

**PESAJE DINÁMICO VEHICULAR BASADO EN VIBRACIONES EN UN PUENTE
DE CONCRETO PREESFORZADO DETERIORADO**

JENNIFER MARCELA LÓPEZ MARTÍNEZ



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2025**

**PESAJE DINÁMICO VEHICULAR BASADO EN VIBRACIONES EN UN PUENTE
DE CONCRETO PREESFORZADO DETERIORADO**

**INVESTIGACIÓN PRESENTADA A LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y
GEOMÁTICA**

**ESTUDIANTE:
JENNIFER MARCELA LÓPEZ MARTÍNEZ
(2025317)**

**DIRECTORES:
JOHANNIO MARULANDA Ph.D.
PETER THOMSON Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2025**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

El presente trabajo fue aprobado por el director del programa académico, los jurados y los directores de investigación.

CARLOS ALBERTO MADERA, Ph.D.
Director del Programa Académico de
Ingeniería Civil y Geomática.

JOHANNIO MARULANDA CASAS, Ph.D.
Director de Investigación

PETER THOMSON, Ph.D.
Director de Investigación

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo implementar una metodología basada en vibraciones para el pesaje dinámico no invasivo en un puente deteriorado de concreto presforzado. La investigación se enmarca en el contexto actual de la infraestructura vial, cada vez más afectada por el paso frecuente de vehículos con sobrepeso. La metodología propuesta se basa en la respuesta vibratoria estructural registrada por un sistema de monitoreo conformado por acelerómetros instalados sobre las vigas del puente. Si bien los sistemas comerciales de pesaje en movimiento en puentes (B-WIM, por sus siglas en inglés) han demostrado una alta precisión en la estimación del peso bruto vehicular, su implementación enfrenta desafíos relacionados con las condiciones estructurales ideales que se requieren para su correcto funcionamiento. Además, estos sistemas dependen principalmente de mediciones de deformación, lo cual implica una instrumentación más compleja y costosa, especialmente en puentes de gran luz. En contraste, la metodología aquí planteada se basa en mediciones de vibraciones, las cuales pueden obtenerse mediante equipos más portátiles y capaces de cubrir mayores áreas con menos sensores. La propuesta fue evaluada a través simulaciones en un modelo numérico en elementos finitos bajo diferentes escenarios de carga vehicular, y posteriormente implementada en campo en un puente vehicular deteriorado, con alta pendiente de acceso. Los resultados obtenidos demuestran que es posible estimar el peso bruto vehicular de manera satisfactoria. Esta metodología representa una herramienta eficiente para el monitoreo de cargas en carreteras, contribuyendo a la reducción de riesgos estructurales y al fortalecimiento de la gestión de la infraestructura vial.

Palabras clave: Infraestructura vial, puente, sobrecarga, pesaje dinámico, monitoreo estructural, modelo numérico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación contó con el apoyo financiero de MINCIENCIAS, a través del proyecto “Monitoreo y evaluación en tiempo real con inteligencia artificial de la integridad estructural de puentes de la Región Pacífico sometidos a vehículos extrapesados” (CI 109104), desarrollado en el marco de la Convocatoria Orquídeas, con el respaldo del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica y Estructural (G-7).

A Dios, por permitirme llegar hasta este momento, por guiar mis pasos, abrir caminos en los momentos de incertidumbre y llenar de propósito cada etapa de este proceso.

A mis tutores, los profesores Johannio Marulanda, Ph.D. y Peter Thomson, Ph.D., por la oportunidad de hacer parte de este proyecto, por su confianza y orientación. A mis asesores, Mauricio Marín y Diana Millán, Ph.D., por su acompañamiento y por compartir sus conocimientos y experiencia.

A mi familia, por su amor y apoyo permanente. Son mi gran motivación y mi razón de ser.

Finalmente, a la Universidad del Valle, por brindarme las herramientas y el espacio que me han permitido crecer.

TABLA DE CONTENIDO

1. PROBLEMA.....	9
1.1. Descripción.....	9
1.2. Formulación	12
1.3. Objetivos	12
1.4. Justificación.....	12
2. MARCO DE REFERENCIA	15
2.1. Antecedentes	15
2.2. Componentes y metodologías de un sistema B-WIM	18
2.2.1. Identificación del vehículo	18
2.2.2. Determinación de la carga.....	21
2.2.3. Arreglo de los sensores en el puente	25
3. MODELO NUMÉRICO Y EVALUACIÓN ANALÍTICA.....	26
3.1. Descripción del caso de estudio	26
3.2. Descripción del modelo numérico de referencia.....	29
3.3. Simulación de escenarios de carga vehicular	31
3.4. Relación carga-respuesta analítica	33
3.5. Evaluación analítica del sistema de pesaje.....	34
3.5.1. Análisis de sensibilidad del proceso de estimación.....	34
3.5.2. Propuesta del arreglo de sensores.....	45
4. IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL Y PRUEBAS DE CARGA	47
4.1. Diseño del sistema de monitoreo estructural.....	47
4.1.1. Instrumentación utilizada	47
4.1.2. Configuración e instalación del arreglo de sensores en el puente	49
4.2. Ejecución de las pruebas de carga controladas.....	50
4.2.1. Caracterización de los vehículos de prueba.....	50
4.2.2. Protocolo de carga	51
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	53
5.1. Ajuste de la relación carga-respuesta	53
5.2. Identificación de parámetros vehiculares	56
5.3. Estimación del peso vehicular.....	59

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	64
6.1. Conclusiones	64
6.2. Perspectivas.....	65
7. BIBLIOGRAFÍA.....	66
8. ANEXOS	70

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Registro del esfuerzo de respuesta. Modificado de [21]	15
Figura 2. Instrumentación en campo [15], [21]	16
Figura 3. Amplificador de tensión mecánico [22]	16
Figura 4. Instalación de sensores en la superficie del pavimento [33].	19
Figura 5. Registro de esfuerzo y su transformada de onda [14]	20
Figura 6. Gráfica de aceleración usada para la estimación de velocidad [32].....	21
Figura 7. Representación típica de la curva-L en escala doble logarítmica [26], [39]	23
Figura 8. Ubicación del puente de estudio. (Fuente: Michael Bolaños 2021).....	26
Figura 9. Pendiente de acceso al puente. (a) Vista general; (b) Perfil completo.	27
Figura 10. Subestructura del puente [15].....	27
Figura 11. Rugosidad en la superficie de rodadura.	28
Figura 12. Esquema de la vista en planta y elevación, y viga tipo del puente. Modificado de [15].....	29
Figura 13. Modelo numérico y viga tipo.	31
Figura 14. Tipo de vehículos simulados.	32
Figura 15. Posición transversal de la carga simulada.	32
Figura 16. Mapas de contorno del área de influencia de las vigas 1 y 4 (Unidades en m/N).	34
Figura 17. Puntos de adquisición para el análisis de sensibilidad.	35
Figura 18. Respuesta absoluta en aceleración: (a) Señales de la entrada; (b) Señales de la salida.	37
Figura 19. Identificación del vehículo.	38
Figura 20. Error de identificación según los puntos de registros.	39
Figura 21. Gráfico de dispersión del error de peso por eje.....	43
Figura 22. Error en la identificación del PBV.	44
Figura 23. Propuesta ideal del arreglo de sensores (a) Vista en planta; (b) Vista en elevación.	46
Figura 24. Detalle de la instrumentación: (a) Vista general de una zona instrumentada; (b) Gabinete principal; (c) Acelerómetro ADLX354BZ (d) nodo LORD V-Link-200	49
Figura 25. Configuración de la instrumentación definitiva del puente (a) Vista en planta; (b) Vista en elevación.....	50
Figura 26. Configuración de los vehículos de prueba.	51
Figura 27. Volquetas utilizadas en las pruebas de carga.	51
Figura 28. Respuesta en desplazamiento de la prueba N°5.	55
Figura 29. Superficie de influencia calibrada de la viga 4 (Unidades en m/N).....	55
Figura 30. Respuesta en tiempo-frecuencia de la prueba N° 1.	56
Figura 31. Error en el espaciamiento de ejes según la escala.	57
Figura 32. Identificación para la prueba N° 9.....	58
Figura 33. Curva-L para la prueba N°12 (a) Rango completo de λ (b) Región de λ óptimo.	60
Figura 34. Representación gráfica de la diferencia en la estimación de carga.	63

1. PROBLEMA

1.1. Descripción

Los puentes son elementos fundamentales de las redes de transporte, y su correcto funcionamiento es esencial para la movilidad y el comercio en una región. Por lo tanto, es de vital importancia garantizar la seguridad y la durabilidad de estas estructuras. Los puentes deben ser capaces de soportar el peso de los vehículos que los atraviesan, sin poner en riesgo la integridad de la estructura ni la seguridad de las personas; de ahí la importancia de la identificación precisa de las cargas vehiculares, pues la subestimación de estas puede provocar graves daños e incluso el colapso. Tal es el caso del puente Nanfang'ao en Taiwán que en el 2019 colapsó trágicamente mientras un camión lo atravesaba. Este incidente resultó en la pérdida de seis vidas y dejó a otras trece personas heridas. Sobre este hecho, se publicó que muchos camiones pasaron por el puente con una mayor carga a la de diseño [1]. En Colombia, el puente El Alambrado, encargado de unir al Quindío con el Valle del Cauca, cayó el pasado 12 de abril. Entre las hipótesis, la sobrecarga dinámica es una de las posibles causas del colapso, según la Agencia Nacional de Infraestructura [2].

Además de la desafortunada pérdida de vidas, el fallo de puentes provoca la interrupción del tráfico, generando consecuencias económicas adversas, desde pérdidas comerciales hasta retrasos logísticos y costos asociados con la reconstrucción. El impacto económico se amplifica a medida que las comunidades, por la incomunicación, experimentan disminuciones en la movilidad y el turismo.

