




# Dynamic characterization of box girder bridges of large span built by successive cantilevers

Caracterización dinámica de puentes de grandes luces de sección viga cajón construidos por voladizos sucesivos

W. A. Hernandez-Sierra  ; Alvaro Viviescas  ; C. A. Riveros-Jerez 

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.24311>

Artículo de revisión

**Abstract**— In recent years, the Colombian government has made large investments in 4G projects to build roads with high-specification. The dominant typology of bridges built for 4G projects correspond to long-span segmental concrete bridges. These bridges are located mainly in intermediate or high seismic zones. The Colombian bridge code CCP-14 does not establish specific control and monitoring criteria for bridges of this nature, however, the national context demands the implementation of dynamic characterization tests for the receipt of bridges and the use of more robust inspection procedures to assess the dynamic response of bridges. At the national level, procedures are required to determine the dynamic response of new bridges, or bridges that have suffered structural deterioration, based on ambient vibration tests and forced vibration tests, therefore, the group of approaches presented in this paper constitute a benchmark for the future development of test protocols more in line with the needs of the country

**Index Terms**— Ambient vibration, segmental bridge, dynamic test, forced vibration, modal identification, optimal sensor placement.

**Resumen**—En los últimos años el gobierno colombiano ha realizado grandes inversiones en proyectos 4G de construcción de vías de altas especificaciones. La tipología dominante de puentes construidos para los proyectos de vías 4G corresponde a puentes de concreto de grandes luces construidos por voladizos sucesivos, puentes principalmente ubicados en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta. El código colombiano de puentes CCP-14 no establece criterios específicos de control y monitoreo para puentes de estas características, sin embargo, el contexto nacional demanda la implementación de pruebas de caracterización dinámica para la recepción de puentes y el uso de procedimientos de inspección más robustos para evaluar la respuesta dinámica de puentes. A nivel nacional, se requieren procedimientos para determinar la respuesta dinámica de puentes nuevos, o puentes que hayan sufrido deterioro estructural, con base en pruebas de vibración ambiental y pruebas de vibración forzada, por lo tanto, el grupo de enfoques presentados en este artículo constituyen un referente para la futura elaboración de protocolos de pruebas más acorde con las necesidades del país.

**Palabras claves**— Identificación modal, optima ubicación de sensores, puente segmental, pruebas dinámicas, vibración ambiental, vibración forzada.

## I. INTRODUCCIÓN

EN los últimos años el gobierno nacional ha impulsado la renovación de la infraestructura vial con inversiones en el programa de vías de Cuarta Generación (4G) apuntando a superar el rezago vial de las últimas décadas con la construcción 1500 km de vías de doble calzada y numerosos puentes para salvar grandes luces, algunos de ellos, de tipología viga cajón construidos por voladizos sucesivos fundidos “in situ”. La tabla 1 presenta algunos de los puentes de grandes luces de sección viga cajón construidos en los últimos años en Colombia. A partir de la tabla 1 se observa que la construcción de puentes aumenta a partir de 2010, impulsada por el programa de vías de 4G, donde predomina el uso de 2 carriles. Se puede inferir que la tipología de puente de voladizos sucesivos es dominante para luces entre 50 y 200 m con el 75% de los puentes presentados en la tabla 1. La tipología de puente atirantado es usada, en su mayoría, para luces mayores a 200 m donde se empiezan a presentar limitaciones constructivas para los puentes por voladizos sucesivos. La tipología de puentes construidos por voladizos sucesivos es propensa a presentar problemas de grandes deflexiones en el centro de luz que se manifiestan con paso de los años. Este tema de deflexiones excesivas ha sido estudiado por autores como [1]–[4] y dejan en manifiesto la incertidumbre que generan los modelos actuales para predecir fenómenos dependientes del tiempo como Creep (deformación por fluencia lenta del concreto) y Shrinkage (retracción del acero de refuerzo y postensado). La cantidad de puentes construidos en Colombia de esta tipología en específico y su inherente patología la sugiere como centro de estudio en esta investigación. Manterola [5] menciona que son varios parámetros que pueden servir para la clasificación de puentes como es el material, la luz y el proceso constructivo. De estos

This manuscript was sent on May 25, 2020 and accepted on June 28, 2021. This work is funded by Industrial University of Santander through the “Vicerector of research and extension (Project No 2700 of 2020)

W. A. Hernandez-Sierra is with the School of Civil Engineering, Industrial University of Santander, Santander, CO 680002 Colombia (e-mail: wilson2198182@correo.uis.edu.co).

A. Viviescas is with the School of Civil Engineering, Universidad Industrial de Santander, Santander, CO 680002, Colombia (e-mail: alviviija@uis.edu.co)

C. A. Riveros-Jerez is with the School of Engineering, Universidad de Antioquia, Antioquia, CO 050010 Colombia (e-mail: carlos.riveros@udea.edu.co)



parámetros, el más útil para la clasificación de puentes es la luz, la cual condiciona el proceso constructivo adecuado y la configuración de la sección transversal en función del material de construcción. En función de la luz, el autor afirma que la concepción de puentes de grandes luces aplica para luces mayores a 50 m, ya que esta distancia determina el tipo de proceso constructivo a utilizar.

El territorio colombiano está ubicado en una zona de alta complejidad geológica, lo que favorece la ocurrencia de sismos [6], erupciones volcánicas, movimientos en masa, entre otros. Estos fenómenos naturales han causado cuantiosas pérdidas económicas a nivel mundial, debidas principalmente al colapso de numerosos edificios y puentes. A raíz de esto, surgen dudas relacionadas con la salud de la infraestructura vial, por ejemplo, ¿De qué forma se puede evaluar el estado de su condición estructural y determinar la vida útil remanente? ¿Cómo se puede salvaguardar la inversión y tomar medidas correctivas después de un evento extremo?

El aumento del tráfico vehicular, las grandes cargas que circulan por el país, tanto en áreas urbanas como rurales, someten a mayores esfuerzos y deformaciones a los puentes de

lo que se contempló en la etapa de diseño del este. Para ello se necesita una forma confiable de evaluar la integridad estructural de los puentes, con el objetivo de mantener los puentes en operación continua, garantizando un adecuado nivel de servicio. El sistema de administración de puentes de Colombia (SIPUCOL) fue implementado en 1996 por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) [7] como una herramienta que permite realizar estudios en ingeniería estructural para conocer la capacidad de carga de puentes, analizar la factibilidad de otorgar permisos para el transporte de cargas extrapesadas y adoptar decisiones de limitaciones de carga en casos de deterioro [8]. Este sistema consta de valoraciones netamente cualitativas obtenidas de inspección visual donde únicamente los daños detectados están afectados por criterios subjetivos de quienes realizan las inspecciones. Este tipo de valoraciones tiene el gran problema de que los daños son detectados cuando están en un estado avanzado de afectación estructural [9] y en su gran mayoría, aplican para puentes relativamente antiguos, lo que plantea la siguiente pregunta ¿en puentes nuevos se puede aplicar el mismo sistema de inspección y evaluación?

Sin ir a edades tan avanzadas de uso, analizando el caso

TABLA I  
PUENTES DE GRANDES LUCES CONSTRUIDOS EN COLOMBIA

Ítem	Nombre Puente	Tipología de Puente	Número de Carriles	Vía Ubicación	Departamento	Luz Central [m]	Año
1	Puente Laureano Gómez	Atirantado	2	Barranquilla	Atlántico	140	1974
2	Puente Juanambú	Voladizos sucesivos	2	Popayán pasto	Nariño	90	1976
3	Puente Farallones	Voladizos sucesivos	2	Gama - Gachalá	Cundinamarca	142	1991
4	Viaducto Cesar Gaviria Trujillo	Atirantado	4	Dosquebradas - Pereira	Risaralda	211	1997
5	Puente Plato	Voladizos sucesivos	2	Plato - Zambrano	Magdalena - Bolívar	130	1997
6	Puente Pipiral	Voladizos sucesivos	2	Bogota - Villavicencio	Meta	125	2002
7	Puente Guillermo Gaviria Correa	Voladizos sucesivos	2	Barrancabermeja - Yondó	Santander - Medellín	200	2006
8	Puente Humea	Voladizos sucesivos	2	Cabuyaro	Meta	120	2009
9	Viaducto Helicoidal	Voladizos sucesivos	2	Pereira - Manizales	Risaralda - Caldas	50	2010
10	Puente Gilberto Echeverri Mejía	Atirantado	8	Medellín	Antioquia	108	2012
11	Puente Cajamarca	Voladizos sucesivos	2	Bogota - Buenaventura	Tolima	137	2012
12	Puente El Ramo	Voladizos sucesivos	2	Bucaramanga - San Vicente de Chucuri	Santander	90	2013
13	Viaducto Gualanday	Voladizos sucesivos	2	Girardot Ibagué	Tolima	128	2014
14	Puente Geo Von Lengerke	Voladizos sucesivos	2	Girón Betulia	Santander	155	2014
15	Viaducto Provincial	Atirantado	6	Bucaramanga	Santander	292	2015
16	Puente Pujamanez	Voladizos sucesivos	2	Bucaramanga - San Vicente de Chucuri	Santander	122	2015
17	Puente Mata de Cacao	Voladizos sucesivos	2	Bucaramanga - Barrancabermeja	Santander	180	2015
18	Puente El Tablazo	Voladizos sucesivos	2	Bucaramanga - San Vicente de Chucuri	Santander	186	2015
19	Viaducto La Unión	Voladizos sucesivos	5	Bucaramanga	Santander	111	2016
20	Puente Moravia	Voladizos sucesivos	2	Medellín	Antioquia	185	2016
21	Puente Madre Laura	Voladizos sucesivos	2	Medellín	Antioquia	84	2016
22	Puente Guillermo Gómez Ortiz	Voladizos sucesivos	2	Girón - Zapatoca	Santander	170	2013
23	Puente Roncador	Voladizos sucesivos	2	Yati - Bodega	Bolívar	160	2017
24	Puente Puerto Salgar	Voladizos sucesivos	2	Puerto Salgar - La Dorada	Caldas	180	2018
25	Viaducto Gualanday II	Voladizos sucesivos	2	Girardot Ibagué	Tolima	128	2018
26	Puente Alberto Pumarejo	Atirantado	6	Barranquilla	Atlántico	380	2019
27	Puente Hisgaura	Atirantado	2	Curos - Málaga	Santander	330	2019
28	Puente Honda	Atirantado	2	Puerto Bogotá - Honda	Tolima	248	2020

Fuente: Elaboración propia

puntual de puentes nuevos que aún no han sido puestos en funcionamiento, el código colombiano de puentes - CCP-14 en la sección 4.8.2 [10] “Análisis y Evaluación Estructural” afirma que: *“los puentes existentes se pueden instrumentar para obtener resultados bajo variadas condiciones de tráfico y/o efectos ambientales o ensayar bajo carga con vehículos de propósito especial para establecer los efectos de las fuerzas y/o la capacidad de carga del puente”*; de tal forma que se pueda validar el comportamiento estructural del puente construido respecto al modelo numérico planteado en etapa de diseño. El CCP-14 no indica cómo ejecutar las pruebas, ni menciona alguna normativa internacional en específico, en este caso se suele remitir a normativas internacionales como “Manual for Bridge Evaluation” [11], “Loading Test on Road Bridges and Footbridges” [12] y “Recomendaciones para la Realización de Pruebas de Carga de Recepción en Puentes de Carretera” [13]. El desarrollo de los anteriores documentos está centrado en determinar esfuerzos y deformaciones mediante pruebas de carga estáticas, dejando para casos especiales, y sin detallar a fondo, el enfoque de ejecución de las pruebas dinámicas. Como se verá más adelante, determinar las propiedades dinámicas del puente resulta ser un tema de gran interés, especialmente en zonas de amenaza sísmica como Colombia.

