métodos mencionados anteriormente fue utilizado por (Á. Viviescas Jaimes et al., 2019) para la identificación modal, a partir de ensayos de excitación ambiental, del Puente Gómez Ortiz de tipología viga cajón ubicado en Colombia, el método en cuestión corresponde al EFI, el cual se implementó para tres modos de vibración en dirección transversal obtenidos mediante campañas experimentales. Los resultados del estudio presentan una muy buena correlación con respecto a la línea base del puente y su respectivo modelo numérico desarrollado previamente.

### ***3.1.7 Toma de datos y resultados obtenidos de la instrumentación***

Para la toma de datos obtenidos a partir de los sensores se emplean equipos que se encargan de recopilar, procesar, sincronizar y almacenar la información medida de forma digital (INVIAS, 2022). Estos equipos se conocen comúnmente como unidades de adquisición de datos (DAU), los cuales incluyen dispositivos de acondicionamiento de señales y convertidores de señales analógicas a digitales (A/D). Para la respuesta global de puentes de grandes luces, es adecuado adoptar anchos de banda de 10 Hz, pues esto requiere frecuencias de muestreo aproximadamente 2.5 veces mayores para dejar espacio para el filtrado antialiasing. El diseño adecuado de estos componentes es la clave para obtener datos de medición de alta calidad para posteriores tratamientos de señales que permiten obtener las medidas correspondientes a las propiedades reales y deseadas de la estructura (H.-P. Chen & Ni, 2018).

#### **3.1.7.1 Tiempo de registro y frecuencia de muestreo.**

Cuando se realizan pruebas de vibración para monitorear el estado estructural de puentes a partir de la variación de sus propiedades dinámicas, es importante tener en cuenta, como variables preliminares, tanto el tiempo de registro como la frecuencia de muestreo de los datos. La primera de estas depende directamente de la naturaleza determinística o aleatoria de la excitación, además del propósito de la medición, las características de la estructura y el método de análisis a emplear. El tiempo de registro se puede clasificar como de tipo momentáneo, periódico o permanente. Por otro lado, la frecuencia de muestreo depende principalmente del contenido de frecuencias de la excitación, de las características modales de la estructura y del método de procesamiento de señales. En este contexto, se debe garantizar que la frecuencia de muestreo sea igual o mayor al doble de la frecuencia natural de vibración de la estructura dentro de un rango de modos de vibración seleccionado y de interés (Rodríguez Suesca, 2021). Autores como (Hernandez-Sierra

et al., 2021) sugieren realizar un modelo numérico previo de la estructura para obtener información modal de referencia.

### **3.1.7.2 Configuración de los datos.**

Para un registro adecuado de los datos, se deben definir los parámetros principales de configuración en el software de adquisición seleccionado. Entre estos, se encuentran la unidad y carpeta de almacenamiento, la cual debe contar con la capacidad suficiente para recolectar toda la información medida durante las pruebas; el nombre de cada registro, procurando que estos no sean demasiado largos para evitar posibles errores y pérdida de información; los parámetros de muestreo, asociados a los tiempos y frecuencias de muestreo; inicio de grabación de datos (trigger), que consiste en definir un umbral de vibración a partir del cual se consideran los datos a almacenar; acoplamiento de la señal, donde se define la escala a trabajar, ya sea una escala absoluta no acoplada (DC) o netamente un acoplamiento de la señal (AC), lo que permite la identificación de los cambios relativos de la cantidad física; ventanas y filtrado; y las unidades de medida del registro de datos (Rodríguez Suesca, 2021).

### **3.1.7.3 Metodología para la medición.**

Para garantizar que el proceso de medición de los datos y la obtención de la información sobre las propiedades dinámicas y el estado de daño de la estructura sea exitoso, se recomienda seguir la metodología propuesta por (Rodríguez Suesca, 2021). Inicialmente, en la etapa de planeación de la prueba, se define el propósito de la medición, el tipo y la cantidad de información requerida, los recursos necesarios para la obtención de esta, las características principales de la estructura, la realización de un modelo numérico, las características de la fuente de excitación, así como los rangos de frecuencia y amplitudes de la excitación y respuesta de la estructura. En la etapa de preparación de la prueba, se realiza una inspección preliminar sobre el estado de la

estructura y se define la cantidad y ubicación de la instrumentación, la forma de montaje de los sensores y la configuración de los equipos y softwares para el registro de los datos. Durante el desarrollo de la prueba, se seleccionan los puntos de medición; se realiza el montaje de la instrumentación seleccionada, la conexión y configuración de los sensores a los sistemas de adquisición y una prueba preliminar; se visualiza y verifica el registro correcto de los datos; se realiza la medición de vibraciones para las diferentes pruebas; se verifica el correcto almacenamiento de los datos; y finalmente se repite cada paso mencionado hasta cubrir todos los puntos de medición necesarios para la evaluación completa de la estructura. Por último, se realiza el procesamiento y tratamiento de las señales medidas, así como el reporte de la medición.

#### **3.1.7.4 Reporte de la medición.**

Una vez culminada la etapa de medición, se suele realizar un reporte en el que se resume la información general y complementaria de las pruebas realizadas, así como de las condiciones del entorno. (Rodríguez Suesca, 2021) recomienda que la información general reportada debe contener una descripción de la fuente de excitación, el tipo y condiciones de la estructura, el propósito de la medición, las referencias normativas, las condiciones del terreno, una descripción sobre el estado de la estructura soportada con evidencias fotográficas, fecha y hora de las pruebas realizadas y condiciones atmosféricas. Así mismo, sobre la medición es pertinente reportar las características de los sensores e instrumentación empleados junto con sus certificados de calibración, la cantidad y ubicación de los sensores, las frecuencias de muestreo, inicio y fin de cada registro, y un reporte descriptivo con evidencias del desarrollo de las pruebas. Por último, se recomienda presentar información complementaria relacionada con los valores máximos medidos, resultados preliminares, posibles fuentes de error y un diagnóstico de la estructura analizada posterior a las pruebas de medición.