En un reciente análisis hecho por la Universidad Nacional se revela algunos indicadores del número de colapsos de puentes en el país durante las últimas décadas. En el año 2023 se identificaron más de trece casos de falla, donde el 24.4% son puentes vehiculares [3]. Se ha constatado que la sobrecarga es uno de los motivos. En el año 2011, se informó que representaba el 7% de las principales causas [4].

En Colombia, la circulación de carga por carretera ha ido incrementado en los últimos años, planteando mayores retos para la infraestructura vial. Según el balance realizado por el Ministerio de Transporte a finales del 2022, durante todo el año se movilizaron más de 135 millones de toneladas en más de diez millones de viajes. Estas cifras superaron lo registrado

en el año 2021, con un crecimiento del 9.64%. En la distribución en toneladas y viajes de transporte de carga por carretera según el tipo de camión, el informe destaca los viajes realizados por camiones de dos ejes y tractocamiones de tres ejes, que representan el 80% del total de viajes [5]. Este tipo de vehículos hacen parte de la categoría de aquellos que ocasionan mayor agresividad al pavimento [6].

Existen normativas vigentes que establecen medidas para el control de las cargas vehiculares; sin embargo, son muy comunes los casos de sobrecarga, que representan una amenaza creciente para la integridad de las estructuras viales [7]. En este sentido, este tema exige implementar tecnologías avanzadas que posibiliten la identificación precisa de las cargas reales transportadas por los vehículos y, en consecuencia, la adopción de medidas preventivas y correctivas, con el fin de garantizar la seguridad y confiabilidad estructural.

La identificación de las cargas vehiculares puede realizarse a través de diferentes metodologías. El enfoque más utilizado son las estaciones de pesaje en las carreteras, que implica una interacción directa con los vehículos. Estos sistemas, aunque resultan altamente precisos, presentan la necesidad de que los vehículos se detengan sobre la plataforma de una báscula por cierto tiempo, lo que facilita su evasión [8]. Además, se requeriría la instalación de numerosas estaciones, lo que supondría una inversión considerable.

Las otras alternativas se realizan de manera no invasiva, dinámicamente mediante monitoreo estructural, es decir, se estima el peso real con un grado de aproximación aceptable cuando los vehículos están en movimiento. En el pesaje dinámico (WIM, según sus siglas en inglés) se calcula el peso bruto del vehículo y el peso por cada eje cuando este pasa sobre dispositivos colocados en su trayectoria. Estas alternativas representan entre otras ventajas, un menor costo y evasión que las estáticas, pero algunas de ellas pueden tener ciertos sesgos en los resultados y problemas relacionados con la instalación de los equipos, ya que se requiere de cortes en el pavimento y, en ocasiones, el cierre parcial o total de las vías [9][10].

En las últimas décadas se ha desarrollado una tecnología de pesaje dinámico (B-WIM), que proporciona una herramienta eficaz para medir, de manera confiable, el peso de los vehículos en movimiento utilizando un puente instrumentado con sensores, como báscula. Este concepto fue introducido por primera vez por Moses en 1979, quien desarrolló una

metodología para predecir el peso por eje de un vehículo a partir de las mediciones de la velocidad y el espaciamiento entre ejes. Diversos países han desarrollado sistemas y normativas específicas para el pesaje en movimiento. En el caso de Estados Unidos, por ejemplo, se cuenta con la norma ASTM E1318-09 “Standard Specification for Highway Weigh-in-Motion Systems with User Requirements and Test Method” [11], que establece los requisitos para los sistemas de pesaje en movimiento. En Colombia, son pocos los casos donde se han llevado a cabo implementaciones e investigaciones sobre este tema. Por ejemplo, La Guía para la Instrumentación y Monitoreo de Puentes, dictada por el INVIAS, se limita a proporcionar una definición y descripción del tema basados en referencias como la norma estadounidense mencionada anteriormente [12].

La metodología B-WIM fue aplicada por primera vez en el país en el 2011, donde utilizaron detectores de eje instalados sobre la superficie de rodadura [13]. Instalar estos detectores implica realizar cortes en el pavimento y su resistencia se ve limitada por la constante exposición al tráfico [14]. Más adelante, se llevó a cabo la identificación de cargas en un puente vehicular de la ciudad de Cali mediante sensores situados debajo de la estructura, evitando así las interrupciones de tráfico [15]. Los resultados mostraron que la metodología implementada es viable en el tipo de puente analizado, sin embargo, las pruebas de carga fueron realizadas a velocidades aproximadas de 7.5 km/h, una cifra considerablemente menor que la velocidad típica de circulación en las carreteras. Dado que la precisión del peso se ve directamente afectada por la velocidad, es importante que las pruebas se realicen a velocidades que reflejen las condiciones normales de tráfico en la zona de estudio.

Cabe mencionar que para aplicar un sistema BWIM es importante que un puente cumpla con condiciones ideales para lograr una identificación precisa de los ejes. La implementación de esta metodología en un puente deteriorado y con superficie rugosa, como es el caso estudiado en la ciudad de Cali, anteriormente mencionado, constituye un mayor reto debido al ruido generado por los efectos dinámicos en las señales captadas por los sensores [16] y a la necesidad de representar adecuadamente el deterioro en el modelo numérico.

Ante este escenario, surge la necesidad de hacer una identificación precisa de la carga real que está pasando por los puentes mediante métodos que resulten más prácticos y eficientes, y consideren el estado de deterioro de la estructura y el pavimento.

1.2. Formulación

¿Cómo implementar una metodología de pesaje dinámico en un puente deteriorado mediante monitoreo estructural?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Implementar una metodología para realizar pesaje dinámico no invasivo en un puente de concreto preesforzado deteriorado mediante monitoreo estructural.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis de sensibilidad en la identificación de la carga mediante un modelo numérico de la estructura.
- Proponer un arreglo de sensores y escenarios tipo para la identificación de la velocidad y la carga vehicular.
- Estimar velocidades y cargas vehiculares reales mediante el arreglo de sensores propuesto para un sistema de monitoreo estructural.

1.4. Justificación

La carga que soportan los puentes está directamente relacionada al tamaño y peso de los vehículos que los atraviesan. Un incremento en la carga conlleva a una probabilidad superior de provocar daños y reducción de la vida útil de estas estructuras [9]. En el actual contexto de la infraestructura vial, el pesaje de vehículos en puentes ha adquirido una creciente importancia. Justificar la búsqueda de una gestión vial más eficiente y efectiva con relación al sobrepeso y su método de medición se sustenta en aspectos como: i) la seguridad vial: la sobrecarga de vehículos es una amenaza para la seguridad de todos los usuarios de la carretera; ii) la preservación de la infraestructura vial: el control de la carga ayudará a prolongar la vida útil de estas estructuras, reduciendo la necesidad de costosas reparaciones y reemplazos prematuros; para cada eje simple, una sobrecarga de una tonelada puede significar un incremento de daño del 92% en los pavimentos [17]; y iii) cumplimiento normativo: los sistemas B-WIM facilitan la vigilancia y el cumplimiento de las normativas

establecidas por las autoridades, esenciales para el funcionamiento legal y seguro del transporte de carga.

La reparación y el mantenimiento de las vías dañadas debido a la sobrecarga resultan en costos sustanciales para las autoridades responsables de la infraestructura vial. Por esta razón, los gobiernos nacionales y locales, así como las organizaciones vinculadas a la construcción, se esfuerzan constantemente por desarrollar metodologías que les permitan evaluar la condición de sobrepeso en sus carreteras, además de obtener información detallada como el número de ejes, la distancia entre ejes y el peso por eje de los vehículos. Estos datos resultan relevantes al evaluar la seguridad de los puentes y pueden emplearse como una herramienta para estimar la capacidad de carga de estructuras que han estado en servicio durante algún tiempo [18]. En los análisis de fatiga, que es una de las principales causas de deterioro de los puentes, suelen ser requeridos los datos de tráfico para simular escenarios de carga y calcular las fuerzas internas de los elementos estructurales, con métodos como el propuesto en [19].

Las herramientas actualmente comunes para la identificación de este tipo de información son costosas y tienen problemas asociados a su gestión de operación y mantenimiento. El diseño y la construcción de una estación de pesaje se estima en un valor que supera los US\$2,8 millones. Así mismo, se proyecta un significativo gasto mensual de operación y mantenimiento que supera los US\$20,5 mil por cada estación de pesaje [10].

El pesaje dinámico puede ser implementado en puentes estratégicos del país como lugares de medición del peso vehicular, lo que permitiría sustituir o complementar la información proporcionada por las estaciones ya existentes, con el fin de contribuir al fortalecimiento de la gestión sostenible de la infraestructura vial [10]. Entre las principales ventajas del sistema se encuentran la reducida inversión inicial y costos de mantenimiento; no interfiere en el tráfico ni impone restricciones de velocidad, no genera daño en pavimento, ni se deteriora con el paso de los vehículos, y disminuye los riesgos de evasión y de corrupción.

La aplicación de los sistemas BWIM comerciales modernos enfrenta ciertos desafíos. Es necesario que un puente cumpla con condiciones ideales para lograr una identificación precisa de los pesos de los ejes [20]. En la propuesta de implementar una metodología de

pesaje dinámico en un puente deteriorado se espera que el trabajo sea un valioso aporte para futuras investigaciones en este campo y los resultados puedan servir como base para formulación de políticas y acciones relacionadas con el pesaje de vehículos en puentes, con el objetivo de fortalecer la seguridad y la preservación de la infraestructura vial.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes

La identificación de cargas en movimiento sobre puentes, conocida como B-WIM, es una metodología que ha evolucionado de manera importante desde su concepción inicial. La primera implementación de un sistema de pesaje en movimiento utilizando puentes instrumentados se remonta a 1979 cuando Fred Moses propuso una metodología para predecir el peso de los vehículos mediante líneas de influencia que relacionan la respuesta del puente con la carga que pasa sobre él. Moses obtuvo los pesos de los ejes a través de una minimización de diferencias entre la respuesta medida en campo y la respuesta predicha. Una representación gráfica se presenta en la Figura 1.