Los factores de riesgo presentados anteriormente, en cuanto a la amenaza sísmica analizado en conjunto con factores ambientales, un sistema de administración de puentes deficiente para la cantidad de variables a considerar en la evaluación de puentes, y la carencia de exigencia de la normativa nacional para evaluar y validar el comportamiento estructural de los puentes existentes respecto a las suposiciones iniciales de diseño, plantea la necesidad de desarrollar sistemas y planes de monitoreo de la salud estructural (SHM - Structural Health Monitoring) de los puentes basado en vibraciones con el fin de evaluar la condición estructural antes y después de la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud y estudiar el comportamiento estructural durante cualquier etapa de su vida útil para detectar anomalías que afecten su integridad o nivel de servicio. El objetivo de SHM, en términos generales, es la detección de cambios en las propiedades geométricas, de los materiales, incluyendo cambios en las condiciones de contorno y conectividad del sistema. Básicamente, el cambio en las propiedades dinámicas de la estructura en periodos de tiempo diferentes indica la presencia de daño, ya que la rigidez estructural está directamente relacionada con estos parámetros [14], [15].

La medición de vibraciones para la caracterización dinámica de puentes es uno de los métodos más usados para el monitoreo de salud estructural en los que se suelen emplear técnicas de vibraciones inducidas por excitaciones ambientales (AVT) o por fuerzas artificiales, conocidas como vibración forzada (FVT). La principal diferencia entre estas técnicas radica en la fuente de excitación, por ende, cada una presenta ventajas y limitaciones.

La selección de la fuente de excitación está intrínsecamente relacionada con la longitud de la luz central del puente. En general, las pruebas FVT se han aplicado en puentes de luz corta entre 30 y 40 m [16], [17] y las pruebas AVT en puentes

atirantados, colgantes [18], [19]. En sí, no hay un consenso claro de cual tipo de prueba arroja mejores resultados, ya que se deben considerar múltiples variables para evaluar la efectividad en la selección de cada una [20], en especial los costos de ejecución. Sumado a esto, la duración de las campañas experimentales para el registro vibraciones es otra variable que afecta la caracterización dinámica ya que esta depende de los recursos disponibles.

En algunos casos estas pueden durar varias horas y generar afectaciones a la movilidad de la zona y si se desea implementar mediciones periódicas del puente, es importante tener puntos de control lo cual conlleva a la búsqueda de ubicaciones optimas que aporten suficiente información en la prueba dinámica. La amenaza sísmica, las limitaciones existentes sobre los sistemas y procedimientos para la evaluación estructural de puentes en Colombia hacen que se requieran sistemas más rigurosos, robustos y que no sean subjetivos. Por esta razón, la aplicación de técnicas para el monitoreo de la salud estructural es una necesidad apremiante que requiere como insumo inicial, establecer una robusta línea base del puente considerando propiedades dinámicas, deformaciones, esfuerzos, variaciones de temperatura, la técnica de excitación modal a usar y la adecuada ubicación de equipos en el puente, entre otras variables.

En este artículo se analizan un conjunto de estudios nacionales e internacionales recientes y relevantes sobre la caracterización dinámica de puentes, investigación realizada con el objetivo de identificar las tendencias exitosas en la materia, especialmente para su aplicación a puentes viga cajón construidos por voladizos sucesivos, teniendo en cuenta que es la tipología dominante en el país para grandes luces y sobre la cual existen necesidades de investigación para generar conocimiento aplicado a la realidad nacional y garantizar el servicio adecuado de la infraestructura vial. Esto permitirá consolidar la línea de investigación en puentes de grandes luces del Grupo xxxxx, donde ya se han realizado varios trabajos previos en esta materia [21]–[24] pero que requieren su profundización a partir de experiencias exitosas especialmente internacionales. Inicialmente, se presenta un compendio de investigaciones relacionadas con la caracterización dinámica y ejemplos a nacional e internacional, para posteriormente plantear futuras líneas de investigación a fin de motivar el desarrollo de metodológicas para la adecuada caracterización dinámica en el país.

## II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para profundizar en el conocimiento de técnicas para ejecutar campañas experimentales para la caracterización dinámica principalmente con aplicación a puentes viga cajón de gran luz construidos por voladizos sucesivos y con base en las pautas enunciadas por [25], [26] se realizó un análisis bibliométrico siguiendo las etapas de planeación, ejecución de la revisión y reporte de los resultados. La selección adecuada de las palabras claves juega un rol importante en la calidad de la información obtenida. Teniendo en mente el objetivo trazado y las ideas base que permitieron formularlo, se tomaron palabras claves como: modal identification, bridges, dynamic test, forced vibration,

ambient Vibration y optimal sensor placement que fueron combinadas de tres formas. La figura 1 presenta las palabras claves y las combinaciones ingresadas en las bases de datos Scopus®, Web of Science® y Sciencedirect®

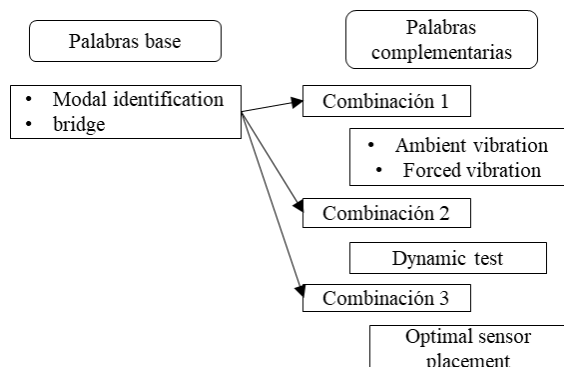


Fig. 1 Palabras clave usadas en la revisión de literatura.

Como criterio de inclusión se registraron documentos disponibles en dichas bases de datos en el intervalo de tiempo de 1990 y 2019 en los que se adjuntaron documentos catalogados como artículos de conferencia, revista, revisiones de literatura y libro donde predominó la selección de investigaciones en idioma inglés y español. Se excluyeron documentos que no tenían relación directa con las palabras clave base (modal identification, bridge). La tabla 1 muestra la cantidad de documentos identificados en cada base de datos por combinación antes de aplicar filtros de exclusión buscando eliminar registros duplicados y aquellos sin relación directa con el tema indagado. Alrededor del 5% de los registros hallados fue de utilidad para esta investigación. El software VOSviewer® fue usado para el posterior análisis como una herramienta para construir y visualizar redes bibliométricas en base a palabras clave, autores, revistas, año, citas compartidas o relaciones de coautoría entre otras

TABLA II  
CANTIDAD DE ARTÍCULOS EN FUNCIÓN DE PALABRAS CLAVE Y BASES DE DATOS

Comb	Base de datos	Número de artículos	Año
1	Scopus	66	1993-2018
	Web of Science	27	2001-2018
	Sciencedirect	2069	1996-2019
2	Scopus	37	1995-2017
	Web of Science	64	2002-2019
	Sciencedirect	469	1995-2019
3	Scopus	29	1996-2019
	Web of Science	42	2008-2019
	Sciencedirect	805	1996-2019

### III. PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DINÁMICA EN PUENTES

Las pruebas de carga de un puente son un conjunto de operaciones consistentes en la reproducción de uno o varios estados de carga con el objetivo de verificar que el comportamiento del puente ante ciertas situaciones de carga representativas de su vida útil se ajusta a las previsiones de diseño. Estas pueden ser inducidas por maquinaria especial como excitadores mecánicos, martillos de impacto, vehículos

que producen excitaciones controladas, que pueden ser cuantificadas o por el ambiente donde la fuerza, magnitud y frecuencia es aleatoria y desconocida [27]. Es importante considerar que para medir las vibraciones del puente se debe administrar una fuerza de excitación conocida y proporcional al tamaño del mismo [28], adicional a esto, en condiciones reales de campo es muy difícil realizar pruebas controladas ya que los factores ambientales como temperatura, viento entre otros influyen sobre la repetibilidad y aleatoriedad de las campañas experimentales realizadas. Las vibraciones pueden ser registradas con acelerómetros uniaxiales o triaxiales en función de la forma modal objetivo.

En general, el procedimiento estándar para realizar campañas experimentales usando acelerómetros consiste en arreglos de dos o más sensores ubicados sobre el tablero del puente dejando un sensor fijo de referencia y otros (dos o más) sensores que se desplacen a lo largo y ancho del tablero permaneciendo estáticos por un tiempo de ventana seleccionado por el diseñador de la prueba, luego esto, se desplazan a la siguiente posición; el procedimiento anteriormente descrito se puede encontrar en [29]. Durante las campañas experimentales es importante considerar la frecuencia de muestreo del sensor [30] y el tiempo de ventana de toma de datos de cada configuración [31]. El primer parámetro se relaciona con la cantidad de datos que registra el dispositivo por unidad de tiempo y es directamente proporcional con la frecuencia objetivo, es decir, a mayor frecuencia natural del sistema, mayor debería ser la frecuencia de muestreo. El segundo parámetro está estrechamente relacionado con la amplitud y frecuencia de la señal de entrada, en pruebas FVT el tiempo de ventana tiende a ser menor a razón del conocimiento de las características dinámicas de la fuente de excitación, en cambio, en pruebas AVT el tiempo es mucho más extenso debido a las frecuencias y amplitudes aleatorias y desconocidas de las fuentes naturales. Algunos autores recomiendan tiempos de ventana de datos superiores a 1000 veces el periodo fundamental de la estructura [31], aunque no siempre las condiciones de tiempo de ejecución total de la campaña experimental lo permiten. El documento [11] en el capítulo de inspección [32] enfatiza que: “*la línea base de la condición del puente debe ser establecida durante la inspección inicial y debe servir de base para futuras mediciones*”. Lo anterior no es tenido en cuenta en el CCP-14 [10]. De igual forma, [33] afirma que la ejecución de la prueba de carga dinámica puede complementar la prueba de carga estática en los requisitos de entrega de puentes nuevos.

#### A. Pruebas de vibración ambiental

Este tipo de pruebas hace referencia a las vibraciones producidas por el ambiente como microsismos, impacto de viento y oleaje, cargas antrópicas, tráfico vehicular aleatorio, entre otras fuentes de excitación. Los puentes están sometidos a excitación ambiental proporcionando un medio para evaluar la respuesta real del sistema en condiciones de operación. Las señales de entrada en vibraciones ambientales son consideradas como fuente ruido blanco estacionaria de entrada múltiple, con gran ancho de banda en el contenido de frecuencia, es decir, que el puente es excitado simultáneamente por una fuerza de gran

magnitud en múltiples puntos y el contenido de frecuencias es capaz de excitar cierto número de modos de vibración. Por lo general, las pruebas se pueden realizar sin interrumpir el funcionamiento normal del puente [20]. Este tipo de pruebas han sido ejecutadas en diversas tipologías de puentes, desde puentes viga losa [34], [35] hasta puentes atirantados [18], [36]. El método tiene la desventaja que la señal de vibración ambiental no es medida, o no puede ser medida, además la señal no constituye un ruido blanco, es decir, la magnitud no es constante en el rango de frecuencia de interés [28].

### B. Pruebas de vibración forzada

En este método el puente es excitado artificialmente por una fuerza ubicada en una zona específica del puente donde se mide la respuesta junto con la señal de entrada [31]. El método permite disminuir el efecto del ruido ambiental en la señal de respuesta, y se basa en la estimación de un conjunto de funciones de respuesta de frecuencia (Frequency Response Functions - FRF), donde se mide la respuesta en múltiples puntos en el puente. La selección e implementación de la fuente de excitación es de especial cuidado ya que se debe suministrar una fuerza de excitación proporcional al tamaño del puente. Esto representa la mayor limitación del método puesto que no todos los puentes se pueden excitar de forma artificial [27], [31]. Los procedimientos clasificados con base en la fuente de excitación para realizar pruebas de vibración forzada en puentes se describen en los siguientes párrafos. A pesar de que los documentos [11]–[13] abordan brevemente las pruebas de carga dinámicas, estas solo consideran el uso, en gran medida, de vehículos como fuente de excitación.

#### 1) Liberación de cargas - desplazamiento

Involucra la imposición de un desplazamiento en el puente, de tal forma que cuando la carga es liberada, el puente vibra y la respuesta puede ser medida. Se debe tener cuidado con la selección del sitio de liberación de cargas ya que generalmente son masas muy pesadas. La principal desventaja del método resulta en que los mecanismos para inducir desplazamiento son de alto costo y difíciles de instalar, y por lo general, solo se usa un punto de excitación por la dificultad de realizar la prueba [27], [28]. Un ejemplo sobre la aplicación de este método se encuentra en [18].