### **3.1.7.5 Recuperación de datos perdidos en sistemas de monitoreo.**

Los sistemas de monitoreo estructural continuos y a largo plazo pueden experimentar pérdidas de datos como consecuencia del deterioro de los sensores debido a su exposición constante ante agentes ambientales. Este problema suele ocurrir con mayor frecuencia en sistemas inalámbricos. Por lo general, los datos faltantes de los sensores se interpolan mediante métodos tradicionales, como los de correlación, los cuales emplean una amplia cantidad de datos de monitoreo normales para construir modelos e imputar los datos faltantes. Sin embargo, lograr un ajuste suficiente del conjunto de datos a través de estos métodos suele ser una tarea complicada, por tal motivo, recientemente se han desarrollado nuevas técnicas de imputación de datos basadas en aprendizaje profundo (Deep Learning), como las redes generativas adversativas (GAN) y las redes de memoria a largo plazo (LSTM), en conjunto con el aumento de datos, para imputar datos faltantes entre sensores del mismo tipo (STS) y de diferentes tipos (DTSs). La información a detalle sobre estas técnicas, junto con experiencias de validación en un puente de concreto en China, se presenta en el estudio realizado por (Hou et al., 2022).

### **3.1.8 Métodos de tratamiento de señales**

Una de las etapas más importantes dentro del monitoreo estructural es el procesamiento de las señales obtenidas por medio de los sensores. A través de diferentes métodos es posible obtener propiedades de la estructura mediante las señales medidas y por ende estimar ubicaciones y magnitudes de posibles daños en esta. (Amezquita-Sanchez & Adeli, 2016) presentan en su estudio algunas de las técnicas de tratamiento de señales más comunes que se suelen implementar en los sistemas de monitoreo de salud estructural, entre estas, se encuentran los modelos de series temporales, los cuales se clasifican en lineales y no lineales. Dentro de los modelos lineales están el modelo autorregresivo (AR), el modelo de media móvil (MA) y el modelo de media móvil

autorregresivo (ARMA); mientras que en los modelos no lineales están el modelo autorregresivo no lineal con entradas exógenas (NARX) y el modelo de media móvil autorregresivo no lineal con entradas exógenas (NARMAX). Por otro lado, existe la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual permite convertir muestras discretas de una señal de serie temporal continua en una representación en el dominio de la frecuencia. Adicionalmente, se podría mencionar la transformada de Fourier de corto tiempo (STFT), desarrollada por (Gabor, 1946), utilizada principalmente para analizar señales de tipo estacionarias y la transformada de Hilbert Huang (HHT) (N. E. Huang et al., 1998), basada en el análisis de tiempo-frecuencia para el procesamiento de señales no estacionarias.

En el estudio realizado por (Ali et al., 2021), mencionado como caso de aplicación del monitoreo estructural a partir de redes de sensores inalámbricos, se utilizaron la FFT y HHT como técnicas de procesamiento de señales. Con estas, se logró diferenciar de manera adecuada entre las partes sanas y deterioradas del puente en concreto pretensado analizado.

### ***3.1.9 Monitoreo estructural de puentes: Contexto internacional, nacional y regional***

El monitoreo estructural es un área que permite obtener información sobre el estado de daño de una estructura a partir de sistemas basados en mediciones in situ, modelos analíticos y su comparación con la línea base. Estas mediciones resultan valiosas para monitoreos a largo plazo, debido a que por medio de estas es posible minimizar el impacto del deterioro a través de la implementación de planes que contemplan actividades de mantenimiento o rehabilitación. De igual manera, contribuyen en la gestión eficiente de costos y tiempos, así como a la preservación de la integridad estructural, permitiendo la anticipación de fallas mayores o incluso eventos de colapso (Rincón Prada, 2020).

### 3.1.9.1 Casos nacionales y regionales.

En el ámbito nacional y regional, se presentan los casos de los puentes El Tablazo (Figura 24), El Ramo (Figura 25), Pujamanes (Figura 26) y Gómez Ortiz (Figura 27), todos de concreto presforzado, de sección viga cajón variable y construidos por voladizos sucesivos. Los tres primeros se encuentran ubicados sobre la vía que conecta a Bucaramanga con el municipio de San Vicente de Chucurí, y se construyeron como parte del Proyecto Hidroeléctrico de Sogamoso (Rincón Prada, 2020). Por otro lado, el puente Gómez Ortiz, se localiza sobre el Río Sogamoso y hace parte de la vía que conecta los municipios de Girón y Zapatoca (Vargas Carvajal, 2016). La información sobre la geometría de cada uno de estos se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Geometría puentes casos nacionales y regionales*

<b>Puente</b>	<b>Longitud total (m)</b>	<b>Luces (m)</b>	<b>Altura pilas (m)</b>	<b>Ancho tablero (m)</b>	<b>Longitud pilotes (m)</b>
El Tablazo	558	93-186-186-93	90, 109 y 57	10.55	25-37
El Ramo	179	44.5-90-44.5	46 y 40	10.55	15-19.5
Pujamanes	243	60.5-122-60.5	57	10.55	21-26
Gómez Ortiz	510	85-170-170-85	42 y 47	10.55	50