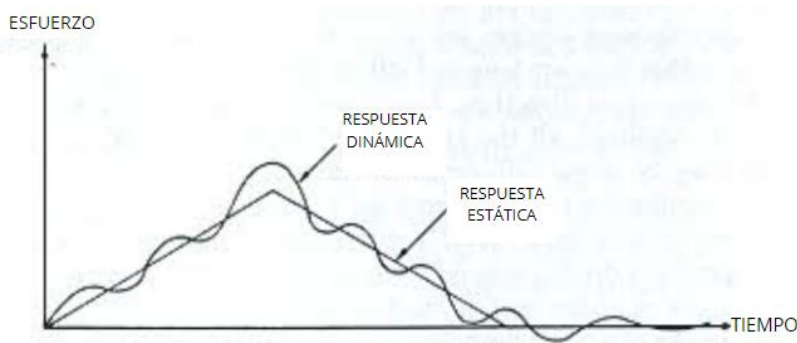


Figura 1. Registro del esfuerzo de respuesta. Modificado de [21]

La metodología de Moses supone que el puente experimentará oscilaciones en torno a una posición de respuesta estática cuando un camión lo atraviese, donde la suma de la respuesta medida en cada viga instrumentada del puente será la respuesta bruta resultante en un instante, como se representa en la Figura 1. A partir de esto se pudo deducir que las estimaciones del peso de los camiones generadas podrían arrojar resultados muy favorables [6]. En el estudio, se emplearon cintas interruptoras para calcular la velocidad del vehículo y la distancia entre ejes, como se aprecia en la Figura 2.

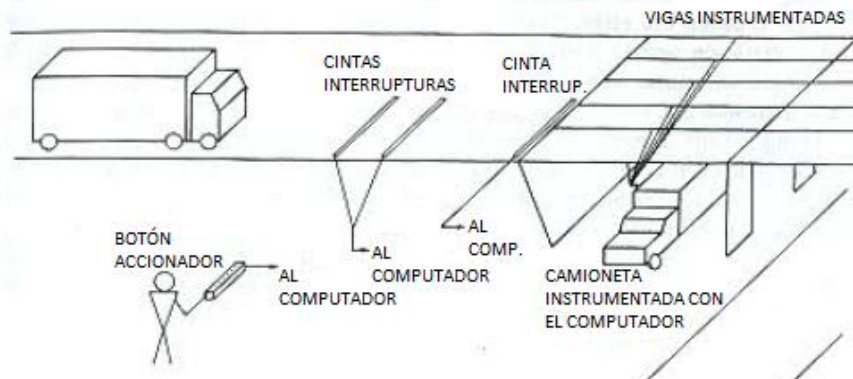


Figura 2. Instrumentación en campo [15], [21].

Posteriormente, se llevaron a cabo proyectos que exploraron otras alternativas para la identificación del peso en los puentes. En investigaciones como la de CULWAY en Australia, se colocaron amplificadores de tensión mecánicos (Figura 3) en las alcantarillas que registraban la tensión producida cuando los ejes de los camiones las atravesaban. Esta solución se desarrolló al identificarse que los sistemas disponibles hasta entonces resultaban costosos de operar. Entre las ventajas del sistema, se destacaban la considerable reducción de los efectos dinámicos y la vibración, factores que suelen plantear desafíos en la identificación de parámetros [22].

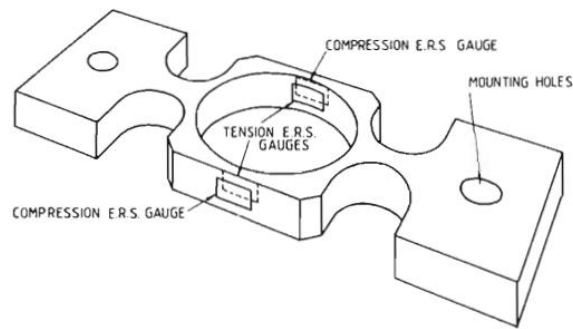


Figura 3. Amplificador de tensión mecánico [22].

Contribuciones importantes se hicieron a la identificación de la carga en movimiento, al analizar el sistema de manera dinámica. Law et al. desarrollaron un método basado en el análisis temporal en el que convertían las fuerzas en movimiento al dominio del tiempo [23]. El método se basa en la superposición modal y el vehículo se modela como cargas de un solo

eje y dos ejes con espaciamiento fijo que se mueve sobre una viga simplemente apoyada con amortiguación viscosa. Los resultados se obtuvieron resolviendo la ecuación diferencial para una viga Euler- Bernoulli. Chan et al. propusieron otros métodos para obtener un registro temporal completo de las fuerzas ejercidas por los ejes de un vehículo al pasar el puente [24], [25], lo que contribuyó a mejorar la precisión en la identificación de los pesos estáticos por eje al posibilitar la detección y eliminación de los efectos dinámicos del vehículo. Sin embargo, estas metodologías enfrentan ciertos desafíos. En ocasiones, pueden requerir un modelo tridimensional completo de la estructura. Este modelo debe ser lo suficientemente preciso para representar los movimientos dinámicos del puente inducidos por los vehículos, lo que se vuelve complicado y demanda considerables recursos computacionales [16], [26].

Años más tarde, el desarrollo del tema se reactivó en Europa con el proyecto WAVE, financiado por la Comisión Europea. Este proyecto dio origen a la concepción de un sistema de detección sin sensores especiales en el pavimento, lo que elimina la posibilidad de congestiones de tráfico [27]. A partir de ese momento, la investigación ha continuado en diferentes países alrededor del mundo, proponiendo algoritmos novedosos. En la actualidad, la tecnología B-WIM se aplica en aproximadamente 20 países para la recopilación de datos con diversos propósitos, que van desde estudios de tráfico hasta el diseño y la reconstrucción de pavimentos, así como la identificación de vehículos sobrecargados [28], [29].

Yang Yu realizó un trabajo en el 2017, donde identificó un conjunto de picos que indicaban cuando un vehículo entra y sale del puente. Así, la velocidad se detectó con la respuesta global del puente, misma respuesta que serviría para la identificación del peso del vehículo, utilizando los mismos sensores para ambos propósitos [14]. Más adelante, complementó el método de Moses, que no consideraba la posición transversal (PT) del vehículo. Los resultados de esta investigación mostraron una mejora considerable en la precisión para identificar los pesos por eje y el peso total del vehículo al tener en cuenta su PT. Sin embargo, la velocidad se supuso conocida [20].

En Colombia, la metodología BWIM ha sido implementada en un puente de la vía Bogotá-Villavicencio. Este puente fue instrumentado con sensores LVDT y cintas interruptoras, lo que permitía tener información en tiempo real de la velocidad, el número de ejes y la distancia entre ejes de los vehículos que circulaban en cada calzada. Las magnitudes de carga fueron

estimadas comparando, mediante un proceso de convergencia, las líneas de influencia teóricas con respecto a la respuesta experimental [13]. Por otra parte, en el grupo de investigación G-7 de la Universidad del Valle, en 2021, se caracterizaron las cargas vehiculares en un puente de una luz de la ciudad de Cali, utilizando galgas extensiométricas ubicadas bajo el puente para medir deformaciones unitarias en el tablero y en el patín inferior de las vigas. Esta metodología presenta la ventaja de no afectar la funcionalidad del puente ni la velocidad a la que transitan los vehículos [30].

2.2. Componentes y metodologías de un sistema B-WIM

2.2.1. Identificación del vehículo

En el proceso de estimación de las cargas vehiculares en puentes, es esencial la identificación del vehículo, para lo cual se hace necesario obtener información como la velocidad, número de ejes y el espaciamiento entre los ejes de los vehículos. La precisión de los sistemas B-WIM es bastante sensible a la precisión de este tipo de datos [31], porque el algoritmo necesita traducir la información de la respuesta en el tiempo a la posición exacta de cada eje sobre el puente. Además, cuando el eje del vehículo pasa sobre la conexión entre la carretera y el puente, se genera un impacto que induce vibraciones en la estructura, y que depende de la velocidad [15].

La identificación del vehículo es un campo en constante investigación que presenta diferentes posibilidades de mejora en lo que respecta a la configuración del sensor, así como en los métodos de análisis para lograr una identificación precisa de los parámetros del vehículo [32].

Una técnica tradicional para la detección de ejes vehiculares es el uso de cintas interruptoras, compuestas por dos placas metálicas separadas entre sí. Cuando un eje golpea el interruptor de la cinta, las placas de metal se unen, cerrando así un circuito eléctrico y registrando la presencia de un eje. También se emplean tubos neumáticos de carretera que registran la respuesta en una señal eléctrica [31]. No obstante, este tipo de detectores presentan algunas desventajas, como la baja durabilidad y la sensibilidad a las condiciones ambientales [16]. Además, su instalación es intrusiva, ya que requiere el corte del pavimento, lo que puede

ocasionar daños y requiere posteriormente la reparación de la estructura. En la Figura 4 se puede observar una parte del procedimiento de la instrumentación.



Figura 4. Instalación de sensores en la superficie del pavimento [33].

En su lugar, en otras investigaciones como la llevada a cabo por Marín et al. [30], se emplearon las señales de sensores de esfuerzo ubicados bajo la losa de la estructura, que permiten conocer el momento en el que los ejes del vehículo entran y salen del puente. A través de una función de correlación (Ec. 1) [29] encontraron las coincidencias de los picos máximos generados por señales de dos sensores, determinando así el tiempo que tarda el eje de un vehículo en moverse de un punto a otro. Con esta información lograron conocer la velocidad con la que el vehículo lo atravesaba y calcular el espaciamiento entre ejes.

$$corr(f, g)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t + \tau)d\tau \quad \text{Ec. 1}$$

Yu et al. decidieron utilizar la respuesta global del puente para transformarla mediante la transformada de onda Morlet, con la Ec. 2, y de esta forma amplificar los cambios de pendiente en la respuesta generados con la entrada y salida de los ejes sobre el puente [14], [30].

$$W_{\psi}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad \text{Ec. 2}$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad \text{Ec. 3}$$

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde a es el factor de escala; b es el factor de desplazamiento; $s(t)$ es la señal como una función del tiempo y $\psi(t)$ corresponde a la función de onda Morlet.