#### 2) Agitadores

También conocidos como vibradores o excitadores, estos pueden ser de dos tipos: rotación de masa excéntrica o electrohidráulicos. Los primeros generan la fuerza vibratoria mediante el uso de un eje giratorio que lleva una masa cuyo centro se desplaza del centro de rotación del eje. La máquina puede funcionar a diferentes frecuencias de rotación donde es importante controlar la velocidad de rotación para obtener resultados satisfactorios. Los vibradores electrohidráulicos pueden generar fuerzas más altas que los primeros. La fuerza se genera a través del movimiento inducido por el flujo a alta presión de un líquido. El sistema consiste en un actuador hidráulico que acciona una masa adjunta. Estos dispositivos producen golpes de vibración relativamente altos y permiten una excitación a diferentes respuestas en frecuencias de flexión y torsión. La magnitud de la fuerza aplicada se reduce con

el aumento de la frecuencia [37]. Para este tipo de pruebas se recomienda usar señales aleatorias o barrido senoidal. La principal desventaja radica en el alto costo de los equipos y la complejidad en el manejo de estos dispositivos mecánicos [28], [38].

#### 3) Impacto

El instrumento más común para aplicar impacto es mediante el uso de un martillo instrumentado o una masa suspendida para dar golpes. El impacto se puede variar cambiando la masa del dispositivo. Esta prueba es susceptible al ruido de entrada ya que la fuerza de entrada se aplica durante un corto periodo en comparación con la duración del registro. Es poco usada para evitar el daño local en el punto de contacto [39], [40].

#### 4) Carga vehicular controlada

Se puede clasificar como una prueba transitoria en donde la fuerza de entrada no suele medirse pero que se puede considerar como forzada [38]. Esta fuerza se aplica mediante un vehículo conducido sobre una superficie irregular. Particularmente la respuesta, en cuanto a vibraciones del vehículo, es un indicador de la comodidad de la conducción sobre la vía pero también puede ser usado para identificar las propiedades dinámicas [41]. La excitación del puente usando vehículos es una interacción compleja que involucra variables como el peso del vehículo, velocidad de circulación, características mecánicas del vehículo (presión de llantas, suspensión, amortiguamiento) estado físico de la superficie de rodadura, interacción vehículo-puente [42]. La interacción que genera el acoplamiento de frecuencias entre el vehículo y el puente es un fenómeno de gran importancia que afecta este tipo de pruebas. Tradicionalmente se pensaría que tanto las propiedades del material como las geométricas del puente y vehículo permanecen sin cambios durante la interacción, sin embargo, el sistema acoplado entre vehículo puente en los puntos de contacto hace que el sistema cambie a medida que se mueven los puntos de contacto con relación al puente [43]. Un factor clave en la variación de frecuencias es la relación de masas entre el vehículo y el puente, con relaciones de masa más altas se producen cambios en las frecuencias del puente.

Los autores [44] realizaron simulaciones numéricas y campañas experimentales usando varios vehículos cargados sobre un puente donde concluyeron que se pueden presentar cambios en la frecuencia fundamental de la interacción vehículo-puente dependiendo de la posición del vehículo. Los modelos numéricos indicaron que la magnitud de los cambios de los parámetros modales es más pronunciada con relaciones altas de masa vehículo-puente. [43] realizaron varias investigaciones para estudiar el comportamiento dinámico del puente usando camiones con diferentes propiedades de suspensión en los que mostraron que los vehículos de igual peso circulando a igual velocidad, pero con diferentes propiedades de suspensión causan desplazamientos en la frecuencia fundamental del puente.

Por lo tanto, los cambios de frecuencia no solo dependen de la masa del vehículo, sino también de las propiedades mecánicas de la suspensión del vehículo. [45] afirman que la rugosidad del pavimento no puede ser despreciada. Esto se puede relacionar directamente con el espesor de la capa

de pavimento, cuando este es menor; el puente vibra más y la comodidad disminuye. De igual forma, [39] encontraron que las velocidades altas no siempre son las que generan más vibraciones, pues este fenómeno se relaciona directamente con la rugosidad y el estado del pavimento. Desde el punto de vista dinámico, [39] indican que existen tres frecuencias que dependen de la velocidad de circulación y la longitud del vano como son la frecuencia natural del puente, la frecuencia natural del vehículo en movimiento y la frecuencia de perturbación.

#### IV. COMPARACIÓN ENTRE PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL Y VIBRACIÓN FORZADA EN PUENTES

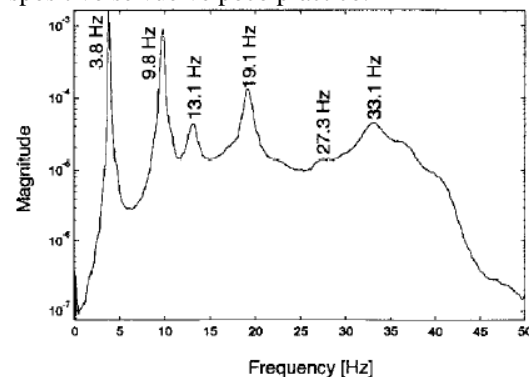
El monitoreo de vibración en puentes usando una fuente de excitación conocida tiene varias ventajas significativas sobre el uso de fuentes de excitación ambiental [46]. Así como el diseño de un esquema de instrumentación es importante para el desarrollo de planes de monitoreo estructural en el puente de interés, el diseño y selección de la fuente de excitación es muy importante con el fin de obtener información adecuada. Esto le permite al investigador tener más control sobre la fuente de excitación en cuanto al tipo de onda, amplitud, contenido de frecuencia, duración entre otros. El uso de una fuente de vibración forzada reduce la probabilidad de incertidumbre en la recopilación y procesamiento de datos, de igual forma, el hecho de poder manipular la magnitud y frecuencia de la fuente de excitación permite que esta se pueda diseñar para que sea significativamente más alta que los niveles de ruido ambiental. Los anteriores factores pueden generar ventajas importantes sobre las pruebas de vibración ambiental, en cuanto a la calidad de los resultados obtenidos (frecuencias naturales, formas modales, amortiguamiento), pero conllevan un costo financiero adicional en función del dispositivo mecánico a usar. Las pruebas de vibración ambiental a menudo usan fuentes naturales para excitación estructural. Son diversas las razones para el uso de excitación ambiental pero las preponderantes son el bajo costo total de la campaña experimental, poca o ninguna interrupción del tráfico. El hecho que no se pueda medir ni controlar la fuente de excitación es la principal limitación del uso de pruebas de vibración ambiental ya que el contenido de frecuencias, magnitud, duración y dirección son variables en el tiempo, difíciles o imposibles de cuantificar. Uno de los primeros intentos por comparar las campañas experimentales usando pruebas de vibración ambiental y forzada fue reportado por [29] utilizando las investigaciones realizadas en el puente Z24 en Suiza. En su investigación, [23] presentan metodologías para la ejecución de campañas de vibración ambiental con sensores de referencia y otros dispositivos móviles a lo largo del tablero. Para realizar las pruebas FVT, usan vibradores electrohidráulicos como fuente de excitación. [23] comparan los costos de ejecución, requisitos logísticos y limitaciones más influyentes de cada método. En cuanto a los costos para el experimento documentado, establecen que las pruebas FVT son 72 veces más costosas que las pruebas AVT, y que los métodos y equipos empleados solo pueden ser usados en puentes similares al de estudio. En cuanto a las pruebas AVT, [23] afirman que el hecho que se desconozca la magnitud de la

excitación, y que esta varíe entre una configuración y otra, puede conducir a modos mal definidos o no identificados. Para finalizar, los [23] comentan que las conclusiones allí registradas solo pueden ser aplicadas a la tipología de puente estudiada.

Continuando con las investigaciones en el puente Z24, [40] ejecutaron pruebas FVT y AVT usando como fuente de excitación artificial la caída de objetos para generar impactos y excitaciones ambientales, respectivamente. El puente fue instrumentado en 58 puntos con registros de aceleraciones verticales. El objeto pesado se dejó caer en un único punto durante 4 veces registrando vibraciones alrededor de 82 s., con lo cual lograron identificar 6 formas modales con picos de frecuencias bien definidos. Con respecto a las pruebas AVT, conservaron igual ubicación de sensores y registraron datos durante 655 s., mediante el procesamiento de las señales, identificaron 4 formas modales con picos de frecuencia distorsionados como se puede apreciar en la figura 5.

[40] encuentran una marcada diferencia entre las formas modales y espectros de frecuencia entre ambos métodos, puesto que los modos identificados usando FVT son más “suaves” y “consistentes”, que los identificados usando AVT. Una posible explicación a la diferencia de calidad en los resultados radica en la fuente de excitación. Además, para las pruebas realizadas, [34] lograron identificar más formas modales usando FVT que AVT. Como observación adicional, [34] comentan que los resultados de las pruebas AVT posiblemente pueden mejorarse con tiempos de ventana más extensos.

[20] presentan un resumen de los diversos métodos y dispositivos que hasta esa fecha se habían documentado, investigado y utilizado para la excitación de puentes durante pruebas dinámicas. [20] comentan que, en general, las pruebas FVT son viables para uso en puentes pequeños (luz corta) y en el caso de puentes de gran luz como atirantados o colgantes, la única excitación posible corresponde a la ambiental debido a que la capacidad de introducir energía significativamente alta al puente, en especial en frecuencias altas, mediante el uso de algún dispositivo se vuelve poco práctico.



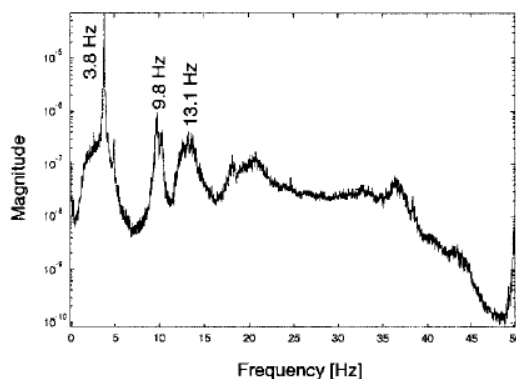


Fig. 2 (a) Espectro de frecuencia FVT (b) Espectro de frecuencia AVT  
Fuente: [40]

Al igual que los anteriores autores ([29], [40]), afirman que la principal desventaja de las pruebas AVT es que no se puede cuantificar la excitación de entrada o determinar qué tan uniforme en el contenido de frecuencias es esta señal. [20] presentan algunos ejemplos de investigaciones en diversas tipologías de fuentes con las que pueden concluir que en cada investigación documentada se evidencian atributos y dificultades asociadas a cada método y que no es posible tener un consenso claro de cual método es mejor, pero que en puentes de grandes luces, la excitación ambiental es el método más práctico para excitar el puente. En años recientes, [31] presenta una revisión de literatura en cuanto a la definición de cada método, y presentan investigaciones en las que han sido aplicados. Como en los anteriores párrafos, [25] presenta conclusiones similares asociadas a que en las pruebas FVT se puede conocer la señal de entrada, se tiene mayor control en la campaña experimental, son más costosas comparadas con AVT y en general, se ejecutan en puentes relativamente pequeños. En cuanto las pruebas AVT, [25] comenta que estas se pueden realizar sin interrumpir el normal uso del puente, son ampliamente usadas en puentes de grandes luces, y que su principal limitación radica en la falta de estacionariedad de la señal de entrada.

## V. PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE VIBRACIÓN

El procesamiento de la información es un paso crítico destinado a la mitigación de errores y la estimación de los parámetros modales [47]. El procesamiento de las señales se puede realizar mediante diversos métodos disponibles, generalmente se pueden clasificar en el dominio de la frecuencia o el dominio del tiempo [48]. Los métodos en el dominio de la frecuencia calculan las matrices del espectro medio de las respuestas dinámicas medidas. Estos métodos pueden ser paramétricos o no paramétricos. Los métodos en el dominio de la frecuencia no paramétricos son más sencillos de ejecutar. Comprende técnicas como selección de picos (PP – Peak Picking), el método de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD – Frequency Domain Decomposition) y el método de descomposición en el dominio de la frecuencia mejorado (EFDD – Enhanced Frequency Domain Decomposition). Por otra parte, la identificación paramétrica en el dominio del tiempo se realiza ajustando un modelo modal o

un modelo de denominador común [49], desde donde se extraen los parámetros modales. Se pueden encontrar métodos como la técnica de excitación natural (NExT – Natural Excitation Technique) y la técnica de identificación en el subespacio estocástico (SSI – Stochastic Subspace Identification). Diversas investigaciones relacionadas con la caracterización dinámica de puentes han comparado cuantitativa y cualitativamente las técnicas antes mencionadas [16], [50]–[57] y han encontrado que las técnicas paramétricas en el dominio del tiempo dan mejores resultados en términos de propiedades dinámicas que aquellos métodos en el dominio de la frecuencia.