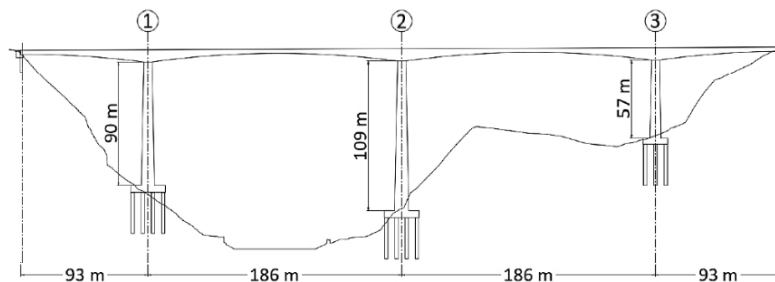
*Nota.* Adaptado de (Rincón Prada, 2020) y (Vargas Carvajal, 2016).

En el Puente El Tablazo, se realizó inicialmente una inspección visual interna y externa, donde se pudo identificar un buen estado general. Posterior a ello, se realizó una campaña experimental que consistía en la medición de deflexiones sobre el concreto expuesto en el tablero del carril peatonal. Las medidas se realizaron mediante altimetría empleando un nivel digital de precisión. Se definieron en total 117 puntos de medición, procurando que el puente no se encontrara transitado al momento de ejecutar las pruebas, los datos de deflexiones obtenidos en campo se compararon con las deformaciones establecidas en etapa de diseño, las esperadas a lo

largo de la vida útil del puente y las obtenidas a partir de un Modelo de Elementos Finitos (FEM), en el que se consideró los efectos a largo plazo de Creep y Shrinkage mediante el modelo B3. En los resultados del estudio se observan deformaciones máximas de 18.6 mm en el centro de luz medidas en campo, superando las esperadas según el diseño, además se destaca la predicción de deflexiones máximas de 9.4 y 8.6 cm en las luces centrales del puente según el modelo calibrado (Rincón Prada, 2020).

### Figura 24

*Sección longitudinal del Puente El Tablazo*



*Nota.* Adaptado de (Rincón Prada, 2020).

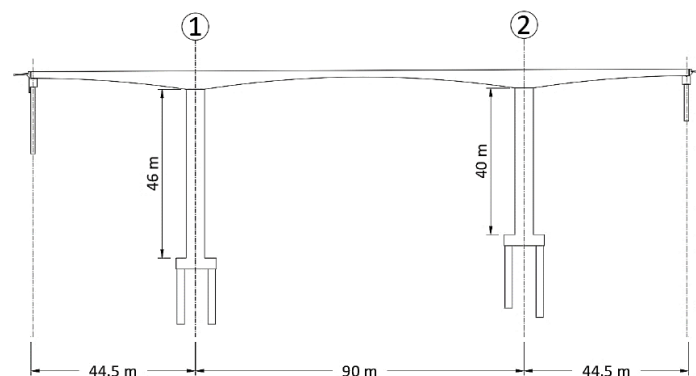
De igual manera, (Hernández Sierra, 2021) realizó una caracterización dinámica de la estructura que contempló la elaboración de simulaciones FEM, con el fin de obtener una idea preliminar sobre las formas modales y valores de frecuencia del puente, además de la ejecución de pruebas de vibración ambiental (AVT) y forzada (FVT) siguiendo el método EFI para la ubicación óptima de los sensores. En las pruebas experimentales se utilizaron dos acelerómetros triaxiales de fuerza balanceada y alta sensibilidad que permitieron el registro de señales de aceleración, a su vez para las pruebas FVT se empleó una volqueta con un peso de 32 Ton que circuló a lo largo del tablero. Las propiedades modales y dinámicas del puente se obtuvieron a través de las técnicas FDD, EFDD y SSI. Como parámetro de validación de los resultados se consideró el criterio de

certidumbre modal (Modal Assurance Criterion, MAC), el cual consiste en un factor de correlación, comprendido entre 0 y 1, que compara las formas modales teóricas respecto a las obtenidas a partir de simulaciones, donde un factor cercano a la unidad indica una buena correlación (Rodríguez Suesca, 2021).

El siguiente caso corresponde al Puente El Ramo, en el cual se efectuaron mediciones de deflexiones siguiendo el mismo procedimiento planteado para el puente El Tablazo, considerando un total de 55 puntos de medición. En los resultados del estudio también se observan deformaciones que difieren de las esperadas según el diseño, además se destaca la predicción de una deflexión máxima de 2.06 cm en la luz central del puente según el modelo numérico realizado (Rincón Prada, 2020). En este puente, también se realizó una caracterización dinámica según el procedimiento planteado por (Hernández Sierra, 2021), donde a partir del FEM se identificaron las frecuencias naturales presentadas en la Tabla 5.

### Figura 25

*Sección longitudinal del Puente El Ramo*



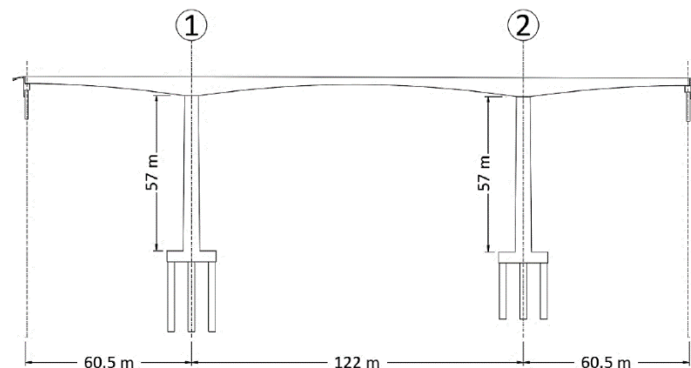
*Nota.* Adaptado de (Rincón Prada, 2020).