La Figura 5 muestra los resultados de una señal transformada con onda Morlet, donde se aprecian algunos picos correspondientes a los tres ejes del vehículo durante su entrada y salida del puente. Con la diferencia del tiempo entre cada eje y la longitud del puente conocida, es posible estimar la velocidad del vehículo y, finalmente, determinar el espaciamiento entre los ejes.

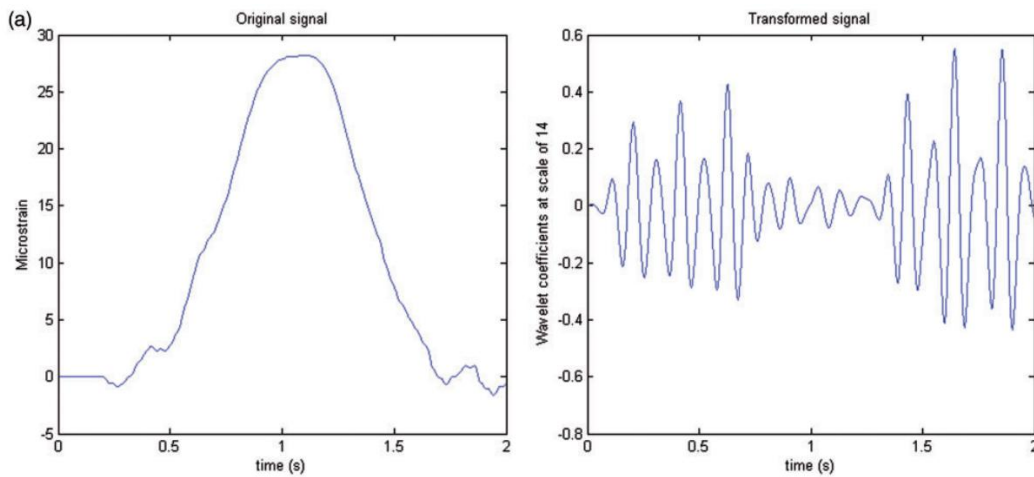


Figura 5. Registro de esfuerzo y su transformada de onda [14].

Por otro lado, Mustafa et al. obtienen la información sobre los ejes utilizando acelerómetros. Los acelerómetros miden la vibración de la estructura, y los picos en los datos de aceleración pueden indicar los tiempos de entrada y salida de los ejes. A partir de los picos identificados y sus tiempos respectivos, se puede determinar la velocidad, el número de ejes y la distancia entre ejes de un vehículo desconocido [34]. De manera alternativa, MacLeod et al., también lo hacen a través de un método de correlación [32]. Este método alternativo calcula la correlación entre dos señales de acelerómetros con un intervalo de tiempo. La posición del pico máximo en la función de correlación establece la variación temporal entre las señales, utilizada posteriormente para determinar la velocidad del vehículo. Los resultados indican que la identificación de estas características se puede realizar con buena exactitud mediante esta técnica. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de la respuesta de aceleración de un vehículo de 5 ejes.

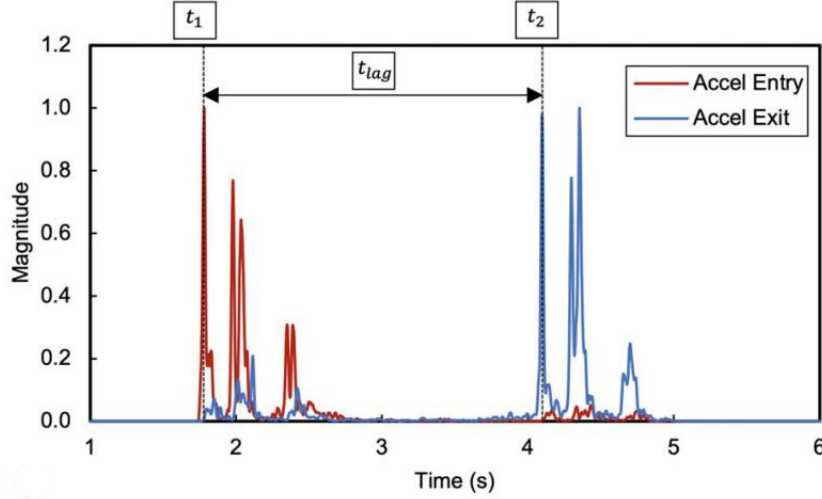


Figura 6. Gráfica de aceleración usada para la estimación de velocidad [32].

Como método alternativo, se ha recurrido también a las imágenes captadas por cámaras, Maduro et al., por ejemplo, lo lograron asumiendo que cada carril de una imagen es paralelo al plano del suelo. Para cada carril rectificado, se obtuvo una imagen que representa el desplazamiento del vehículo como una función de tiempo. Finalmente, se obtiene el perfil de velocidad buscando la mejora del perfil de coincidencia para diferentes tiempos y espacios en cada carril [35]. Jian et al., utilizan un algoritmo de visión por computador basado en una red neuronal para el reconocimiento de los vehículos [36]. Una vez reconocida la posición de los camiones en cada cuadro de video, la velocidad a la que viajan la calcularon mediante la Ec. 5.

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde v es la velocidad del vehículo y ΔS es el desplazamiento del vehículo en un intervalo de tiempo Δt .

2.2.2. Determinación de la carga

En la identificación de la carga, los sistemas comerciales generalmente adoptan el enfoque estático, que busca determinar el peso estático de los ejes, resolviendo la Ec. 6 y Ec. 7.

$$M = FA \quad \text{Ec. 6}$$

$$PBV = \sum_{i=1}^N A_i \quad \text{Ec. 7}$$

Donde A es el peso por eje y PBV el peso bruto del vehículo. F y M son matrices definidas mediante las siguientes ecuaciones.

$$F = [F_{ij}] = \sum_{k=1}^T I_i(k - C_i) I_j(k - C_j) \quad \text{Ec. 8}$$

$$M = [M_j] = \sum_{k=1}^T M_k I_i(k - C_i) \quad \text{Ec. 9}$$

$$C_i = \frac{D_i * f}{v} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde $I_i(k - C_i)$ representa la ordenada de la línea de influencia en la posición del eje i -ésimo en el instante de tiempo k , D_i corresponde a la distancia entre el primer eje y el eje i -ésimo, f es la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición y v es la velocidad constante del vehículo.

Esta metodología asume que la carga móvil causará una flexión en el puente proporcional al producto de la magnitud de la carga y una curva de referencia que representa el comportamiento del puente, conocida como la línea de influencia. Sin embargo, se ha evidenciado que las características de las líneas de influencia, los movimientos dinámicos generados por los vehículos y la presencia de ruido pueden provocar errores significativos en el algoritmo estático convencional [37].

En los últimos diez años, varios investigadores han presentado contribuciones novedosas al análisis de los algoritmos estáticos. O'Brien et al. [38], aplicaron la regularización de Tikhonov al sistema final de ecuaciones empleado para determinar los pesos de los ejes, con el fin de mejorar la precisión de los resultados del peso por eje, que suele ser menor que la del peso bruto del vehículo. Además, esta técnica contribuyó a mitigar el efecto del ruido en la precisión de la identificación. La técnica de Tikhonov es un método de regularización mediante el método de mínimos cuadrados, con la incorporación de un término adicional dependiente de un parámetro de regularización. Para obtener el parámetro óptimo los autores utilizaron el método de la curva-L, que implica la definición de dos normas (Ec. 11 y Ec. 12). El valor óptimo se encuentra en la esquina de la curva, la cual se construye trazando E_{norm}

vs F_{norm} en escala logarítmica. La Figura 7 representa visualmente la configuración típica de dicha curva [26].

$$E_{norm} = \sqrt{(M - TW_{\lambda})^2 (M - TW_{\lambda})} \quad \text{Ec. 11}$$

$$F_{norm} = \sqrt{W_{\lambda}^T W_{\lambda}} \quad \text{Ec.12}$$

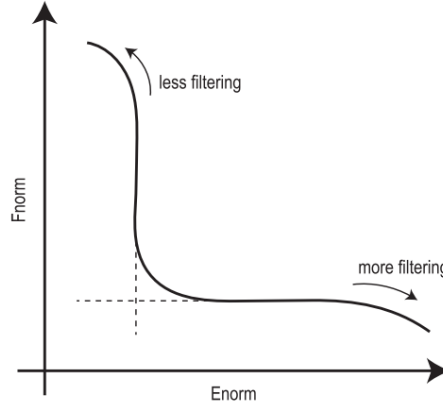


Figura 7. Representación típica de la curva-L en escala doble logarítmica [26], [39].

Ojio y Yamada [40], plantearon un método para determinar el peso de los vehículos, fundamentado en el supuesto de que el área bajo la curva de respuesta puede ser expresada como el resultado de multiplicar el peso bruto del vehículo por el área bajo la línea de influencia. La obtención del área bajo la curva de respuesta se hace integrando numéricamente la respuesta del puente. De esta manera, utilizando un vehículo de calibración con peso conocido, es posible calcular el peso de otro vehículo de peso desconocido mediante la Ec. 13 [16].

$$GVW = A \frac{GVW_c}{A_c} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde GVW es el peso total del vehículo desconocido, A es el área bajo la curva de respuesta del vehículo desconocido, A_c es el área bajo la curva de respuesta del vehículo conocido, y GVW_c el peso total del vehículo conocido. Implementar este último algoritmo es fácil, ya que no requiere de la identificación de la velocidad o el espaciamiento entre ejes de los vehículos. Sin embargo, una de las desventajas asociadas es la dificultad para identificar el peso de los ejes individuales [16].