### 1) *Peak Peaking PP*

Es el método básico en el dominio de la frecuencia, posiblemente el método de identificación más sencillo, útil, rápido y práctico. Las frecuencias modales se identifican en los picos en la gráfica resultante. Este método da buenos resultados solo cuando la señal de entrada al sistema sea de ruido blanco no correlacionado, es ampliamente usado en pruebas de AVT [47].

### 2) *Frequency Domain Decomposition FDD*

Se mejora el método PP mediante el desarrollo de la descomposición en valores singulares de la matriz de respuesta espectral de tal manera que se llega a tener un conjunto de sistemas de un solo grado de libertad. Permite elegir los modos de interés localizando los picos en los gráficos de descomposición de los valores singulares; y se basa en el uso de una línea de frecuencias del análisis de la transformada rápida de Fourier [58].

### 3) *Enhanced Frequency Domain Decomposition*

Es un método mejorado de FDD que permite la estimación del amortiguamiento modal por medio del decaimiento de la función de autocorrelación que es evaluada usando la transformada inversa de Fourier a la densidad espectral de potencia de un sistema de un grado de libertad. Este obtiene la frecuencia natural determinando el número de cruces en cero de la función en el dominio del tiempo [47].

### 4) *Subspace System Identification*

Es un método en el dominio del tiempo. Los métodos paramétricos en el dominio del tiempo consideran la selección de un apropiado modelo matemático para idealizar el comportamiento dinámico del puente. Estos métodos pueden ser directamente aplicados con la respuesta en el tiempo de la vibración o alternativamente con funciones de correlación de la respuesta. Un aspecto interesante de identificación modal usando señales de solo salida (AVT) basada en el ajuste de funciones de correlación de respuesta, es la posibilidad de usar métodos que se derivan de los métodos clásicos de identificación modal de entrada y salida [59].

## VI. ÓPTIMA UBICACIÓN DE SENSORES

Radica su idea en encontrar una ubicación adecuada que brinde la mayor información posible reduciendo costos en equipos y duración de experimento, a menudo es un problema común cuando se habla de sistemas de monitoreo estructural por vibraciones, es considerado como un desafío para la

identificación de daños pues una caracterización precisa de los parámetros modales permite calibrar adecuadamente los modelos de elementos finitos previos. Esta técnica se puede usar de manera eficiente en planes de SHM eliminando datos de sensores redundantes, ya sea limitando la cantidad de sensores o ubicándolos en puntos de gran suministro de información, esto ayuda a reducir el volumen final de datos a procesar [60]. La ubicación efectiva del sensor para SHM depende de varios factores como la fuente de excitación, el objetivo global del sistema de monitoreo, es decir, que se pretende medir, y en el caso de vibraciones, las formas modales de interés [61]. En general los modos objetivo se seleccionan de estudios preliminares basados en modelos numéricos o pruebas de campo anteriores, proporcionando pruebas de campo que se pueden optimizar en función del número de sensores disponibles. Para optimizar estas ubicaciones se debe identificar exactamente el número mínimo de sensores que permiten caracterizar los modos de interés. En resumen, el objetivo de la óptima ubicación de sensores es minimizar el número de sensores y ubicarlos adecuadamente para obtener una estimación adecuada de las formas modales de interés. Algunas de las técnicas más usadas para la determinar la óptima ubicación de sensores se pueden encontrar en [61], [62] siendo de amplio uso el Método de Independencia Efectiva (EI), este fue desarrollado por [63] para buscar las mejores ubicaciones de sensores de  $N$  número de dispositivos. La matriz de información Fisher asociada con ubicaciones de detección candidatas se evalúa para los modos objetivos y luego se utiliza para maximizar la independencia espacial al clasificar la contribución de cada ubicación de detección.

## VII. CASOS DE ESTUDIO DE USO DE PRUEBAS DINÁMICAS EMPLEANDO AVT-FVT

### A. Pruebas de vibración ambiental

Las pruebas AVT se han ejecutado en diversas tipologías y dimensiones de puentes. En los siguientes párrafos se describen algunos de estos ejemplos, mostrando así, la versatilidad y utilidad de las pruebas AVT en las diversas tipologías de puentes. En 1998, [64] realizaron pruebas dinámicas en un puente simplemente apoyado de varios vanos de 20 m luz cada uno al norte de Italia bajo la excitación de cargas de tráfico.

Los datos fueron procesados usando la técnica de identificación Wavelet (WET). Previamente [58] realizaron simulaciones en un modelo numérico considerando la rigidez de la suspensión y neumáticos como sistemas de varios grados de libertad. Del procedimiento desarrollado [58] extrajeron datos de aceleración en diferentes puntos para simular las condiciones de la prueba. Finalmente, [58] ejecutaron pruebas en el puente con 9 puntos de medición sobre el tablero usando un sistema de adquisición de datos de 6 canales. El tiempo de medición fue de 16 s., con una frecuencia de muestreo de 128 Hz para la configuración de sensores. [58] lograron identificar 5 frecuencias naturales con sus respectivas formas modales. [58] concluyen que las pruebas dinámicas usando vibraciones ambientales son efectivas, aunque no se tenga el conocimiento exacto de la fuente de excitación; lo que muestra así, la utilidad

de las pruebas AVT en puentes de pequeña luz. Investigaciones semejantes sobre puentes de tipología de viga losa simplemente apoyados se encuentran documentadas en [55]-[57].

Un puente en arco metálico sobre el río Tennessee de 163 m de luz principal y 643 m de longitud total fue estudiado por [54], usando pruebas AVT inducidas por tráfico y viento, con el objetivo de comparar los correspondientes resultados modales con los obtenidos mediante modelos numéricos. Las investigaciones tenían como objetivo validar el uso de dos técnicas para el procesamiento de datos, PP y SSI. [48] usaron 3 acelerómetros triaxiales con 30 puntos de medición, 15 en cada costado del tablero ubicados cada  $L/14$  de la luz principal. La frecuencia de muestreo fue 1000 Hz y el tiempo de toma de datos fue de 60 s. [48] encontraron buen ajuste en frecuencias, y sus correspondientes formas modales, las cuales fueron halladas con ambos métodos, sin embargo, el método SSI proporcionó, según [48], formas modales más claras que las formas modales obtenidas mediante el método PP. Con respecto al tiempo de medición, [48] mencionan que normalmente los tiempos de ventana son de 10-15 minutos, pero recomiendan reducir el tiempo para agilizar las campañas. Con el tiempo usado [48] lograron identificar la mayoría de las formas modales importantes teniendo en cuenta que tomaron 1000 datos por segundo. Campañas experimentales en esta tipología de puentes se encuentran documentadas en [68].

El puente colgante Jiangyin (Fig. 3) en China fue objeto de estudio por investigadores de Reino Unido y China [19] con el objetivo de realizar pruebas de vibración antes de la puesta en servicio del puente. Debido a la gran luz central del puente (1385 m), realizar las pruebas representaba un desafío para la instrumentación debido al rango de frecuencias, resolución y longitud a instrumentar. Para esto, [19] desarrollaron un sistema de sensores autónomos sincronizados con precisión, sin uso de cables o comunicación GPS. El ejercicio consistió en la planificación de una campaña de prueba para optimizar la confiabilidad del análisis modal operativo con el objetivo de identificar parámetros modales con bajas frecuencias propios de esta tipología de puente. Para ejecutar las mediciones usaron 15 acelerómetros uniaxiales ubicados cada  $L/22$  en la luz central. Las mediciones se realizaron en 3 días consecutivos utilizando 12 configuraciones de sensores, y con una duración de 60 minutos. cada configuración. Los investigadores lograron identificar 20 formas modales, la menor frecuencia detectada fue 0.05 Hz y la mayor 0.61 Hz.



Fig. 3 Puente Jiangyin sobre Río Yangtze  
Fuente: [19]



Una investigación similar fue ejecutada por [69] en el puente colgante Humber en Reino Unido, con el fin de determinar las características de vibración vertical, lateral y torsional del tablero y las torres del puente usando vibraciones ambientales. Las señales de vibración fueron procesadas usando el algoritmo de transformación discreto de Fourier. Luego, en 2010, de nuevo este puente fue instrumentado y analizado por [70], en esta ocasión los datos registrados fueron procesados usando métodos paramétricos en el tiempo como NExT, SSI. Esta investigación es de las primeras desarrolladas en puentes colgantes de gran luz con el fin de evidenciar las bondades de las pruebas de vibración ambiental para determinar de forma confiable parámetros modales.



Fig. 4 Vista Puente Eduardo Torroja  
Fuente: [71]

La figura 4 muestra el puente Eduardo Torroja (España), construido en sección compuesta de 43 m de luz principal, fue analizado dinámicamente por [71] con el fin de desarrollar una metodología que permitiera una configuración experimental rentable utilizando un número reducido de sensores, con el objetivo de implementar planes de monitoreo de la salud estructural a largo plazo. Previo a las campañas experimentales, los autores realizaron un modelo numérico en elementos finitos utilizando el software ANSYS con el objetivo de obtener información modal de referencia. Para las campañas experimentales usaron 36 acelerómetros ubicados a distancias iguales en la dirección longitudinal y transversal, identificando 8 frecuencias naturales con sus correspondientes formas modales. Las señales registradas fueron procesadas usando la técnica EFDD y SSI, implementadas en el software ARTeMIS©. Posteriormente, aplicando la técnica EI, lograron reducir la cantidad de sensores, a solo 4 posiciones donde demostraron que los parámetros modales identificados, para estas 4 posiciones optimizadas, dan resultados similares a los obtenidos con las campañas experimentales de 36 acelerómetros.

En el contexto nacional, el viaducto atirantado Cesar Gaviria Trujillo (Colombia), mostrado en la figura 5 y con luz central de 210 m fue caracterizado dinámicamente por [72] con el fin de realizar un análisis de vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga del puente. Se realizaron ensayos geofísicos, pruebas de carga estática y dinámicas entre otros ensayos y se desarrollaron modelos numéricos en elementos finitos utilizando el software de análisis estructural SAP2000©.



Fig. 5 Viaducto Cesar Gaviria Trujillo  
Fuente:[72]

El puente fue instrumentado con 3 acelerómetros ubicados en el eje vertical de cada torre, para una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Los datos fueron procesados usando técnicas en el dominio de la frecuencia y el tiempo como PP, FDD, EFDD, SSI. Los estudios y análisis de resultados permitieron estimar que varios de los tirantes del puente tenían niveles de tensiones mayores a las admisibles especificadas en la etapa de diseño; lo que mostró la utilidad de este tipo de estudios, siendo esta investigación pionera en puentes atirantados en Colombia. Investigaciones similares usando pruebas de AVT fueron realizadas por [73], [74].

El puente Guillermo Gómez Ortiz (Colombia) de sección viga cajón construido por voladizos sucesivos de 170 m de luz central y ancho de carril de 11 m con 2 carriles de circulación, fue instrumentado por [21] con el objetivo de realizar pruebas AVT cuyos resultados de parámetros modales sirvieron de insumo inicial para la calibración del modelo numérico en elementos finitos. La información recolectada por los sensores triaxiales de fuerza balanceada empleados fue procesada usando el software ARTeMIS© con la técnica EFDD. La investigación desarrollada por [69] fue pionera en el estudio de propiedades dinámicas en puentes de sección viga cajón construidos por voladizos sucesivos en Colombia. [69] identificaron formas modales en la dirección transversal del puente y afirman que *“el paso de vehículos en el puente fue poco frecuente, lo cual, combinado a la gran rigidez del puente estudiado, dificultó la identificación de modos de flexión”*. A razón de esto, los autores recomendaron el uso de métodos de vibración forzada para identificar otras formas modales en este tipo de estructuras como ser traslación longitudinal y flexión vertical.