En el Puente Pujamanes también se realizaron mediciones de deflexiones siguiendo el mismo procedimiento planteado para el puente El Tablazo, considerando un total de 52 puntos de

medición. Al igual que los dos casos anteriores, en los resultados del estudio se observan deformaciones máximas en el centro de luz de 15.72 mm que difieren de las esperadas según el diseño, además se destaca la predicción de una deflexión máxima de 3.42 cm en la luz central del puente, según el modelo numérico realizado (Rincón Prada, 2020). En este puente, también se realizó una caracterización dinámica según el procedimiento planteado por (Hernández Sierra, 2021), donde a partir del FEM se identificaron las frecuencias naturales presentadas en la Tabla 5.

### Figura 26

*Sección longitudinal del Puente Pujamanes*



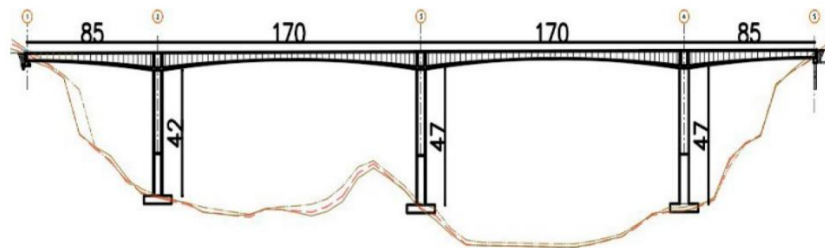
*Nota.* Adaptado de (Rincón Prada, 2020).

En el Puente Gómez Ortiz también se realizó una caracterización dinámica por parte de (Vargas Carvajal, 2016) mediante AVT antes y después del llenado del embalse Hidrosogamoso, con el fin de calibrar un FEM inicial. De este se identificaron 10 modos de vibración, donde se presentan modos fundamentales en dirección longitudinal y transversal con valores de frecuencia de 0.683 Hz y 0.576 Hz, respectivamente, además de porcentajes de participación de masa del 76.3% y 46.9%, respectivamente. Para las pruebas de campo antes del llenado del embalse se emplearon dos sensores triaxiales de fuerza balanceada para registrar aceleraciones en las tres direcciones ortogonales, un equipo de adquisición de datos multicanal con un ancho de banda de

200 Hz y una memoria de almacenamiento de 64 Mb, una planta eléctrica y un computador portátil. Las mediciones se realizaron en 9 puntos del tablero para 8 configuraciones de sensores, cada una con un tiempo de registro comprendido entre 4 y 5 minutos, y una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Para las pruebas ejecutadas luego del llenado del embalse, se emplearon tres equipos de adquisición de datos cada uno compuesto de un sensor triaxial interno de fuerza balanceada, un receptor GPS con cable de antena, una batería de 15.5 VDC recargable, una planta eléctrica y un computador portátil. Las mediciones se realizaron en 104 puntos del tablero, donde cada configuración contó con un tiempo de registro de 10 minutos y una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Los parámetros y propiedades modales del puente se identificaron mediante los métodos PP y EFDD. (Hernández Sierra, 2021) también implementó su metodología en este mismo puente, donde a partir del FEM se identificaron las frecuencias naturales presentadas en la Tabla 5.

### Figura 27

*Sección longitudinal del Puente Gómez Ortiz*



*Nota.* Adaptado de (INGETEC, 2014).

**Tabla 5**

*Frecuencias naturales de puentes nacionales y regionales*

El Ramo			Pujamanes			Gómez Ortiz		
Modo	Frecuencia (Hz)	%Masa	Modo	Frecuencia (Hz)	%Masa	Modo	Frecuencia (Hz)	%Masa
1-Y	1.15	56.78	1-Y	0.67	55.99	1-RZ	0.59	18.08
2-Z	1.64	11.6	2-Z	1.16	9.64	1-Y	0.62	40.81
1-RZ	2.19	51.06	1-RZ	1.23	51.35	4-Y	1.02	4.74
3-RY	3.21	9.03	2-Y	2.17	15.54	1-Z	1.04	19.32
1-Z	3.62	20.49	2-RY	2.17	9.13	2-Y	1.55	16.74
2-Y	3.94	15.97	1-Z	2.59	21.3	2-Z	1.87	7.74
1-RY	4.15	32.03	1-RY	3.11	32.07	2-X	1.91	7.93

*Nota.* Adaptado de (Hernández Sierra, 2021).

**3.1.9.2 Casos internacionales.**

Como referentes internacionales se presentan dos casos de puentes en concreto presforzado de sección viga cajón, ambos ubicados en China. El primero de estos es el Puente del Canal Jinghang (Figura 28) que cuenta con una luz central de 150 m y dos luces laterales de 85 m (Z. Chen et al., 2015).

**Figura 28**

*Puente Jinghang en China*



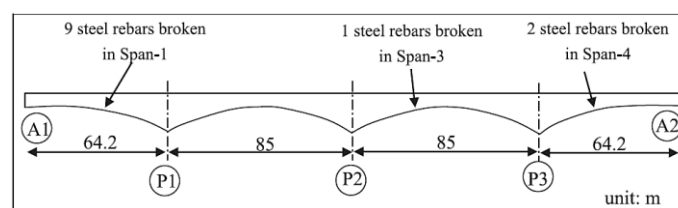
*Nota.* Adaptado de (Z. Chen et al., 2015).