Por otra parte, en el algoritmo de Moses no se considera la posición transversal de los ejes de un vehículo. Diversas investigaciones indican que la precisión de esta metodología se ve afectada por dicho factor. Para abordar esta limitación, autores como Yu et al. han desarrollado algoritmos bidimensionales donde abordan el concepto de superficie de influencia (SI) en lugar de línea de influencia. Se hace una interpolación para formar una SI continua utilizando las líneas de influencia (LI) calibradas en campo obtenidas para diferentes posiciones transversales [20]. Un método para construir la SI es presentado por Obrien et. al. [43], donde utilizan un método matricial que permite obtener ordenadas de influencia directamente a partir de mediciones de la respuesta estructural ante el paso de un vehículo de calibración con pesos por eje conocidos. El efecto de carga teórico en un instante k está dado por la Ec. 14:

$$LT_k = \sum_{i=1}^N A_i * I_{k-ci} \quad \text{Ec.14}$$

Donde A_i es el peso del eje i y I la ordenada de la influencia en la posición correspondiente. Para determinar las ordenadas de influencia, se plantea la minimización de la función de error entre la respuesta medida (LM_k) y la calculada (LT_k):

$$E = \sum_{k=1}^K [LM_k * LT_k]^2 \quad \text{Ec.15}$$

Aplicando la condición de mínimo, el problema se representa mediante el sistema matricial de la Ec.16.

$$W_{K-C_n, K-C_n} * I_{K-C_n, 1} = \varepsilon_{K-C_n, 1} \quad \text{Ec.16}$$

Donde W es una matriz simétrica definida positiva, con entradas dependientes de los productos $A_i * A_j$, I es el vector de influencia a determinar, ε es un vector que combina las mediciones de respuesta con los pesos por eje, K el número total de registros y C_n indica la separación temporal entre el primer y último eje.

De manera diferente, Žnidarič et al. [41] consideran la posición transversal del vehículo sin la necesidad de una superficie de influencia. Proponen el uso de franjas, con la intención de

agrupar los sensores en grupos para cada carril. Al sumar las deformaciones dentro de cada grupo se puede obtener información adicional sobre la distribución de la carga [16].

De manera simplificada, Zolghadri et al., en su estudio, utilizaron un camión de calibración para resolver las ecuaciones matemáticas y obtener una línea de influencia. Los datos resultantes se utilizaron para ajustar un modelo de elementos finitos (EF). Posteriormente, dicho modelo se empleó para calcular la SI del puente. De esta manera, no fue necesario resolver ecuaciones basadas en el número de ejes, la distancia entre ejes o los pesos de los ejes. Además, el uso del modelo FE calibrado permitió calcular la SI en cualquier punto del puente sin requerir una gran cantidad de sensores [42].

2.2.3. Arreglo de los sensores en el puente

En la implementación de las diferentes metodologías, la adquisición de datos es un factor fundamental. La precisión de las mediciones también estará condicionada por un apropiado arreglo de los sensores. Una óptima ubicación dependerá de factores como el tipo y estado de la estructura, así como la función que tengan los sensores. Por lo que, el plan de instalación de los instrumentos debe determinarse para un caso en específico [16].

Los sensores de pesaje miden la deformación global causada por los vehículos y, por lo tanto, suelen ser instalados en lugares donde las respuestas son más pronunciadas, como en la mitad del tramo del puente. En el caso de estructuras de puentes más complejas, la ubicación de los sensores puede ser establecida mediante un análisis de elementos finitos preliminar. Aun así, Yang Yu et al. [16] han resumido para un esquema general de disposición de sensores con base en las prácticas BWIM existentes para algunos puentes comunes, mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1. Esquema general de disposición de sensores. Modificado de [16].

Tipo de puente	Sensores de pesaje		Sensores de detección de ejes	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
De tablero ortotrópico	Centro del tramo	Parte inferior del refuerzo longitudinal	Una sección alejada del centro del tramo	Parte inferior del refuerzo longitudinal
De losa integral		Parte inferior de la losa	Dos líneas de sensores a dos secciones del centro del tramo	Parte inferior de la losa
Viga-losa		Parte inferior de la viga		Parte inferior de la losa

3. MODELO NUMÉRICO Y EVALUACIÓN ANALÍTICA

3.1. Descripción del caso de estudio

La estructura seleccionada como caso de estudio es un puente vehicular urbano localizado al sur de la ciudad de Cali, Colombia. Específicamente, el puente se encuentra sobre la Calle 16, entre las Carreras 102 y 103, y cumple una función estratégica atendiendo el flujo de tráfico en el sentido norte-sur de la ciudad. En la Figura 8 se presenta la ubicación del puente y una vista panorámica de la estructura.

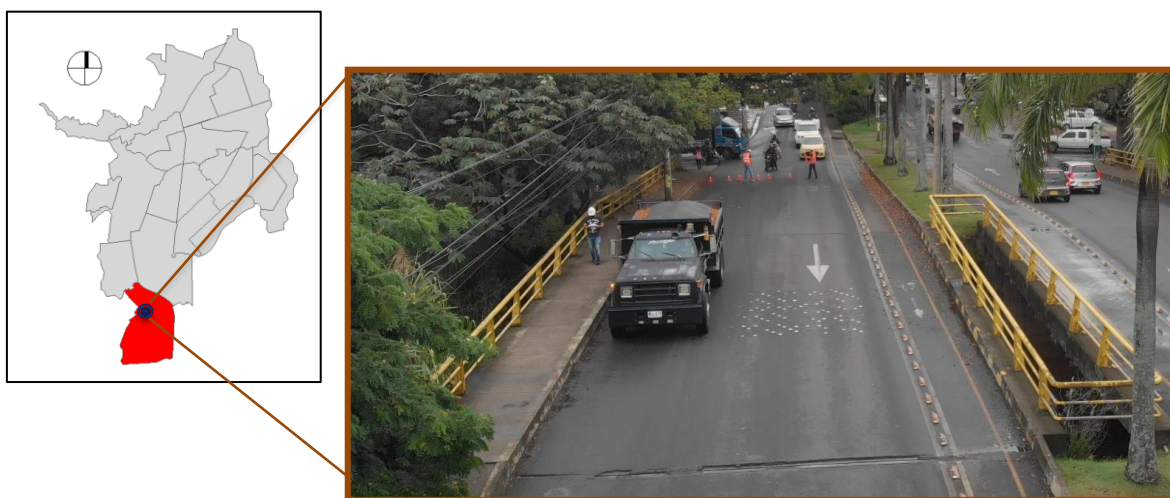
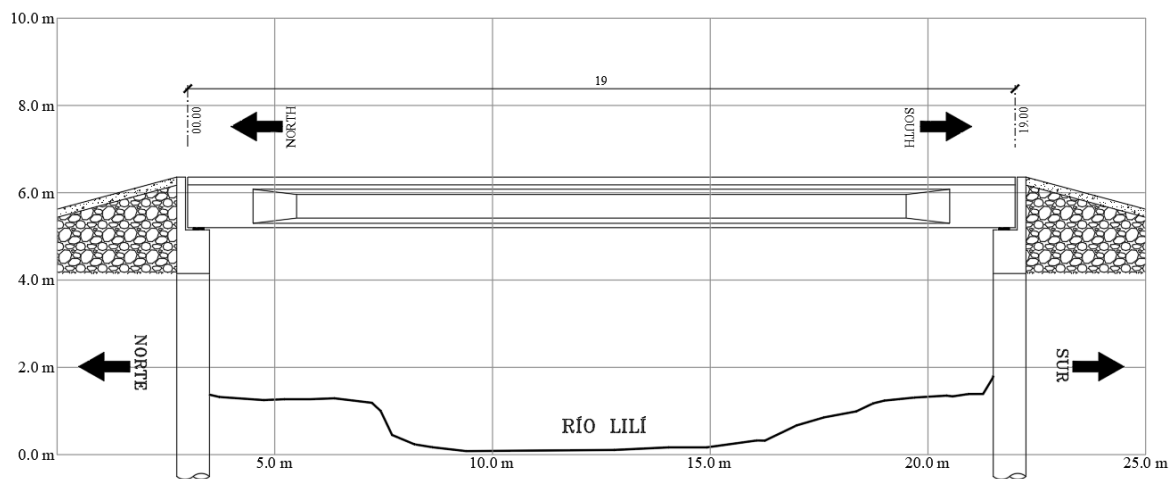


Figura 8. Ubicación del puente de estudio. (Fuente: Michael Bolaños 2021).

Se trata de una estructura de un solo tramo, simplemente apoyada, con una luz libre de 18 metros y una longitud total de 19 metros. La superestructura está conformada por un sistema de siete vigas de concreto preesforzado de sección tipo I, sobre las cuales se apoya una losa de concreto prefabricada. El tablero del puente cuenta con dos carriles de circulación vehicular, una ciclorruta y una acera peatonal. Las vigas se apoyan sobre elementos de neopreno, con un ancho de 50 cm aproximadamente y un espesor que varía entre 3 y 5 cm. Una característica relevante de la estructura es su pendiente de acceso, con una inclinación del 8% [15], que puede influir significativamente en la interacción dinámica vehículo-puente. A continuación, se presenta una vista general del puente donde se distingue parcialmente esta pendiente, junto con un esquema del perfil completo de la estructura (Figura 9). En la Figura 10 se muestra la subestructura del puente.



(a) Vista general del puente.



(b) Perfil completo del puente. Modificado de [15]

Figura 9. Pendiente de acceso al puente. (a) Vista general; (b) Perfil completo.