Fig. 6 Puente Guillermo Gómez Ortiz  
Fuente:[21]

Con posterioridad, [22] realizaron la identificación modal de dicho puente usando los registros de aceleraciones de la malla

densa de ubicación de sensores usada por [21]. Los autores utilizaron el método EI para obtener la óptima ubicación de sensores, tomando registros de señales en posiciones cercanas con el objetivo de procesar los datos de algunos puntos seleccionados, estos fueron procesados usando una técnica en el dominio del tiempo conocida como ERA-OKID-O; el objetivo de la investigación fue realizar comparaciones con los resultados de identificación modal presentados por [65]. Los resultados de dicha comparación muestran que con un número reducido de sensores se obtiene buena correlación respecto a los resultados dinámicos experimentales de malla densa y el modelo dinámico de elementos finitos preliminar del puente desarrollado por [65].

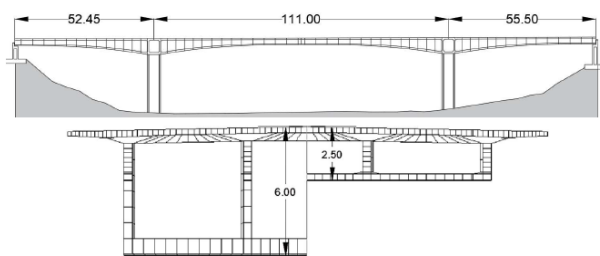


Fig. 7 (a) Perfil Viaducto La Unión (b) Sección transversal puente  
Fuente: [24]

El viaducto La Unión construido por voladizos sucesivos en la ciudad de Bucaramanga (Colombia), se compone de una sección viga cajón tricelular de 22.5 m (5 carriles) y 110 m de luz central, fue instrumentado por [24] en dos etapas constructivas, definidas antes de conectar el segmento final en el centro de luz y después de conectar el segmento final y estribos pero antes de la apertura al tráfico (Fig. 7). Las señales obtenidas fueron procesadas usando el método EFDD implementado en el software ARTeMIS©, [71] determinaron los parámetros modales del puente para las diferentes etapas de construcción. Estos parámetros fueron comparados con los obtenidos del modelo de elementos finitos considerando diferentes escenarios de cargas de construcción. Los resultados obtenidos por [71] demostraron la necesidad de instaurar un control riguroso durante la construcción de puentes en lo relacionado a cargas muertas, vivas, propiedades mecánicas de los materiales con el objetivo de calibrar efectivamente los modelos FEM.

Estudios similares de caracterización dinámica de puentes de sección viga cajón construidos por voladizos sucesivos se pueden encontrar en [57], [67], [75]. Diversos métodos para la óptima ubicación de sensores han sido aplicados en varias tipologías de puentes y algunos de estas implementaciones se pueden encontrar en [20], [69]-[72]. Estas investigaciones muestran la versatilidad de aplicación de las pruebas AVT en puentes de diversas tipologías y tamaños de luz central, desde puentes viga losa de luz corta hasta puentes colgantes. Es importante recalcar que a nivel nacional la tipología de puentes de sección viga cajón construido por voladizos sucesivos ha sido poco estudiada y documentada a pesar de ser la tipología dominante para puentes de grandes luces en Colombia. Investigaciones desarrolladas en estos puentes a nivel nacional

se encuentran en [65]-[67].

## B. Pruebas de vibración forzada

Como se mencionó en la sección III.B, hay varios procedimientos desarrollados para FVT en función de la fuente de excitación que se pueden emplear en puentes. En los siguientes párrafos se describen algunas investigaciones usando distintas fuentes de excitación en diversas tipologías de puentes a razón de evidenciar la fuente de excitación en función de la luz del puente. En 1997, [37] realizó pruebas de vibración forzada antes y después de la instalación de la nueva carpeta asfáltica en un puente de concreto con el objetivo de evaluar la respuesta dinámica incluyendo los efectos de las reparaciones en el puente Holway Road de 18.2 m de luz central [37] compararon formas modales antes y después del cambio de la superficie de rodadura. El sistema de excitación artificial del puente se hizo con un vibrador hidráulico de fuerza vertical. [31] usaron 4 acelerómetros uniaxiales ubicados en los bordes externos de la vía, ubicando el vibrador cerca al centro de la sección transversal del puente. [31] tomaron 58 puntos de medición ubicados cada  $L/10$  con mediciones de 10 minutos cada una. Las señales de vibración fueron procesadas usando las funciones de respuesta en frecuencia (FRF) calculando la transformada discreta de Fourier en las señales de entrada.

[31] lograron identificar 10 frecuencias naturales y sus correspondientes formas modales. Los resultados encontrados indicaron que la rigidez vertical, considerando el nuevo rodamiento, no era tan alta como se esperaba inicialmente, y adicionalmente se observaron cambios máximos entre frecuencias y amortiguamiento con valores de 4 y 21%, respectivamente. Varias investigaciones, con fines similares al descrito anteriormente, usando vibradores hidráulicos, se pueden encontrar en [73]-[76]. Investigadores de la Wroclaw University of Technology (Polonia) [84] desarrollaron un vibrador de masa excéntrica rotacional capaz de generar fuerzas de vibración de 3 a 30 Hz. El dispositivo fue puesto a prueba en un puente de viga losa de 30 m de luz para el paso del ferrocarril, donde se compararon los resultados dinámicos con los obtenidos en pruebas AVT y el paso de tráfico pesado (Tren a velocidad constante). Los datos de aceleraciones fueron procesados por un programa desarrollado por los autores usando PP, Circle Fit y Line Fit como métodos en el dominio de la frecuencia. [81] concluyen que el dispositivo, en comparación con los otros métodos de excitación, da mejores registros de señal ya que el dispositivo puede ser controlado y la fuerza generada es significativamente mayor que la ambiental. Al ser un excitador de bajo peso tiene la ventaja que se puede transportar con facilidad, aunque aclaran que el método propuesto se puede usar como prueba de carga en un puente estándar como el estudiado. Otra investigación documentada usando un excitador de masa excéntrica se puede encontrar en [85].



Fig. 8 Vista General de puente ferroviario con dispositivo de excitación  
Fuente: [84]

Un puente de sección viga cajón construido por voladizos sucesivos con 85 m de luz central en China fue estudiado por [17] para observar la evolución de la deflexión en puentes en servicio (Fig. 9). Para esto ejecutaron pruebas dinámicas con un dispositivo mecánico de impacto diseñado por los autores, pruebas de impacto usando un martillo convencional, y pruebas estáticas con vehículos pesados. Para ejecutar las pruebas, [17] usaron 25 acelerómetros con una frecuencia de muestreo de 1000 Hz, instalados cada  $L/8$  de la luz central, el dispositivo mecánico se ubicaba en distintas partes sobre el tablero. Estos datos fueron procesados con un algoritmo desarrollado por los autores en MATLAB© usando funciones de respuesta en frecuencia (FRF). Los resultados obtenidos por [17] mostraron que con el dispositivo desarrollado se obtienen mejores resultados que las pruebas del martillo convencional, puesto que este generaba una fuerza de impacto 5 veces mayor que el tradicional. Adicionalmente, [17] encontraron que las deflexiones estimadas con el dispositivo desarrollado tenían mejor concordancia con las deflexiones obtenidas de las pruebas estáticas. Se han desarrollado investigaciones con el fin de caracterizar la respuesta dinámica de puentes peatonales [86] y metálicos [39] utilizando dispositivos de impacto.

El puente ferroviario en arco Alcácer do Sal (Portugal) de 160 m de luz central, fue analizado por [87] utilizando pruebas dinámicas por un grupo de personas saltando sobre el tablero de forma aleatoria, únicamente en un vano en el acceso norte de 45 m. La aplicación de cargas externas de impacto aleatorio fue decisiva para el éxito de la identificación modal, ya que permitió mejoras significativas en la relación señal/ruido, por lo tanto, un aumento en la coherencia de las señales. Se instalaron 26 acelerómetros piezoeléctricos ubicados cada  $L/10$  en la luz central sobre los tabiques de la sección con periodos de toma de datos de 6 min a 256 datos por segundo, los datos de aceleraciones obtenidos de las pruebas fueron procesados usando el software ARTeMIS © utilizando la técnica EFDD.



Fig. 9 (a) Puente de estudio (b) Dispositivo de impacto desarrollado

Adicionalmente, [84] realizaron pruebas dinámicas con un tren de alta velocidad (220 km/h) para medir desplazamientos, deformaciones y aceleraciones. Los resultados modales identificados mostraron buena correlación con el modelo numérico desarrollado previamente.

El puente atirantado “Ponte sull’Adige” de 310 m de luz central, en el norte de Italia (Fig. 10), fue estudiado por [88] mediante pruebas dinámicas usando vehículos pesados a velocidades constantes, y con una serie de obstáculos rectangulares igualmente espaciados. Las vibraciones inducidas fueron registradas por acelerómetros. La posición, la distancia entre obstáculos, y velocidades del vehículo se seleccionaron con base en un modelo numérico de elementos finitos. El vehículo pesaba 40 Ton circulando a velocidades entre 5 y 35 km/h, los resaltos tenían 400 mm de base por 30 mm de alto espaciados cada 15 m. La frecuencia de muestreo fue 100 Hz con tiempos de ventana de datos de 240 a 400 segundos. Los datos recolectados fueron procesados usando técnicas como método exponencial complejo de número cuadrados (LSCE) y la técnica de disminución aleatoria (RDT). Los autores lograron identificar 4 formas modales de flexión y 2 modos torsionales. [85] concluyeron que el sistema de pruebas implementado fue efectivo para proporcionar una cantidad adecuada de energía al puente en el rango de frecuencias de interés. Las pruebas dinámicas realizadas en esta tipología de puentes atirantados, en aras de identificar propiedades dinámicas o factores de amplificación dinámica, han sido reportadas por [89], [90], en donde se destaca el uso de camiones pesados circulando a ciertas velocidades atravesando resaltos dispuestos sobre el tablero.



Fig. 10 (a) Vista aérea puente “Ponte sull’Adige” (b) Vehículo pasando sobre resaltos en tablero.  
Fuente: [88]

Para estudiar el comportamiento dinámico de un puente de varias luces, sometido a cargas vehiculares considerando el acoplamiento entre las vibraciones del vehículo-puente, los investigadores [45] simulaban pruebas dinámicas en el modelo numérico del puente sobre el Río Fusui Songhua (Fig. 11), el puente corresponde a la tipología de sección viga cajón construido por voladizos sucesivos de múltiples vanos y con una longitud total de 1170 m. Estas pruebas fueron realizadas en el software ANSYS©, mediante la circulación de un camión de 3 ejes cargado con 35 Ton, transitando con velocidades entre 5 y 50 m/s, con el objetivo de determinar la influencia de la rugosidad del pavimento y la velocidad del camión en la capacidad de carga dinámica del puente. [45] concluyeron que la rugosidad del pavimento es un parámetro fundamental que afecta la respuesta dinámica del puente al que se le debe prestar

atención en planes de mantenimiento y que la velocidad crítica en la respuesta dinámica no siempre es la más alta, los picos altos de vibraciones se registran en velocidades de 15 m/s.



Fig. 11 (a) Vista general puente (b) Vehículo de prueba modelado  
Fuente: [45]

El puente Conegliano construido en concreto postensado de vigas curvas con 15 vanos con sección cajón variable y sistema de aislamiento sísmico con luz entre apoyo promedio de 31.5 m, fue sometido a pruebas dinámicas por [33] con el fin de desarrollar un programa de monitoreo dinámico de puentes en Italia. [27] ejecutaron pruebas dinámicas con cargas de tráfico con el objetivo de extraer los primeros modos de vibración. El puente fue instrumentado utilizando 35 canales individuales, 7 canales triaxiales, y 7 canales biaxiales con frecuencias de muestreo de 200 Hz. Los camiones circulaban a una velocidad máxima de 40 km/h. Previamente los autores habían ensamblado un modelo numérico en elementos finitos en SAP2000©. Los registros de aceleraciones obtenidos fueron procesados en el software ARTeMIS© usando los métodos FDD y EFDD, la información obtenida sirvió de base para la calibración del modelo numérico. [91] realizó pruebas de confiabilidad estructural en el puente vehicular de sección cajón rectangular simplemente apoyado de 18 m de luz principal, ubicado en la provincia Ferrara (Italia). [88] comparó la respuesta estructural y los costos de pruebas estáticas y dinámicas. Las pruebas estáticas fueron realizadas con 4 camiones pesados de 36 Ton cada uno. En la prueba de carga dinámica se utilizaron acelerómetros colocados en la viga principal con el objetivo de medir las frecuencias de vibración después de un impulso producido por un vehículo de 2 Ton circulando a 30 km/h. La prueba dinámica permitió la obtención de un modelo refinado del puente en elementos finitos. La comparación mostró que la prueba de carga dinámica puede complementar la prueba estática en los requisitos de entrega de puentes nuevos, o ser una alternativa para el monitoreo de puentes en operación.