A este puente se le realizó un monitoreo con el fin de determinar su comportamiento a largo plazo y, en etapas de construcción y servicio, para lo cual se empleó una variedad de sensores para medir esfuerzos, elevaciones, respuestas dinámicas, temperatura, deformaciones y deflexiones, además de un módulo de recolección de datos que enviaba la información a un cuarto de monitoreo a través de un sistema inalámbrico. Dentro de las pruebas dinámicas se hallaron propiedades como las frecuencias de vibración, los modos de vibración y los factores de amortiguación del puente a partir de vibraciones ambientales. Las frecuencias de vibración obtenidas fueron de 1.11 y 1.58 Hz, las cuales difieren ligeramente de los valores de diseño de 1.02 y 1.37 Hz, esto indica que la estructura real es más rígida de lo previsto. En el análisis de deflexiones del puente a lo largo de su vida útil, se observa un aumento de estas en el centro de luz del vano principal, ya que luego de 3 y 6 meses de haber finalizado la construcción, se registraron deflexiones de 15.10 y 26.73 mm, respectivamente. Este aumento se debe principalmente al Creep y Shrinkage en el concreto (Z. Chen et al., 2015).

Por otro lado, el puente estudiado por (H. Huang & Wu, 2018) se encuentra ubicado en Japón y hace parte de la Ruta Nacional de este país, donde circula un promedio de 15.000 vehículos por día. Este puente tiene una longitud total de 300 m distribuidos en dos vanos de 64.2 m y dos vanos de 85 m como se observa en la Figura 29.

### Figura 29

*Sección longitudinal del Puente sobre la Ruta Nacional de Japón*



*Nota.* Adaptado de (H. Huang & Wu, 2018).

Un aspecto por resaltar es el refuerzo aplicado en el puente, el cual se trata de un postensado externo a causa de la identificación de varios puntos que presentaban deterioro del concreto y corrosión del acero. El objetivo del estudio se centró en monitorear el comportamiento estructural del puente antes y después de la intervención realizada. Para ello, se sometió la estructura a condiciones de carga estática y dinámica a través del uso de camiones de 20 toneladas. Se emplearon sensores de gran calibre y acelerómetros FBG con frecuencias de muestreo de 200 Hz para la medición de deformaciones y vibraciones, respectivamente. A partir de estas últimas se estimaron las propiedades dinámicas del puente y como resultado de las pruebas estáticas, se observó que después de la intervención, la distribución de deformación en el tramo reforzado mostró una tendencia descendente en comparación con la distribución de deformación antes del refuerzo. Esto indica que se logró mejorar la rigidez a flexión, mientras que los resultados de las pruebas dinámicas mostraron que las frecuencias naturales identificadas antes y después del proyecto de fortalecimiento no reflejaron cambios significativos. Finalmente, los datos medidos, en combinación con simulaciones basadas en FEM, permitieron determinar con precisión las características de los daños relevantes del puente (H. Huang & Wu, 2018).

#### **4. Conclusiones**

El análisis bibliométrico realizado evidencia un elevado interés en la investigación enfocada en sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes viga cajón durante los últimos años, resaltándose el progreso en estudios relacionados con la aplicación de métodos no destructivos y el desarrollo de nuevas tecnologías para el monitoreo de esta tipología de puentes.

Como resultado de la revisión de literatura, se identificaron técnicas y herramientas implementadas en el monitoreo estructural a corto y largo plazo de puentes viga cajón en concreto, donde se ha demostrado que la implementación de sistemas de monitoreo continuo en estos puentes permite detectar y evaluar de manera temprana cualquier deterioro o daño estructural causado por la exposición constante ante cargas de servicio y condiciones ambientales cambiantes. Esto contribuye a garantizar la integridad de los puentes y, por ende, prolongar su vida útil.

Así mismo, se halló que fenómenos como el acuíñamiento, la fluencia lenta del concreto (Creep), la retracción del concreto (Shrinkage) y la relajación del acero de pretensado generan efectos inmediatos o a largo plazo en el comportamiento estructural de los puentes, por lo que es crucial considerar su influencia en el diseño y la monitorización de estos.

Dentro de los tipos de sensores utilizados en sistemas de monitoreo estructural, se resaltan los sensores inalámbricos, de fibra óptica y de bajo costo, los cuales han sido ampliamente investigados y utilizados, donde se destaca también el uso de cosechadoras de energía en sistemas de monitoreo continuos y a largo plazo, ya que permiten la generación de energía eléctrica utilizable a partir de vibraciones ambientales.

En cuanto a la ubicación óptima de los sensores para la detección de daños estructurales, se identificaron diferentes técnicas utilizadas en varios estudios que avalan la efectividad de estas, demostrando que la colocación estratégica de los sensores puede mejorar la precisión y la eficiencia del monitoreo, permitiendo una detección temprana y precisa de cualquier cambio en el comportamiento estructural de los puentes.

## 5. Recomendaciones

Se recomienda utilizar la información presentada en este documento, así como las experiencias registradas en los casos de antecedentes nacionales e internacionales, como base teórica para orientar adecuadamente el desarrollo de futuras investigaciones numéricas o experimentales, enfocadas en el monitoreo estructural a largo plazo de puentes viga cajón en concreto, teniendo en cuenta los efectos diferidos que estos pueden experimentar, además de las diferentes metodologías, técnicas, procedimientos y herramientas reportadas en base a la literatura científica consultada. Se debe garantizar que los sistemas sean precisos y cuenten con la capacidad suficiente para recopilar y almacenar eficientemente grandes cantidades de datos.