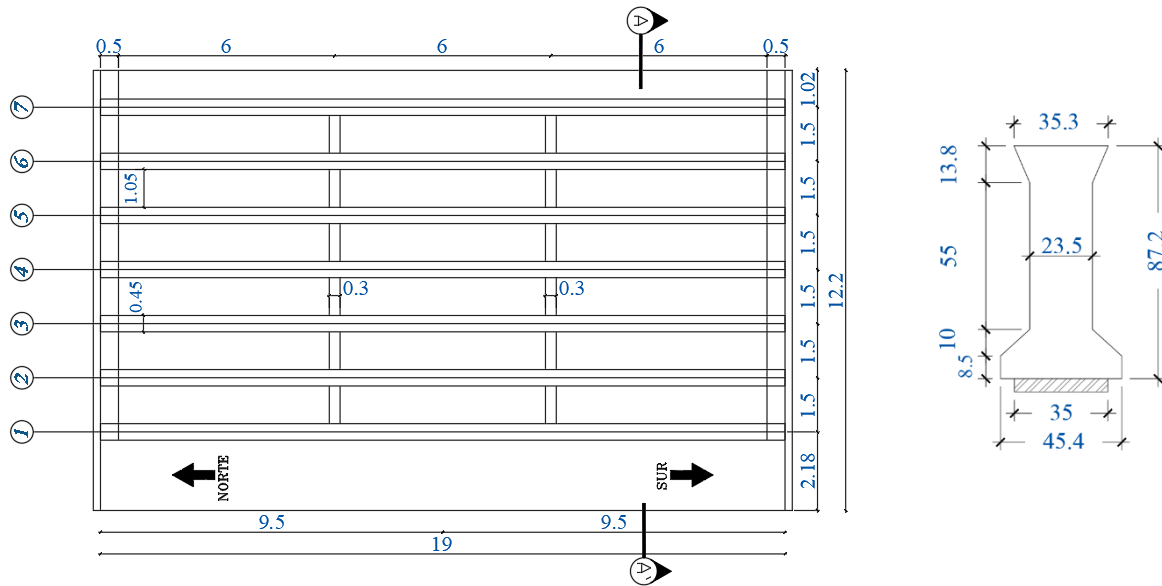
Figura 10. Subestructura del puente [15].

La estructura presenta un estado de deterioro visible. En una inspección visual previa [15], se identificaron múltiples patologías, como el desprendimiento de concreto en las alas inferiores de las vigas y una concentración de fisuras en la zona central de la luz. Se observó que algunos tramos de las riostras intermedias no se fundieron de manera recta entre las vigas. Además, la superficie de rodadura presenta alta rugosidad, como se puede apreciar en la Figura 11, y se evidencian manchas por humedad en vigas, riostras y estribos.



Figura 11. Rugosidad en la superficie de rodadura.

La elección de este puente fue motivada por ventajas logísticas y académicas. Sobre este puente se han adelantado estudios de monitoreo previos por parte de la Universidad del Valle, lo que facilitó el acceso a información valiosa para el desarrollo del proyecto. Adicionalmente, su cercanía a la sala de monitoreo de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad y la presencia de una estación de policía al costado, simplificaron el trabajo y aportaron a la seguridad del sistema de monitoreo instalado. En la Figura 12 se ilustra un esquema general de la estructura.



Corte A-A:

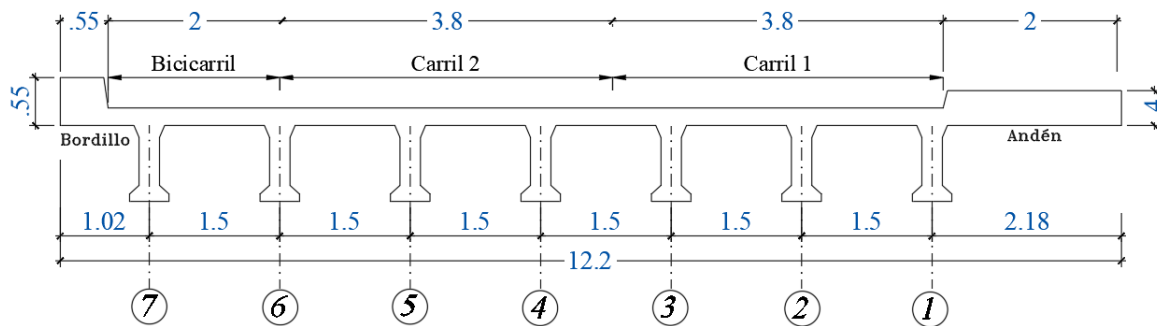


Figura 12. Esquema de la vista en planta y elevación, y viga tipo del puente. Modificado de [15]

3.2. Descripción del modelo numérico de referencia

La componente analítica de este estudio se fundamenta en un modelo numérico tridimensional del puente, desarrollado y calibrado previamente por [15], el cual fue construido en el software de elementos finitos SAP2000. La geometría del modelo se basó en un levantamiento de la estructura, representando sus componentes principales mediante elementos de área tipo Shell-Thin. Específicamente, se utilizaron cuatro elementos para modelar cada una de las siete vigas, y elementos únicos para representar el tablero, el andén y el bordillo.

La calibración de este modelo de referencia se basó en las propiedades dinámicas del puente. Para ello, [15] realizó ensayos de vibración ambiental y analizó los registros obtenidos mediante procesamiento digital de señales. Se aplicaron técnicas de identificación modal, como la Identificación Estocástica de Subespacios (SSI), para determinar las frecuencias operacionales, los modos de vibración y las razones de amortiguamiento de la estructura. Las principales propiedades dinámicas identificadas experimentalmente se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. *Propiedades dinámicas identificadas.*

Modo	f_n [Hz]	ζ [%]
1	5.90	1.93
2	6.21	2.98
3	7.80	3.15
4	11.55	3.19
5	14.83	0.86
6	16.44	1.42
7	21.90	2.34

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de ajuste del modelo mediante un algoritmo de optimización. Dicho algoritmo modificó sistemáticamente un conjunto de parámetros de ajuste, incluyendo la rigidez de los apoyos, los espesores de elementos que no se midieron (losa, andén, bordillo) y las propiedades de los materiales (módulo de elasticidad y peso propio). El objetivo del proceso fue minimizar una función objetivo que incluye el error relativo entre las frecuencias naturales experimentales y las del modelo, y el MAC (Criterio de aseguramiento modal), una medida estadística para cuantificar la correlación entre los modos de vibración. La representación gráfica del modelo resultante se presenta en la Figura 13.

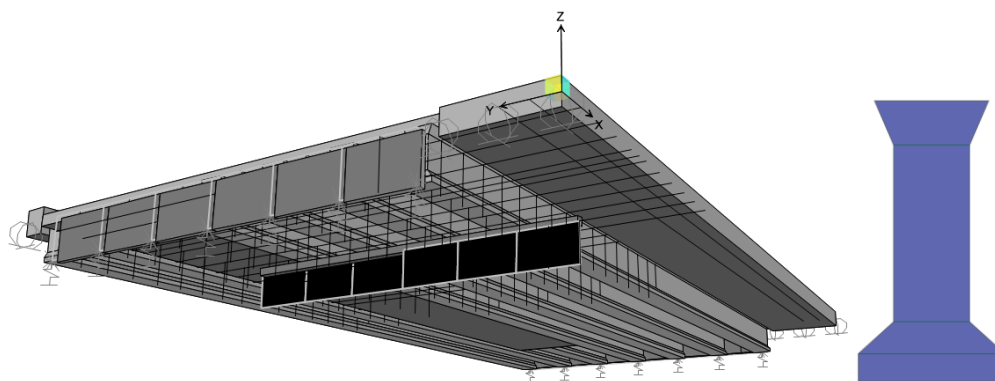


Figura 13. Modelo numérico y viga tipo.

3.3. Simulación de escenarios de carga vehicular

Utilizando el modelo de elementos finitos calibrado, se realizó una serie de simulaciones numéricas con el objetivo de evaluar el comportamiento dinámico del puente y verificar la efectividad de los algoritmos de pesaje bajo diferentes condiciones operacionales.

Se definieron cuatro tipologías de vehículos para el análisis. Tres de ellas corresponden a configuraciones de camiones de transporte comunes en las carreteras del país: un vehículo de dos ejes (C2) y dos vehículos de tres ejes con configuración tándem (C3). Adicionalmente, se incluyó un vehículo de seis ejes (C6), porque se ha identificado, mediante el sistema de monitoreo visual, la circulación constante de este tipo de vehículos por la zona [44]. Las características geométricas y de carga de cada vehículo simulado se detallan en la Tabla 3 y en la Figura 14 se presentan los esquemas correspondientes.

Tabla 3. Especificaciones de los vehículos simulados

Tipo de vehículo	Configuración de ejes	Peso por eje [Ton]	Peso bruto [Ton]	Distancia entre ejes [m]
C2	2 ejes	4 - 13	17	4.5
C3-1	3 ejes (tándem trasero)	8 - 11 - 11	30	3.7 - 1.45
C3-2	3 ejes (tándem trasero)	7 - 12 - 14	33	3.9 - 1.75
C6	6 ejes	5 - 9 - 9 - 12 - 12 - 14	61	3.2 - 1.4 - 5 - 1.4 - 1.4

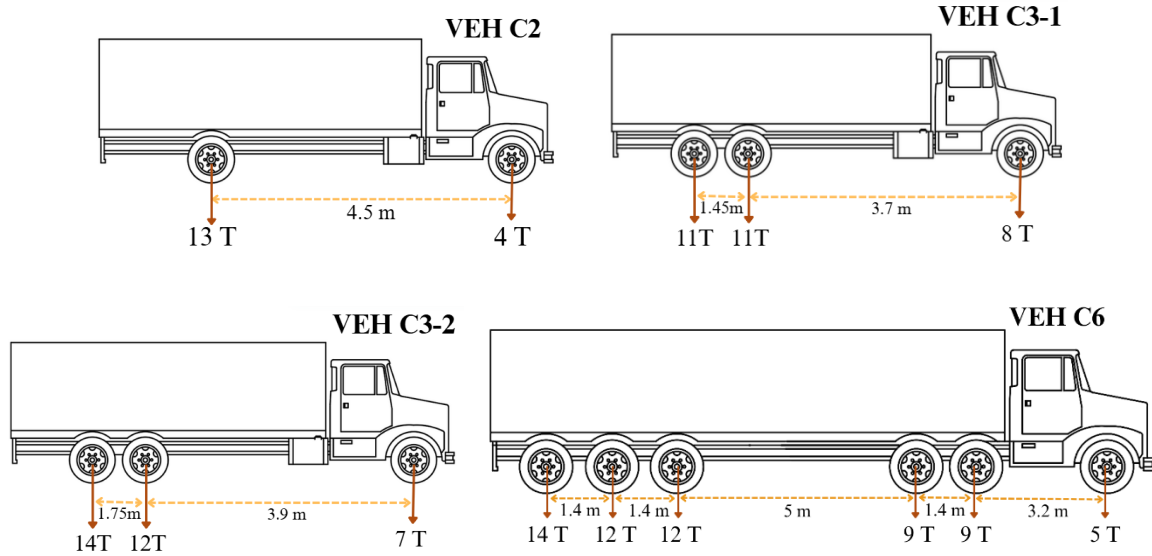


Figura 14. Tipo de vehículos simulados.