El uso de las diversas fuentes de excitación está supeditado a la configuración estructural del puente. Según la información obtenida, se puede inferir que los dispositivos mecánicos tienen un rango de aplicación en luces menores a 100 m, para luces mayores, el uso de camiones pesados circulando a velocidad constante sobre el tablero ha dado resultados confiables en la obtención de las propiedades dinámicas de puentes.

### VIII. EL CASO COLOMBIANO

Como se mencionó en párrafos anteriores, el territorio colombiano es propenso a sufrir eventos extremos como sismos o deslizamientos de tierra que pueden afectar en gran medida la

conectividad del país. En vista de que estas situaciones no pueden ser predichas por el hombre, queda como labor pendiente el desarrollo e implementación de estrategias para salvaguardar los puentes y su inherente inversión económica.

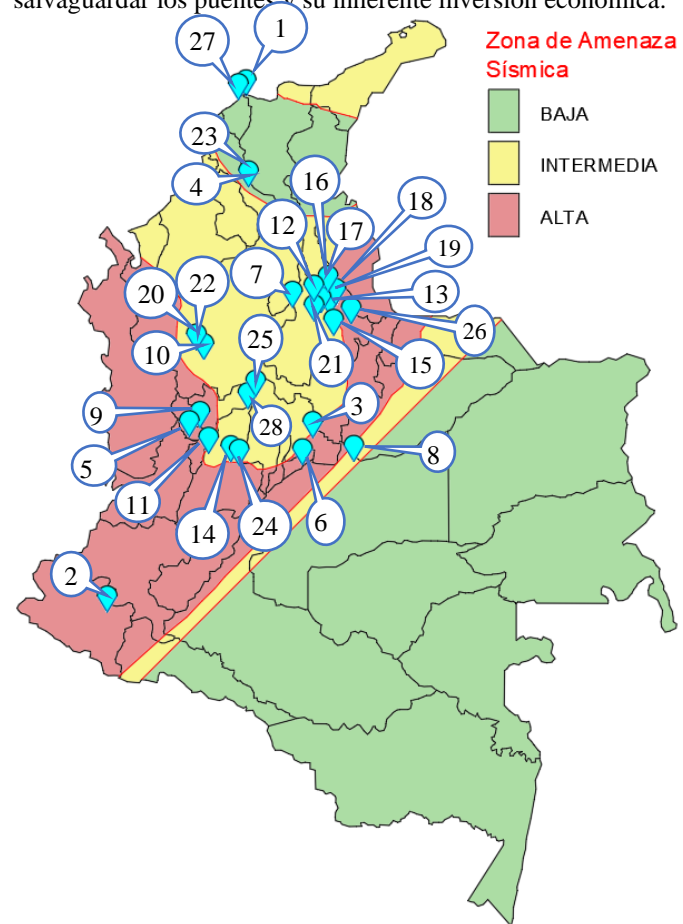


Fig. 12 Ubicación esquemática sobre las zonas de amenaza sísmica de Colombia de los puentes mostrados en la Tabla 1  
Fuente: Elaboración propia

La tabla 1 presenta 28 puentes de luz mayor a 50 m, predomina la tipología de sección viga cajón construidos por voladizos sucesivos, y tan solo 3 puentes de ese grupo han sido estudiados y documentados. Para los 25 puentes restantes no se encontró investigación alguna. En la figura 12 se muestra la ubicación geográfica de los puentes mencionados en la tabla 1 sobre un plano de las zonas de amenaza sísmica de Colombia, evidenciando que el 90% de estos puentes se encuentran localizados en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta, esto resalta la importancia de desarrollar e implementar estrategias para el monitoreo de la salud estructural de puentes. En las investigaciones realizadas en el entorno nacional en puentes de grandes luces por [21]–[23], [72], ha predominado el uso de vibraciones ambientales para la caracterización dinámica. [21] ha hecho énfasis en complementar estos estudios con pruebas de vibración forzada con el fin de enriquecer la caracterización dinámica y detectar modos de vibración que no han sido posibles de identificar con pruebas de vibración ambiental. En vista de la ausencia de pruebas FVT en puentes de grandes luces en Colombia, son necesarias investigaciones y campañas

experimentales encaminadas a generar conocimiento y desarrollo de técnicas y/o métodos, que incorporando experiencias internacionales, puedan ser contextualizados al entorno nacional abordando los factores que intervienen en la adecuada identificación modal, como lo son la fuente de excitación y la ubicación de sensores en el puente.

Estos estudios pueden ser incluidos en la base de datos del Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL) y complementar los documentos ya existentes basados en inspecciones visuales de algunos de estos puentes. Finalmente, se obtendría un compendio de competencias y conocimientos que fomentarían el futuro desarrollo de planes de monitoreo de la salud estructural de puentes. Este conjunto de campañas experimentales se puede desarrollar tomando en cuenta la información documentada en la sección VII donde se evidencian las bondades y limitaciones de las diferentes pruebas de vibración para la caracterización dinámica de puentes. Las experiencias recopiladas por estos autores pueden dar una luz para el aprendizaje y contextualización de este tipo de pruebas en Colombia. Las investigaciones presentadas por [21], [23], [33], [37], [45], [64], [71], [72], [88] parten de un referente común como lo es un modelo numérico del puente, que brinda la información dinámica suficiente para el diseño de las campañas experimentales, pues a partir de este modelo y el subsecuente análisis modal, es posible estimar adecuadamente el tiempo de ventana de toma de datos con base en la ubicación de sensores, la frecuencia de muestreo, la dirección ortogonal predominante de los sensores para registrar vibraciones (longitudinales, transversales y/o verticales) y las posibles ubicaciones de los equipos sobre el puente.

Luego de la identificación experimental de las propiedades dinámicas, el modelo numérico realizado con anterioridad se puede calibrar con la información modal obtenida en campo a fin de superar incertidumbres asociadas al modelado como restricciones en apoyos, módulo de elasticidad, carga muerta, entre otros aspectos. Como lo comenta [59], esta calibración puede desarrollarse sobre la base de un análisis de sensibilidad, usando varios tipos de modelos y ajustando así, los valores de algunos parámetros estructurales para lograr una buena correspondencia entre la información modal identificada en campo y la calculada numéricamente. Esta calibración a su vez permite detectar daño en la estructura como lo menciona [92]. Algunas técnicas para la calibración de modelos numéricos se pueden encontrar en [47]. Investigaciones realizadas por [87]-[90] afirman que la interacción suelo estructura juega un rol importante en la respuesta dinámica del puente, pues el hecho de no considerar la rigidez dinámica del suelo hace que se presenten variaciones entre los resultados experimentales y los modelos numéricos.

Como lo mencionó [29], la adecuada planeación de las campañas en campo le permitirá al director de la prueba hacer una estimación del tiempo y de los recursos (personal, presupuesto, equipos, instrumentos) necesarios para llevarla a buen término. En las investigaciones reportadas por [17], [19], [21], [23], [33], [54], [64], [72], [87], [88], el tiempo de adquisición de datos y la frecuencia de muestreo puede ser variable, no se tiene un valor fijo, lo que sugiere que este

parámetro se defina con base en la experiencia y consideración del director de prueba, aunque este factor difiere entre pruebas AVT y FVT; sin duda alguna, para las pruebas AVT el tiempo de medición debe ser prolongado como sugiere [40], [31]. De igual forma, la posible distribución de ubicaciones sobre el tablero queda supeditado al criterio y experiencia del director de prueba, lo que en algunos casos podría requerir una gran inversión de tiempo en función del número de ubicaciones a instrumentar.

La implementación de algoritmos para la obtención de ubicaciones óptimamente seleccionadas como lo sugiere [71] permite una reducción sustancial de tiempo en la duración de las campañas experimentales. El desarrollo de investigaciones en este tema permitiría obtener recomendaciones sobre ubicaciones predeterminadas en la tipología de puente bajo estudio. Estas ubicaciones también son útiles para la implementación de planes de monitoreo continuo de puentes, puesto que se tienen locaciones de medición confiables.

Algunos autores como [20], [31] afirman que no es posible tener un consenso claro de la fuente de excitación adecuada para cada puente, ya que la selección depende de varios factores entre los más importantes se tienen la tipología del puente, y los recursos (económicos, equipos) para ejecutar las pruebas. Aunque las investigaciones aquí documentadas permiten inferir que el uso de dispositivos mecánicos como excitadores de masa excéntrica, hidráulicos, martillos o caída de objetos son viables en puentes con luces menores a 50 m y en algunos casos, con los medios adecuados, hasta 100 m de luz. Para luces de mayor longitud, el uso de vehículos pesados y fuerzas ambientales son más adecuados. Realizar simulaciones en el modelo numérico de patrones de carga para inducir vibración forzada como lo realizaron [45], [88], [97] permite determinar la viabilidad y la selección de la fuente de excitación, es decir, establecer sí con los equipos de excitación disponibles se logra excitar adecuadamente el puente. Finalmente, la tipología de puente es un factor importante, esto por cuanto puentes flexibles presentan una mayor excitación debida a fuentes ambientales que puentes más rígidos como los puentes de viga cajón de grandes luces.

## IX. CONCLUSIONES

La normativa colombiana (SIPUCOL – CCP-14) carece de recomendaciones adecuadas para la inspección y evaluación estructural de puentes en concreto de grandes luces. Solo se han establecido algunas metodologías basadas en inspección visual, metodología que no ofrece la posibilidad de identificar daño antes de que la afectación estructural sea severa. Para el rango de las grandes luces, en Colombia dominan los puentes en concreto con sección viga cajón construidos por voladizos sucesivos, los cuales, según antecedentes internacionales, tienen a sufrir en el tiempo deformaciones excesivas en el centro de luz consecuencia del inadecuado tratamiento de los efectos diferidos.

En cuanto a pruebas dinámicas para la recepción de puentes nuevos, el código colombiano de puentes CCP-14 no describe procedimientos para ejecutarlas, lo que conlleva que en su mayoría sean realizadas utilizando recomendaciones

extranjerías, adicional a esto, se tiene la preferencia de ejecutar pruebas de carga estáticas. Teniendo en cuenta las falencias normativas y dada la necesidad de monitorear la salud estructural de esta tipología de puentes, aplicar pruebas de AVT y FVT puede ser una herramienta de gran utilidad. El desarrollo de conocimientos y recomendaciones para la adecuada caracterización dinámica a través de pruebas de vibración forzada serviría de insumo para establecer adecuadas líneas bases del comportamiento estructural para la tipología de puentes bajo estudio, que incluyan las formas modales más importantes, teniendo en cuenta su alta importancia en el país para el caso de las grandes luces.

En el contexto nacional se requiere establecer metodologías que permitan determinar la respuesta dinámica de puentes antes de ser puestos en funcionamiento, o puentes que han sufrido afectaciones estructurales, para lograr estos objetivos se requiere de la implementación de pruebas AVT, que puedan ser complementadas con pruebas FVT. Adicionalmente, se debe enfatizar en el uso de modelos numéricos para estudiar configuraciones de sensores que permitan reducir el costo de las campañas experimentales según la tipología de puente bajo estudio, modelos numéricos que también pueden ser usados para determinar los niveles de carga y sus formas de aplicación para la adecuada excitación de las formas modales objetivo cuando se realicen pruebas FVT. Finalmente, es importante resaltar que los procedimientos empleados para determinar protocolos de cargas dinámicas en puentes de grandes luces deben propender por ser lo más objetivos posibles, buscando que se apliquen metodologías que hayan sido aplicadas y documentadas en el contexto internacional y nacional, por lo que el grupo de enfoques presentados en este artículo constituyen un referente para la futura elaboración de protocolos de pruebas más acorde con las necesidades nacionales.