De igual manera, se recomienda articular los resultados de análisis bibliométricos de los metadatos de cada ecuación de búsqueda en un mismo archivo que se pueda introducir a Vosviewer® y Biblioshiny®, con el fin de tener una idea más sólida de los resultados de cada base de datos, y así comparar su utilidad en investigaciones futuras. Paralelamente, se sugiere desarrollar una estrategia de selección de documentos de la revisión sistemática, con el fin de tener una base de datos, ya sea en Microsoft Excel® o en Microsoft Access®, y de esta manera tener una trazabilidad del proceso de selección de documentos.

**Referencias Bibliográficas**

- Ali, S. H., Khan, T. M. R., Abdullah, M., & Zaid, M. (2021). Wireless sensor network-based structural health monitoring of bridges using advanced signal processing techniques. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(2), 1266–1283. <https://doi.org/10.1520/JTE20180849>
- Amezquita-Sanchez, J. P., & Adeli, H. (2016). Signal Processing Techniques for Vibration-Based Health Monitoring of Smart Structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11831-014-9135-7>
- Anay, R., Lane, A., Jáuregui, D. V., Weldon, B. D., Soltangharai, V., & Ziehl, P. (2020). On-Site Acoustic-Emission Monitoring for a Prestressed Concrete BT-54 AASHTO Girder Bridge. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001440](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001440)
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2014). Sección 4: Análisis y evaluación estructural. *Norma Colombiana de Diseño de Puentes, CCP14*.
- Atecorp.com. (s/f). *Polytec RSV-150 Remote Sensing Vibrometer*. Recuperado el 1 de enero de 2024, de <https://www.atecorp.com/products/polytec/rsv-150>
- Barthélémy, J.-F., Sellin, J.-P., & Torrenti, J.-M. (2015). The Effects of Long-Term Behavior of Both Concrete and Prestressing Tendons on the Delayed Deflection of a Prestressed Structure. *CONCREEP 10*, 621–630. <https://doi.org/10.1061/9780784479346.075>
- Bayraktar, A., Can Altunişik, A., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A., & Taş, Y. (2009). Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0887-3828200923:290>

- Bažant, Z. P., & Baweja, S. (2000). *Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3*. [www.fsv.cvut.cz/kristek](http://www.fsv.cvut.cz/kristek),
- Bažant, Z. P., Yu, Q., & Li, G.-H. (2012). Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms. *Journal of Structural Engineering (New York, N.Y.)*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000487](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000487)
- Brincker, R., & Andersen, P. (2006). *Understanding Stochastic Subspace Identification*.
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2000). *Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition* (Vol. 18).
- Buckley, T., Ghosh, B., & Pakrashi, V. (2021). Edge structural health monitoring (E-SHM) using low-power wireless sensing. *Sensors*, *21*(20). <https://doi.org/10.3390/s21206760>
- Chen, H.-P., & Ni, Y.-Q. (2018). *Structural health monitoring of large civil engineering structures* (1a ed.).
- Chen, S. Z., Wu, G., Xing, T., & Feng, D. C. (2018). Prestressing force monitoring method for a box girder through distributed long-gauge FBG sensors. *Smart Materials and Structures*, *27*(1). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa9bbe>
- Chen, Z., Guo, T., & Yan, S. (2015). Life-cycle monitoring of long-span PSC box girder bridges through distributed sensor network: Strategies, methods, and applications. *Shock and Vibration*, *2015*. <https://doi.org/10.1155/2015/497159>
- Electronilab. (s/f). *ADXL345 - Acelerómetro Digital de Tres Ejes*. Recuperado el 4 de enero de 2024, de <https://electronilab.co/tienda/adx1345-acelerometro-digital-de-tres-ejes/>
- Gabor, D. (1946). Theory of communication. *Institution of Electrical Engineers* *93*, 429–457.

- Ghahremani, B., Enshaeian, A., & Rizzo, P. (2022). Bridge Health Monitoring Using Strain Data and High-Fidelity Finite Element Analysis. *Sensors*, 22(14). <https://doi.org/10.3390/s22145172>
- Gómez, I., Maldonado, E., & Chio, G. (2010). Pruebas de vibración ambiental en puentes. *Revista UIS Ingenierías*, 9(1), 55–68.
- Han, X., Li, W., & Li, P. (2023). Long-Term Deflection Analysis of Large-Span Continuous Prestressed Concrete Rigid-Frame Bridges Based on a Refined Modeling Approach. *Applied Sciences*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/app13179727>
- Harries, K. A., Holford, A., & Kasan, J. (2013). Demonstration of Fiber Optic Instrumentation System for Prestressed Concrete Bridge Elements. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(6), 785–795. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000390](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000390)
- Hernández Sierra, W. A. (2021). *Caracterización dinámica de puentes en concreto de grandes luces de sección viga cajón contruidos por voladizos sucesivos*. Universidad Industrial de Santander.
- Hernandez-Sierra, W. A., Viviescas, A., & Riveros-Jerez, C. A. (2021). Caracterización dinámica de puentes de grandes luces de sección viga cajón contruidos por voladizos sucesivos. *Scientia Et Technica*. <https://doi.org/10.22517/23447214.24311>
- Hewson, N. R. (2012). *Prestressed concrete bridges design and construction* (ICE Publishing, Ed.; 2a ed.).
- Hong, L., Sun, R., Qiu, Z., Han, Z., & Li, Y. (2021). A multi-cantilever beam low-frequency FBG acceleration sensor. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98055-z>
- Hou, J., Jiang, H., Wan, C., Yi, L., Gao, S., Ding, Y., & Xue, S. (2022). Deep learning and data augmentation based data imputation for structural health monitoring system in multi-sensor