Se ejecutaron análisis dinámicos de historia en el tiempo (*Time History Analysis*) que simulaban el paso de los vehículos por el puente. Se diseñó una matriz de escenarios variando la velocidad y la posición transversal, considerando cuatro velocidades (7.2, 18, 36 y 54 km/h) y para cada una de ellas tres trayectorias transversales: una cercana al andén (alineada con la viga V2), una en la posición central de los carriles (entre las vigas V3 y V4) y una cercana al bordillo (alineada con la viga V5). En total, resultaron 48 escenarios de carga dinámica. Una representación gráfica de la posición transversal se presenta en la Figura 15.

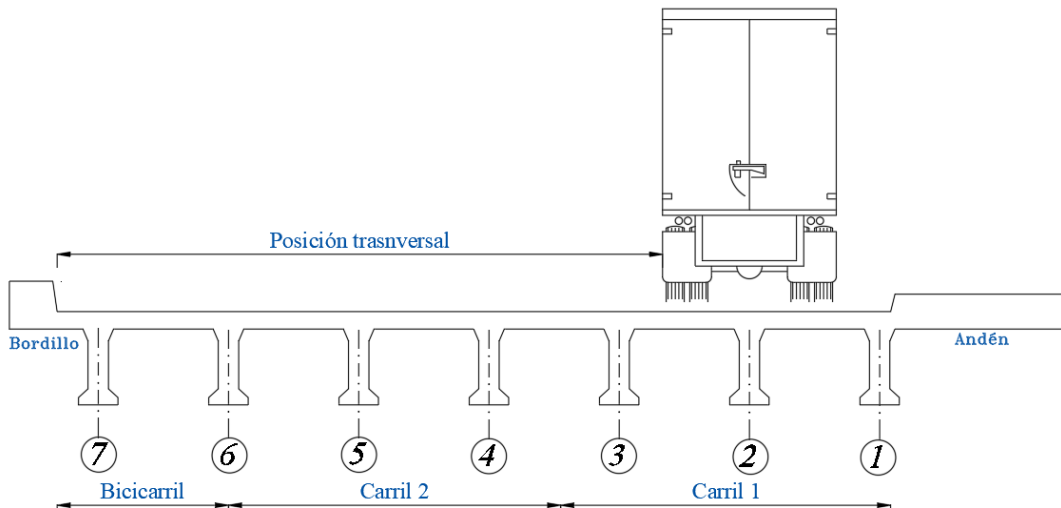


Figura 15. Posición transversal de la carga simulada.

3.4. Relación carga-respuesta analítica

Para establecer la relación teórica entre la carga aplicada y la respuesta estructural en el modelo numérico, se utilizó el concepto de superficie de influencia. Esta superficie permite determinar el efecto que una carga unitaria produce en un punto de interés de la estructura, en función de su posición longitudinal y transversal sobre el tablero del puente, a partir de la Ec. 11.

La construcción de la SI se basó en la metodología matricial propuesta por O'Brien et al. [43], descrita anteriormente. Para ello, se simuló el paso de un vehículo de calibración de dos ejes y 20 toneladas (con una distribución de 5 y 15 toneladas por eje) a una velocidad de 1 m/s. Se registró la respuesta de desplazamiento vertical en el centro de la luz de las siete vigas, ya que esta es la zona donde se presenta la máxima deflexión.

Se inició simulando el paso del vehículo de calibración a lo largo de tres trayectorias transversales: una cercana al andén (sobre la viga V2), una en la posición central (entre las vigas V3 y V4) y una cercana al bordillo (sobre la viga V5). A partir de la respuesta obtenida en estas tres simulaciones, se calcularon las líneas de influencia correspondientes para las 7 vigas. Posteriormente, mediante un proceso de interpolación espacial, se generó la respuesta para 25 posiciones transversales equidistantes a lo ancho del tablero, que se utilizaron para construir una SI continua, siguiendo la Ec. 13.

La Figura 16 muestra un ejemplo de las áreas de influencia generadas para las vigas 1 y 4 del modelo. Las correspondientes a las demás vigas se adjuntan en los anexos.

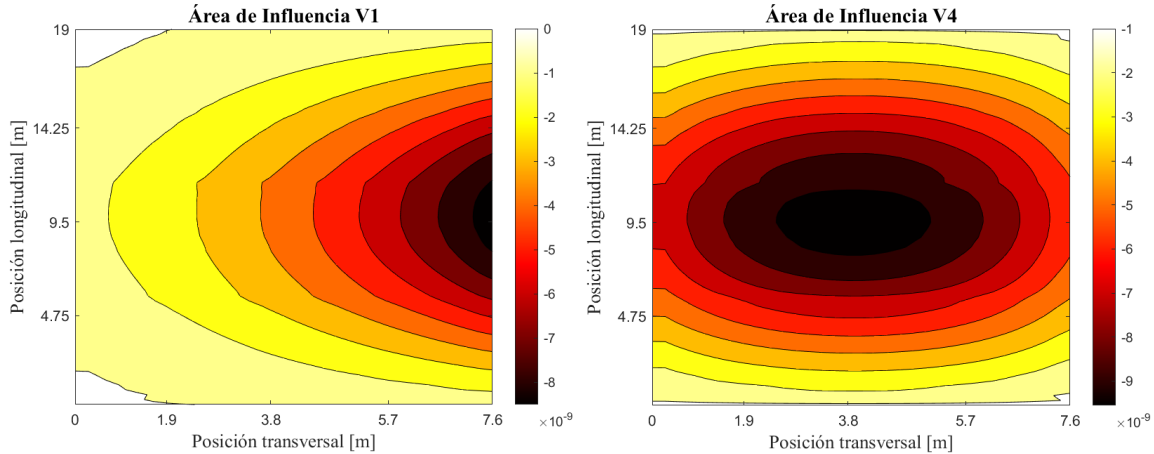


Figura 16. Mapas de contorno del área de influencia de las vigas 1 y 4 (Unidades en m/N).

En cada mapa de contorno se aprecia la variación de la respuesta estructural en función de la posición longitudinal y transversal de la carga sobre el puente, esta última definida como la distancia desde el punto donde termina el bordillo hasta la primera llanta del vehículo. Las zonas más oscuras indican dónde la influencia de la carga es mayor. Se observa que en las vigas 1 y 7, ubicadas en los extremos, la respuesta se concentra hacia un costado, mientras que en la viga 4, la distribución es más simétrica respecto a la posición transversal, con máximos valores en la zona media. Esto también permite identificar las zonas del tablero más sensibles al paso de las cargas, información clave para definir los puntos a instrumentar.

3.5. Evaluación analítica del sistema de pesaje

Se realizó un análisis paramétrico a partir de las simulaciones numéricas con el propósito de evaluar la sensibilidad del algoritmo de pesaje ante distintas condiciones, y utilizar los resultados para proponer una configuración de sensores para su implementación en campo.

3.5.1. Análisis de sensibilidad del proceso de estimación

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo utilizando el conjunto de escenarios de carga previamente definidos, variando la magnitud y posición transversal de la carga, la tipología vehicular, y la velocidad de circulación. Para los cálculos se adquirieron los registros de la aceleración vertical en los patines superiores de todas las vigas, en el centro de la luz y a lo

largo del tablero, a fin de evaluar cómo varía la estimación dependiendo de la ubicación del sensor. Se compararon respuestas al simular el muestreo a 250 Hz y 500 Hz, sin encontrar diferencias significativas en la capacidad para identificar los picos de los ejes. Así que, se decidió que con una frecuencia de 250 Hz es suficiente para capturar adecuadamente los eventos dinámicos. Un esquema de los puntos de adquisición analizados se presenta en la Figura 17.

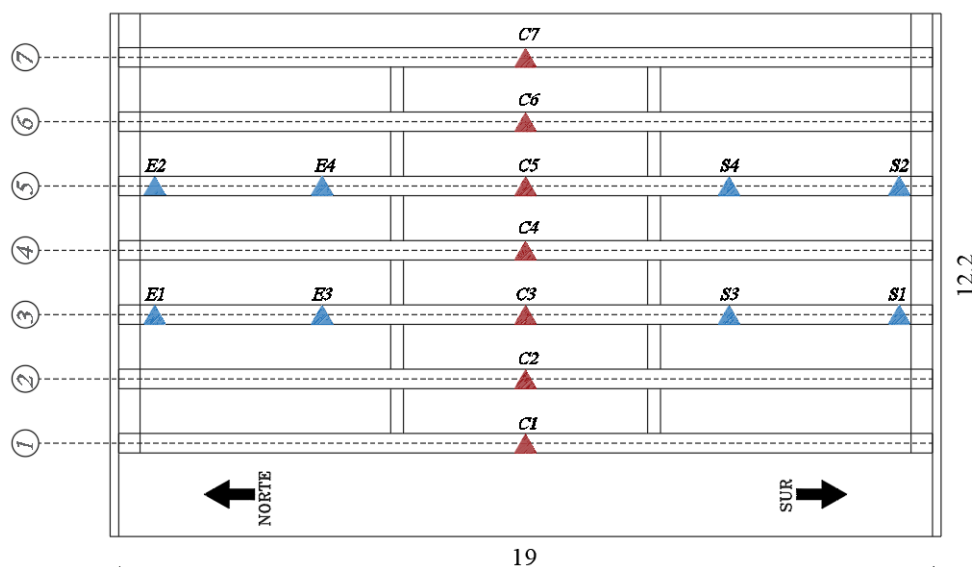


Figura 17. Puntos de adquisición para el análisis de sensibilidad.