#### REFERENCIAS

- [1] P. F. Takács, "Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling," The Norwegian University of Science and Technology, 2002.
- [2] Z. P. Bazant and M. H. Hubler, "Theory of cyclic creep of concrete based on Paris law for fatigue growth of subcritical microcracks," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 63, no. 1, pp. 187–200, 2014, doi: 10.1016/j.jmps.2013.09.010.
- [3] J. Santos, C. Nunes, C. Fernandes, and H. Varum, "Common pathologies in RC bridge structures: A statistical analysis," *Electron. J. Struct. Eng.*, vol. 7, pp. 19–26, 2007.
- [4] Z. P. Bazant and W. J. Murphy, "Creep and Shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures - model B3\*," *Mater. Struct.*, vol. 28, no. 180, pp. 357–365, 1995.
- [5] J. Manterola Armisen, *Puentes. Apuntes para su diseño cálculo y construcción (Tomo I)*, Primera Ed. Madrid: RUGARTE SL, 2006.
- [6] G. A. Prieto, G. C. Beroza, S. A. Barrett, G. A. López, and M. Florez, "Earthquake nests as natural laboratories for the study of intermediate-depth earthquake mechanics," *Tectonophysics*, vol. 570–571, pp. 42–56, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.tecto.2012.07.019.
- [7] E. Muñoz, R. Hernández, E. Valbuena, L. Trujillo, and L. Santacruz, "Rehabilitación de los puentes de la Red de carreteras de Colombia, basados en inspecciones visuales, estudios especializados y estrategias de reparación," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 20, no. 1, pp. 159–182, 2005.
- [8] Mintransporte, "Resolución 1528," INVIAS, Bogotá, Colombia, 2017. [Online]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/5948-resolucion-1528-del-23-de-mayo-de-2017>.
- [9] A. Gastineau, T. Johnson, and A. Schultz, "Bridge Health Monitoring and Inspections Systems - A Survey of Methods," University of Minnesota, Minnesota, 2009.
- [10] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica and Instituto Nacional de Vías, "SECCIÓN 4: Análisis y evaluación estructural," in *Norma Colombiana de Diseño de Puentes, CCP 14*, 1st ed., Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Ed. Bogotá: INVIAS, 2014, p. 84.
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials, *The Manual for Bridge Evaluation*, Second Ed. Washington, 2016.
- [12] service d'Etudes techniques des routes et Autoroutes, *Technical Guide Loading tests on road bridges and footbridges*, 1st ed., no. october. Bagneux: SETRA, 2006.
- [13] Dirección General de carreteras, *Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*, Primera., vol. 1, no. 1. Madrid: Centro de publicaciones, 1999.
- [14] L. Majumder and C. S. Manohar, "A time-domain approach for damage detection in beam structures using vibration data with a moving oscillator as an excitation source," *J. Sound Vib.*, vol. 268, no. 4, pp. 699–716, 2003, doi: 10.1016/S0022-460X(02)01555-9.
- [15] S. A. Neild, "Using Non Linear Vibration Techniques to Detect Damage in Concrete Bridges," Oxford, 2001.
- [16] O. Ozcelik and C. Amaddeo, "System Identification of a Base-Isolated Bridge by Ambient and Forced Vibration Tests," *J. Test. Eval.*, vol. 45, no. 6, p. 20150505, 2017, doi: 10.1520/jte20150505.
- [17] Y. Tian, J. Zhang, Q. Xia, and P. Li, "Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data," *Eng. Struct.*, vol. 146, pp. 158–169, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.05.039.
- [18] F. Magalhães, E. Caetano, Á. Cunha, O. Flamand, and G. Grillaud, "Ambient and free vibration tests of the Millau Viaduct: Evaluation of alternative processing strategies," *Eng. Struct.*, vol. 45, pp. 372–384, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.06.038.
- [19] J. M. W. Brownjohn *et al.*, "Bayesian operational modal analysis of Jiangyin Yangtze River Bridge," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 110, pp. 210–230, 2018, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.03.027.
- [20] C. R. Farrar, T. A. Duffey, P. Cornwell, and S. W. Doebling, "Excitation methods for bridge structures," *Shock Vib. Dig.*, vol. 32, no. 1, p. 26, 2000.
- [21] A. Viviescas Jaimes, W. J. Carrillo León, and L. A. Vargas Carvajal, "Structural health monitoring baseline of Gómez Ortiz bridge using ambient vibration tests," *Inge Cuc*, vol. 14, no. 1, pp. 52–65, 2018, doi: 10.17981/ingecuc.14.1.2018.05.
- [22] Á. Viviescas Jaimes, L. A. Vargas Carvajal, and C. A. Riveros Jerez, "Identificación modal de un puente viga cajón usando mediciones óptimamente seleccionadas de ensayos de excitación ambiental," *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, no. 2, pp. 31–40, 2019, doi: 10.18273/revuin.v18n2-2019003.
- [23] W. Hernandez, A. Viviescas, and C. A. Riveros Jerez, "Verifying of the finite element model of the bridge on the vibration monitoring at different stages of construction," *Arch. Civ. Eng.*, vol. LV, no. 1, 2020, doi: 10.244425/ace.2020.131772.
- [24] W. Hernandez and F. Luna, "Caracterización dinámica en fase de construcción de puentes de grandes luces. Caso de estudio. Viaducto La Unión," Universidad Industrial de Santander, 2017.
- [25] D. Tranfield, D. Denyer, and P. Smart, "Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review," *Br. J. Manag.*, vol. 14, no. 3, pp. 207–222, 2003, doi: 10.1016/j.intman.2013.03.011.
- [26] T. E. Ruiz Orjuela and N. R. Pimiento Ortiz, "Lean Healthcare: Una Revisión Bibliográfica y Futuras Lienas de Investigación," *Sci. Tech.*, vol. 20, no. 04, pp. 363–370, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.11181>.
- [27] M. F. Green, "Modal test methods for bridges: A review," *Conf. 1995 IMAC XIII - 13th Int. Modal Anal. Conf.*, pp. 552–558, 1995.
- [28] F. J. Carrion viramontes, A. Lozano Guzman, M. de J. Fabela Gallegos, D. Vazquez Vega, and A. Romero Navarrete, "Evaluación de Puentes Mediante el Análisis de Vibraciones," *Instituto mexicano del transporte. Publicacion tecnica No.139*, 1999.
- [29] C. Kramer, C. A. de Smet, and B. Peeters, "Comparison of ambient and forced vibration testing of civil engineering structures," *Shock*

- Vib. Dig.*, vol. 32, no. 1, p. 58, 2000.
- [30] M. Meo and G. Zumpano, "On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 10, pp. 1488–1497, 2005, doi: 10.1016/j.engstruct.2005.03.015.
- [31] R. Cantieni, "Experimental methods used in system identification of civil engineering structures," *Proc. 1st Int. Oper. Modal Anal. Conf. IOMAC 2005*, no. January 2004, 2005.
- [32] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Section 4: Inspection," in *The Manual for Bridge Evaluation*, Second Edi., American Association of State Highway and Transportation Officials, Ed. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2016, p. 52.
- [33] F. Benedettini, M. Dilena, and A. Morassi, "Vibration analysis and structural identification of a curved multi-span viaduct," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 54, pp. 84–107, 2015, doi: 10.1016/j.ymsp.2014.08.008.
- [34] I. Gómez Araújo and J. E. Laier, "Operational modal analysis approach based on multivariable transmissibility with different transferring outputs," *J. Sound Vib.*, vol. 351, pp. 90–105, 2015, doi: 10.1016/j.jsv.2015.04.024.
- [35] S. G. Patel and G. R. Vesmawala, "Experimental studies on sabarmati bridge using traffic induced vibration," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 39–48, 2017.
- [36] J. Brownjohn, S. K. Au, B. Li, and J. Bassitt, "Optimised ambient vibration testing of long span bridges," *Procedia Eng.*, vol. 199, pp. 38–47, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.147.
- [37] O. S. Salawu, "Assessment of bridges: Use of dynamic testing," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 218–228, 1997, doi: 10.1139/196-098.
- [38] O. S. Salawu and C. Williams, "Bridge assessment using forced-vibration testing," *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 121, no. 2, pp. 161–173, 1995, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(161).
- [39] S. Rahmatalla, K. Hudson, Y. Liu, and H. C. Eun, "Finite element modal analysis and vibration-waveforms in health inspection of old bridges," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 78, pp. 40–46, 2014, doi: 10.1016/j.finel.2013.09.006.
- [40] P. Reynolds and A. Pavic, "Comparison of forced and ambient vibration measurements on a bridge," *Proc. Int. Modal Anal. Conf. - IMAC*, vol. 1, no. January, pp. 846–851, 2001.
- [41] Y. B. Yang, B. Zhang, T. Wang, H. Xu, and Y. Wu, "Two-axle test vehicle for bridges: Theory and applications," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 152, no. June 2018, pp. 51–62, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.12.043.
- [42] J. Valdés and J. D. la Colina, "Análisis de la amplificación dinámica de la carga viva en puentes con base en pruebas experimentales," *Rev. Tecnológica-ESPOL*, vol. 21, no. 1, pp. 149–156, 2008, [Online]. Available: <http://learningobjects2006.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/articloe/view/150>.
- [43] D. Cantero, P. McGetrick, C. W. Kim, and E. O'Brien, "Experimental monitoring of bridge frequency evolution during the passage of vehicles with different suspension properties," *Eng. Struct.*, vol. 187, no. June 2018, pp. 209–219, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.02.065.
- [44] D. Cantero, D. Hester, and J. Brownjohn, "Evolution of bridge frequencies and modes of vibration during truck passage," *Eng. Struct.*, vol. 152, pp. 452–464, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.09.039.
- [45] Q. fei Gao, Z. lin Wang, J. Li, C. Chen, and H. yu Jia, "Dynamic load allowance in different positions of the multi-span girder bridge with variable cross-section," *J. Vibroengineering*, vol. 17, no. 4, pp. 2025–2039, 2015.
- [46] K. H. Hsieh, M. W. Halling, and P. J. Barr, "Overview of vibrational structural health monitoring with representative case studies," *J. Bridg. Eng.*, vol. 11, no. 6, pp. 707–715, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:6(707).
- [47] P. Omenzetter *et al.*, "Forced and ambient vibration Testing of Full Scale Bridges," Aberdeen, 2013, doi: 10.13140/2.1.1168.5448.
- [48] G. W. Chen, P. Omenzetter, and S. Beskhyroun, "Operational modal analysis of an eleven-span concrete bridge subjected to weak ambient excitations," *Eng. Struct.*, vol. 151, pp. 839–860, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.08.066.
- [49] B. Peeters, H. Van Der Auweraer, P. Guillaume, and J. Leuridan, "The PolyMAX frequency-domain method: A new standard for modal parameter estimation?," *Shock Vib.*, vol. 11, no. 3–4, pp. 395–409, 2004, doi: 10.1155/2004/523692.
- [50] G. W. Chen, S. Beskhyroun, and P. Omenzetter, "Ambient and forced vibration testing of an eleven-span motorway off-ramp bridge," *Proc. Int. Conf. Struct. Dyn., EURODYD*, vol. 2014-Janua, pp. 2427–2434, 2014, doi: 10.13140/2.1.2528.9281.
- [51] A. C. Altunişik, A. Bayraktar, and B. Sevim, "Analytical and experimental modal analyses of a highway bridge model," *Comput. Concr.*, vol. 12, no. 6, pp. 803–818, 2013, doi: 10.12989/cac.2013.12.6.803.
- [52] L. S. Hogan, L. Wotherspoon, S. Beskhyroun, and J. Ingham, "Dynamic Field Testing of a Three-Span Precast-Concrete Bridge," *J. Bridg. Eng.*, vol. 21, no. 12, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000970.
- [53] X. He, B. Moaveni, J. P. Conte, and A. Elgamal, "Comparative study of system identification techniques applied to New Carquinez Bridge," *Proc. 3rd Int. Conf. Bridg. Maintenance, Saf. Manag. - Bridg. Maintenance, Safety, Manag. Life-Cycle Perform. Cost*, pp. 259–260, 2006, doi: 10.1201/b18175-95.
- [54] W. X. Ren, T. Zhao, I. E. Harik, and M. Asce, "Experimental and Analytical Modal analysis of steel Arch Bridge," *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 7, pp. 1022–1031, 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130.
- [55] J. P. Conte, S. F. Masri, J. P. Caffrey, and B. Moaveni, "Dynamic Testing of Alfred Zampa Memorial Bridge," *J. Struct. Eng.*, vol. 134, no. 6, 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134.
- [56] B. Peeters and C. E. Ventura, "Comparative study of modal analysis techniques for bridge dynamic characteristics," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 17, no. 5, pp. 965–988, 2003, doi: 10.104508/reia.2013.10.20.23-37.
- [57] A. Bayraktar, A. C. Altunişik, B. Sevim, and T. Ş. Özşahin, "Environmental effects on the dynamic characteristics of the Gülburnu Highway Bridge," *Civ. Eng. Environ. Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 347–366, 2014, doi: 10.1080/10286608.2014.916697.
- [58] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition," in *18 International Modal Analysis Conference IMAC*, 2000, no. 18.
- [59] Á. Cunha and E. Caetano, "From input-Output to Output-Only modal identification of civil engineering struct," *Proc. 1st Int. Oper. Modal Anal. Conf. IOMAC 2005*, 2005.
- [60] M. Chang and S. N. Pakzad, "Optimal sensor placement for modal identification of bridge systems considering number of sensing nodes," *J. Bridg. Eng.*, vol. 19, no. 6, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000594.
- [61] C. Riveros, E. García, and J. Rivero Jerez, "A comparative study of sensor placement techniques for structural damage detection," *Rev. EIA*, no. 20, pp. 23–37, 2013, doi: 10.14508/reia.2013.10.20.23-37.
- [62] K. Liu, R. J. Yan, and C. Guedes Soares, "Optimal sensor placement and assessment for modal identification," *Ocean Eng.*, vol. 165, no. June, pp. 209–220, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.034.
- [63] D. C. Kammer, "Sensor Placement for On Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures," *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 14, no. 2, pp. 251–259, 1991, doi: <https://doi.org/10.2514/3.20635>.
- [64] B. A. D. Piombo, A. Fasana, S. Marchesiello, and M. Ruzzene, "Modelling and identification of the dynamic response of a supported bridge," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 14, no. 1, pp. 75–89, 2000, doi: 10.1006/mssp.1999.1266.
- [65] I. G. Araújo and J. E. Laier, "Operational modal analysis using SVD of power spectral density transmissibility matrices," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 46, no. 1, pp. 129–145, 2014, doi: 10.1016/j.ymsp.2014.01.001.
- [66] S. M. Rodríguez, J. M. Gallardo, and O. A. Araúz, "Study of vibration period for concrete bridges in Panama; Estudio del periodo de vibración de puentes de concreto en Panamá," *Rev. I+D Tecnológico*, vol. 13, no. 1, p. 20, 2017, [Online]. Available: <http://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/1441>.
- [67] A. Fiore and G. C. Marano, "Serviceability Performance Analysis of Concrete Box Girder Bridges Under Traffic-Induced Vibrations by Structural Health Monitoring: A Case Study," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 5, pp. 553–565, 2018, doi: 10.1007/s40999-017-0161-3.
- [68] P. Galvín and J. Domínguez, "Dynamic analysis of a cable-stayed deck steel arch bridge," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 63, no. 8, pp. 1024–1035, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.jcsr.2006.11.001.
- [69] J. M. W. Brownjohn, A. A. Dumanoglu, R. T. Severn, and C. A. Taylor, "Ambient Vibration Measurements of the Humber Suspension Bridge and Comparison With Calculated