- damaged state. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 196.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111206>
- Huang, H., & Wu, Z. (2018). Monitoring and structural analysis of a rehabilitated box girder bridge based on long-gauge strain sensors. *Structural Health Monitoring*, 17(3), 586–597.  
<https://doi.org/10.1177/1475921717707357>
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995.  
<https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Infantes, M., Castro-Triguero, R., Sola-Guirado, R. R., Bullejos, D., & Friswell, M. I. (2023). A feasibility study on piezoelectric energy harvesting from the operational vibration of a highway bridge. *Advances in Structural Engineering*, 26(2), 205–217.  
<https://doi.org/10.1177/13694332221120129>
- INGETEC. (2014). *Planos 'As Built' Puente Guillermo Gómez Ortiz*.
- INVIAS. (2022). *Guía para la instrumentación y monitoreo de puentes*.
- Jacobsen, N.-J., Andersen, P., & Brincker, R. (2006). *Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis*.
- Kammer, D. C. (1991). Sensor placement for on-orbit modal identification and correlation of large space structures. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 14(2), 251–259.  
<https://doi.org/10.2514/3.20635>

- Komarizadehasl, S., Lozano, F., Lozano-Galant, J. A., Ramos, G., & Turmo, J. (2022). Low-Cost Wireless Structural Health Monitoring of Bridges. *Sensors*, 22(15). <https://doi.org/10.3390/s22155725>
- Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Ma, H., Lozano-Galant, J. A., & Turmo, J. (2021). Development of a low-cost system for the accurate measurement of structural vibrations. *Sensors*, 21(18). <https://doi.org/10.3390/s21186191>
- Le, T. P., & Argoul, P. (2016). Modal identification using the frequency-scale domain decomposition technique of ambient vibration responses. *Journal of Sound and Vibration*, 384, 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.019>
- Liu, C., DeWolf, J. T., & Kim, J. H. (2009). Development of a baseline for structural health monitoring for a curved post-tensioned concrete box-girder bridge. *Engineering Structures*, 31(12), 3107–3115. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.022>
- Lu, Y., Zhu, T., Chen, L., & Bao, X. (2010). Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR. *Journal of Lightwave Technology*, 28(22), 3243–3249. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2078798>
- Lynch, J. P., Wang, Y., Loh, K. J., Yi, J. H., & Yun, C. B. (2006). Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors. *Smart Materials and Structures*, 15(6), 1561–1575. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/6/008>
- Magura, D. D., Sozen, M. A., & Siess, C. P. (1964). A Study of Stress Relaxation in Prestressing Reinforcement. *PCI Journal*, 9(2), 13–57. <https://doi.org/10.15554/pcij.04011964.13.57>
- Moreno-Gomez, A., Perez-Ramirez, C. A., Dominguez-Gonzalez, A., Valtierra-Rodriguez, M., Chavez-Alegria, O., & Amezcquita-Sanchez, J. P. (2018). Sensors Used in Structural Health

- Monitoring. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(4), 901–918.  
<https://doi.org/10.1007/s11831-017-9217-4>
- Muñoz, E., Nunez, F., Rodríguez, J. A., Ramos, A., & Otálora, C. (2010). Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural. *Revista ingeniería de construcción*, 25(2). <https://doi.org/10.4067/S0718-50732010000200006>
- Naderpour, H., & Fakharian, P. (2016). A synthesis of peak picking method and wavelet packet transform for structural modal identification. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(7), 2859–2867. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0523-4>
- Nishio, M. (2017). Quality evaluation of fiber-optic strain data acquired in long-term bridge monitoring. *Sensors and Materials*, 29(2), 141–152.  
<https://doi.org/10.18494/SAM.2017.1462>
- Palma, V., Iovane, G., Hwang, S., Mazzolani, F. M., Landolfo, R., Sohn, H., & Faggiano, B. (2023). Innovative technologies for structural health monitoring of SFTs: proposal of combination of infrared thermography with mixed reality. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. <https://doi.org/10.1007/s13349-023-00698-1>
- Parra, E., & Zea, M. (2016). *Estudio de las principales patologías y técnicas de reforzamiento para puentes en concreto postensado construidos por avance en voladizos sucesivos fundidos in situ*. Universidad Industrial de Santander.
- PHYSICAL ACOUSTICS. (s/f-a). *R6I-AST - 60 kHz integral preamp AE sensor*. Recuperado el 31 de diciembre de 2023, de <https://www.physicalacoustics.com/by-product/sensors/R6I-AST-60-kHz-Integral-Preamp-AE-Sensor>

PHYSICAL ACOUSTICS. (s/f-b). *WDI-AST - 100-900 kHz wideband differential AE sensor*.