- Characteristics.," *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 83, no. pt 2, pp. 561–600, 1987, doi: 10.1680/jicpe.1988.956.
- [70] J. M. W. Brownjohn, F. Magalhaes, E. Caetano, and A. Cunha, "Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 2003–2018, 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.02.034.
- [71] P. Pachón, R. Castro, E. García-Macias, V. Compan, and E. Puertas, "E. Torroja's bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors," *Eng. Struct.*, vol. 162, no. September 2017, pp. 11–21, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.035.
- [72] E. Muñoz, F. Núñez, J. A. Rodríguez, A. Ramos, and C. Otálora, "Seismic vulnerability and loading capacity of a wire strained bridge based on structural reliability," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 25, no. 2, pp. 285–323, 2010, doi: 10.4067/S0718-50732010000200006.
- [73] P. Antonio, D. Jaime, and M. E. L. Uso, "Evaluación De La Capacidad De Carga Del Puente Antonio Dovalí Jaime, Mediante El Uso De Pruebas De Carga Estáticas Y Dinámicas," *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.*, vol. 2, no. 1, pp. 31–43, 2010.
- [74] P. Clemente, A. Manuli, and F. Saitta, "Experimental modal analysis of a cable-stayed bridge," *Proc. 3rd Int. Conf. Bridg. Maintenance, Saf. Manag. - Bridg. Maintenance, Safety, Manag. Life-Cycle Perform. Cost*, pp. 993–994, 2006, doi: 10.1201/b18175-426.
- [75] W. X. Ren, W. Zatar, and I. E. Harik, "Ambient vibration-based seismic evaluation of a continuous girder bridge," *Eng. Struct.*, vol. 26, no. 5, pp. 631–640, 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2003.12.010.
- [76] R. Castro-Triguero, E. Garcia-Macias, E. S. Flores, M. I. Friswell, and R. Gallego, "Multi-scale model updating of a timber footbridge using experimental vibration data," *Eng. Comput. (Swansea, Wales)*, vol. 34, no. 3, pp. 754–780, 2017, doi: 10.1108/EC-09-2015-0284.
- [77] C. Wu, H. Liu, and Y. Li, "Sensor optimal placement for structural health monitoring based on stabilization diagram," *Key Eng. Mater.*, vol. 540, pp. 47–54, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.540.47.
- [78] Y. S. Zou, Q. H. Chang, and W. Peng, "Technology and application for modal testing of cable-stayed bridge," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 226–228, pp. 396–400, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.226-228.396.
- [79] B. Li, D. Li, X. Zhao, and J. Ou, "Optimal sensor placement in health monitoring of suspension bridge," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 55, no. 7, pp. 2039–2047, 2012, doi: 10.1007/s11431-012-4815-8.
- [80] M. G. Masciotta, L. F. Ramos, P. B. Lourenço, and M. Vasta, "Damage detection on the Z24 bridge by a spectral-based dynamic identification technique," *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 4, pp. 197–206, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-04546-7\_23.
- [81] M. Dilena, A. Morassi, and M. Perin, "Dynamic identification of a reinforced concrete damaged bridge," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, no. 8, pp. 2990–3009, 2011, doi: 10.1016/j.ymssp.2011.05.016.
- [82] C. Bedon and A. Morassi, "Dynamic testing and parameter identification of a base-isolated bridge," *Eng. Struct.*, vol. 60, pp. 85–99, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.12.017.
- [83] A. Morassi and S. Tonon, "Dynamic testing for structural identification of a bridge," *J. Bridg. Eng.*, vol. 13, no. 6, pp. 573–585, 2008, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:6(573).
- [84] J. Zwolski and J. Bieñ, "Modal analysis of bridge structures by means of Forced Vibration Tests," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 17, no. 4, pp. 590–599, 2011, doi: 10.3846/13923730.2011.632489.
- [85] L. S. Hogan, L. M. Wotherspoon, S. Beshkhyroun, and J. M. Ingham, "Modal identification of a bridge-abutment system using forced vibration testing," *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, vol. 45, no. 4, pp. 161–170, 2012, doi: 10.5459/bnzsee.45.4.161-170.
- [86] A. şahin and A. Bayraktar, "Forced-Vibration Testing and Experimental Modal Analysis of a Steel Footbridge for Structural Identification," *J. Test. Eval.*, vol. 42, no. 3, p. 20130166, 2014, doi: 10.1520/jte20130166.
- [87] J. Malveiro, D. Ribeiro, C. Sousa, and R. Calçada, "Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests," *Eng. Struct.*, vol. 164, no. October 2017, pp. 40–52, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.057.
- [88] T. Argentini, M. Belloli, L. Rosa, E. Sabbioni, A. Zasso, and M. Villani, "Modal Identification of a Cable-Stayed Bridge by Means of Truck Induced Vibrations," *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 1, pp. 389–400, 2012, doi: 10.1007/978-1-4614-2413-0.
- [89] M. Kuzawa, J. Bieñ, P. Rawa, T. Kamiski, and J. Zwolski, "Static and dynamic load tests of a long-span cable-stayed bridge over the Odra River in Wrocław," *Bridg. Maintenance, Safety, Manag. Resil. Sustain. - Proc. Sixth Int. Conf. Bridg. Maintenance, Saf. Manag.*, no. June, pp. 3344–3351, 2012, doi: 10.1201/b12352-503.
- [90] O. Burdet and S. Corthay, "Dynamic load testing of Swiss bridges," *IABSE Symp. San Fr. Extending Lifesp. Struct.*, vol. 73/2, pp. 1123–1128, 1995, [Online]. Available: <http://is-beton.epfl.ch/Publications/199x/Burdet95.pdf>.
- [91] M. Gatti, "Structural health monitoring of an operational bridge: A case study," *Eng. Struct.*, vol. 195, no. March 2017, pp. 200–209, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.05.102.
- [92] E. P. Carden and P. Fanning, "Vibration Based Condition Monitoring: A Review," *Struct. Heal. Monit.*, vol. 3, no. 4, pp. 355–377, 2004, doi: 10.1177/1475921704047500.
- [93] F. Gara, M. Regni, D. Roia, S. Carbonari, and F. Dezi, "Evidence of coupled soil-structure interaction and site response in continuous viaducts from ambient vibration tests," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 120, no. October 2018, pp. 408–422, 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.02.005.
- [94] A. Zangeneh, C. Svedholm, A. Andersson, C. Pacoste, and R. Karoumi, "Identification of soil-structure interaction effect in a portal frame railway bridge through full-scale dynamic testing," *Eng. Struct.*, vol. 159, no. January, pp. 299–309, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.01.014.
- [95] P. Faraonis, A. Sextos, C. Papadimitriou, E. Chatzi, and P. Panetsos, "Implications of subsoil-foundation modelling on the dynamic characteristics of a monitored bridge," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 180–192, 2019, doi: 10.1080/15732479.2018.1503689.
- [96] Z. Li, D. Feng, M. Q. Feng, and X. Xu, "System identification of the suspension tower of Runyang Bridge based on ambient vibration tests," *Smart Struct. Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 523–538, 2017, doi: 10.12989/sss.2017.19.5.523.
- [97] W. Humberto, V. Gómez, C. Alberto, and R. Jerez, "Caracterización dinámica en condiciones de excitación natural de puentes de concreto reforzado," *Vector 6*, vol. 6, pp. 36–44, 2011.



**W.A. Hernandez-Sierra** is a civil engineer with Cum Laude distinction graduated from the Industrial University of Santander. He is currently a master's student in civil engineering at Industrial University of Santander. His research area includes numerical modeling and dynamic characterization of structures.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4806-1289>



**A. Viviescas** is a civil engineering with Cum Laude distinction from Industrial University of Santander. He has a doctorate in structures from the Polytechnic University of Catalunya (Barcelona, Spain). Associate professor at the School of Civil Engineering and associate researcher at Colciencias,

member of the INME Group of the Industrial University of Santander.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0052-8801>.





**C.A. Riveros-Jerez**, received his BSc. Eng in Civil Engineering in 1998 from the Industrial University of Santander (UIS). He obtained his M.Eng. in 2004 from the University of Tokyo and his Dr.Eng. in 2008 from Kyoto University. In 2005, Dr. Riveros began to work as an assistant professor in the University of Antioquia, Medellín, Colombia. His currently associate professor. His research interests include structural dynamics, fluid dynamics, bridge engineering, concrete structures, structural health monitoring, and earthquake engineering.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7128-4165>