Recuperado el 31 de diciembre de 2023, de <https://www.physicalacoustics.com/by-product/sensors/WDI-AST-100-900-kHz-Wideband-Differential-AE-Sensor>

Purba, L. H., Supriyadi, B., & Suhendro, B. (2023). Long-term deflection of prestressed concrete box girder bridges due to creep and shrinkage. *International Journal of GEOMATE*, 25(107), 17–24. <https://doi.org/10.21660/2023.107.3536>

QCLAB - Defelsko - Magnaflux. (s/f). *Camara Termografica Marca: FLIR Referencia: E75*. Recuperado el 1 de enero de 2024, de <https://www.openskycolombia.com/equipos/camara-termografica-marca-flir-referencia-e75/>

Razavi, B. S., Mahmoudkelayeh, M. R., & Razavi, S. S. (2021). Damage identification under ambient vibration and unpredictable signal nature. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(5), 1253–1273. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00503-x>

Resolución 1518, INVIAS (2017).

Reynders, E., Roeck, G. De, Gundes Bakir, P., & Sauvage, C. (2007). Damage Identification on the Tilff Bridge by Vibration Monitoring Using Optical Fiber Strain Sensors. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(2), 185–193. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:2\(185\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:2(185))

Rincón, L. F., Viviescas, Á., Chio, G., Osorio, E., & Riveros, C. A. (2019). Análisis del comportamiento a largo plazo de un puente viga cajón construido por voladizos sucesivos en Colombia a partir de deflexiones medidas en campo. En *Desarrollo e innovación en ingeniería* (pp. 203–210). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3387679>

- Rincón, N., Garzón, J., & Quiroga, P. (2014). Estudio del control de deflexiones en puentes de concreto preesforzado construidos en sitio por voladizos sucesivos. *ACI Publicaciones Técnicas*, 17, 30–36. [www.acicolombia.org.co](http://www.acicolombia.org.co)
- Rincón Prada, L. F. (2020). *Estimación de patologías asociadas a efectos reológicos a largo plazo en puentes viga-cajón en Colombia*. Universidad Industrial de Santander.
- Riveros, C., García, E., & Rivero, J. (2013). A Comparative Study of Sensor Placement Techniques for Structural Damage Detection. *Revista EIA*, 23–37. <https://doi.org/10.14508/reia.2013.10.20.23-37>
- Riveros Jerez, C. A., Viviescas, Á., & Hernandez, W. (2021). Identificación modal de puentes segmentales mediante simulaciones numéricas de pruebas de vibración forzada con vehículos. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(2), 59–78. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.2.4888>
- Rodriguez Suesca, A. E. (2021). *Evaluación de vibraciones en el diagnóstico de estructuras: Estudio de comportamiento de estructuras en deterioro*. Universidad de Granada.
- Santos Durán, C., Díaz Durán, E., & Benjumea Royero, J. (2021). Comparación de la respuesta estructural de un puente viga cajón de voladizos sucesivos durante construcción y en servicio en tres escenarios de humedad relativa de Colombia. *INGE CUC*, 18(1), 51–65. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.18.1.2022.05>
- Scott, R. H., Banerji, P., Chikermane, S., Srinivasan, S., Basheer, P. A. M., Surre, F., Sun, T., & Grattan, K. T. V. (2013). Commissioning and evaluation of a fiber-optic sensor system for bridge monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 13(7), 2555–2562. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2256599>

- Shi, Z. Y., Law, S. S., & Zhang, L. M. (2000). Optimum Sensor Placement for Structural Damage Detection. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:11\(1173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:11(1173))
- Solai, K., Chandrasekaran, M., & Rathnasami, J. D. (2021). Miniaturized but efficient cantilever beam vibration energy harvesters for wireless bridge health monitoring applications. *Archive of Applied Mechanics*, 91(12), 4609–4619. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-02058-1>
- Valle, R., Carvajal, N., & Botero, J. C. (2017). Evolución de los parámetros geométricos de diseño en puentes construidos con voladizos sucesivos in situ. En *UIS Ingenierías* (Vol. 16, Número 1).
- Vargas Carvajal, L. A. (2016). *Propuesta de plan de monitoreo del comportamiento dinámico para la salud estructural del nuevo puente Gómez Ortiz en la vía Girón Zapatoca*. Universidad Industrial de Santander.
- Viviescas Jaimes, A., Carrillo León, W. J., & Vargas Carvajal, L. A. (2018). Structural health monitoring baseline of Gomez Ortiz bridge using ambient vibration tests. *INGE CUC*, 14(1), 52–65. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.05>
- Viviescas Jaimes, Á., Vargas Carvajal, L. A., & Riveros Jerez, C. A. (2019). Identificación modal de un puente viga cajón usando mediciones óptimamente seleccionadas de ensayos de excitación ambiental. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 31–40. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019003>
- Xia, Y. (2002). *Condition assessment of structures using dynamic data*.
- Yau, M. H., Chan, T. H. T., Thambiratnam, D. P., & Tam, H. Y. (2013). Static Vertical Displacement Measurement of Bridges Using Fiber Bragg Grating (FBG) Sensors. *Advances in Structural Engineering*, 16(1), 165–176. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.1.165>

- Yuhuan Clangsonic Ultrasonic Co. Ltd. (s/f). *Fabricantes y proveedores de transductores ultrasónicos de 120 kHz de China - Clangsonic*. Recuperado el 1 de enero de 2024, de <https://es.clangsonicultrasonics.com/120khz-ultrasonic-transducer.html>
- Zhou, G. D., Yi, T. H., & Li, H. N. (2014). Wireless sensor placement for bridge health monitoring using a generalized genetic algorithm. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 14(5). <https://doi.org/10.1142/S0219455414400112>
- Zwolski, J., & Bień, J. (2011). Modal analysis of bridge structures by means of Forced Vibration Tests. *Journal of Civil Engineering and Management*, 17(4), 590–599. <https://doi.org/10.3846/13923730.2011.632489>