▪ Influencia de la ubicación del sensor en la identificación vehicular

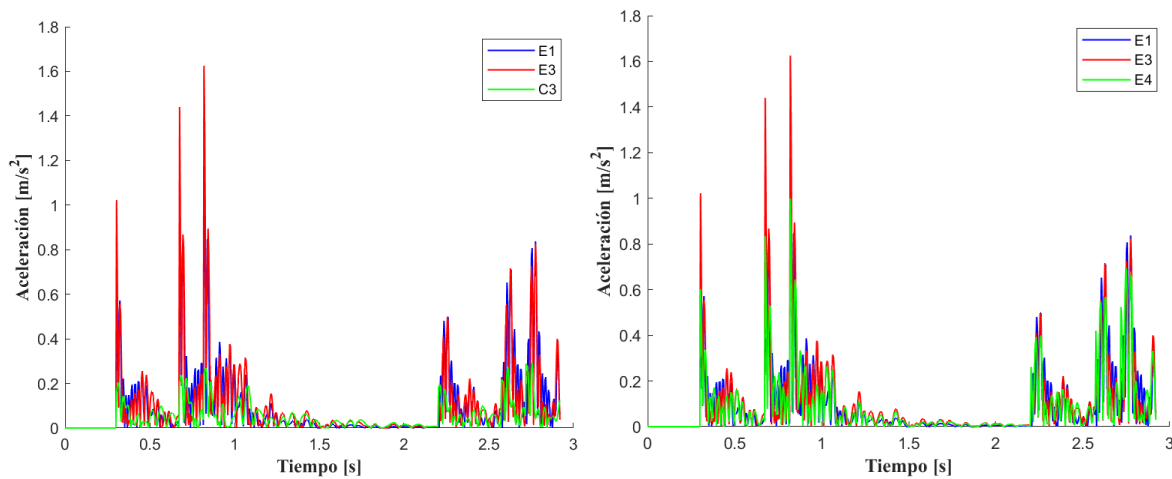
Para determinar los puntos a utilizar en la identificación de ejes, se analizaron las señales de los diferentes registros de la entrada y la salida, aplicando previamente un filtro paso alto con una frecuencia de corte a 21 Hz (correspondiente a la frecuencia más alta identificada experimentalmente) para atenuar los componentes de las frecuencias asociadas al movimiento natural de la estructura y resaltar los picos generados por el paso de los ejes.

En las siguientes figuras se muestra la comparación gráfica de las respuestas en valor absoluto de uno de los escenarios de carga de un vehículo de tres ejes, donde el camión C3-1 circula a 36 km/h alineado sobre la viga 2. La Figura 18 (a) incluye los registros en los puntos longitudinales de la entrada E1, E3 y C3, ubicados sobre la viga más cercana en la trayectoria del vehículo. Se observa que las respuestas con picos más definidos son las de los

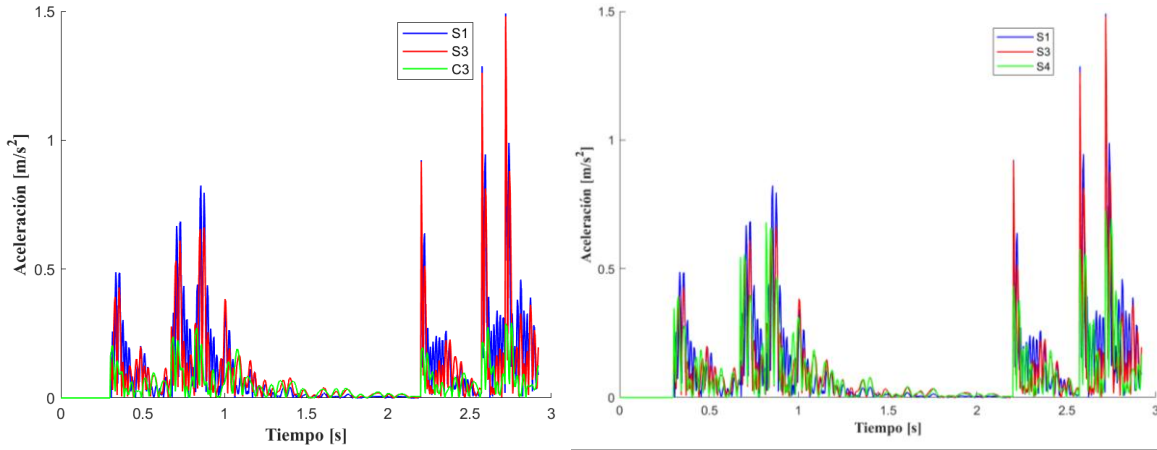
puntos E1 y E3, siendo este último el que registra mayor magnitud. En la segunda gráfica, se comparan estos dos puntos con la respuesta de un sensor en una viga más alejada (E4) y es evidente que la magnitud de los picos en este punto más lejano es menor.

Similar es el comportamiento en los registros de la zona de la salida (Figura 18 (b)). Los puntos S1 y S3 presentan picos más claros y de mayor magnitud en comparación con un punto en el centro del vano (C3) o con otro en la misma posición longitudinal, pero en una viga más alejada (S4).

De esta manera, se infiere que se registran mejores respuestas cuanto más cercano sea el punto a la posición transversal de la carga. También, se observa que los puntos ubicados exactamente en los apoyos (E1 y S1) no siempre capturan los picos más altos, y que puntos centrales como (C3) tampoco son óptimos porque las señales son menos claras debido a las vibraciones inducidas por la interacción vehículo-puente. Por lo tanto, se concluye que puntos intermedios cercanos a los apoyos, son la mejor opción para realizar la identificación en este caso de estudio.



(a) Señales de la entrada



(a) Señales de la salida

Figura 18. Respuesta absoluta en aceleración: (a) Señales de la entrada; (b) Señales de la salida.

Una vez seleccionadas las señales de los puntos óptimos, que para este escenario son E3 y S1, mostradas en la Figura 19, se realiza la identificación de los parámetros del vehículo. El método para hacerlo fue el pico a pico, empleado por Mustafa et. al [34]. Los cálculos se basan en la relación fundamental de movimiento (Ec. 17). La velocidad se calcula a partir del retardo temporal entre los picos de ambas señales ($t_4 - t_3$), generados al entrar y salir del puente, y la distancia conocida de recorrido. Posteriormente, con la velocidad calculada, se determina el espaciamiento entre los ejes a partir de los intervalos de tiempo entre los picos consecutivos de una de las señales ($t_3 - t_2$), correspondientes al impacto de cada eje. Los resultados de la identificación vehicular para los diferentes escenarios se presentarán más adelante.

$$x = v * t \quad \text{Ec. 17}$$

Donde, x representa la distancia recorrida, v la velocidad y t el tiempo empleado.

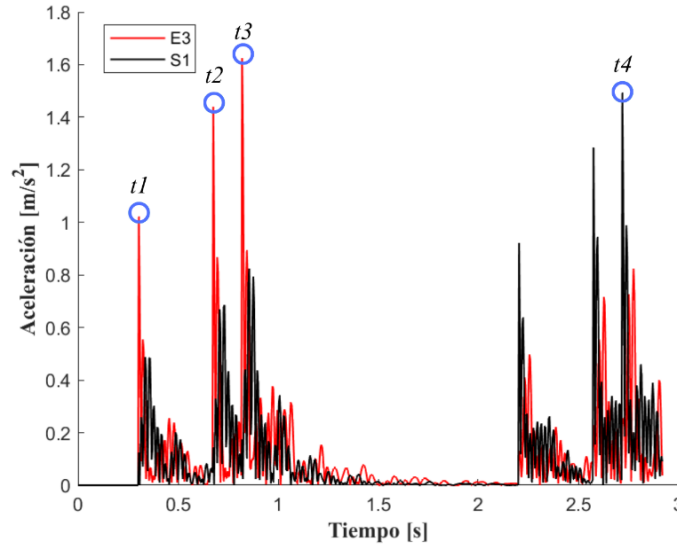


Figura 19. Identificación del vehículo.

▪ Influencia de la posición transversal en la estimación del peso

Se analizó la influencia de la posición del punto de registro sobre la estimación del peso, evaluando los resultados obtenidos en el centro de la luz en cada viga para un mismo vehículo y escenario de carga. Con la identificación del vehículo, y usando la SI, se estimó el peso por eje y el PBV, partiendo de la Ec. 6. En las Tablas 4 y 5 se presentan los resultados obtenidos para dos trayectorias transversales distintas. La Tabla 4 corresponde al vehículo circulando sobre la viga 2 y la Tabla 5 corresponde a una trayectoria entre las vigas 3 y 4. La Figura 20 representa gráficamente los errores en la estimación del PBV para cada punto de registro. El vehículo simulado fue el C3-2, circulando a 18 km/h, conforme a la caracterización mostrada en la Tabla 3.

Los resultados muestran cierta sensibilidad del sistema a la posición transversal del punto de registro. En el escenario de circulación sobre la viga V2, se observan errores muy bajos en los sensores más cercanos a la trayectoria de la carga, mientras que en vigas más alejadas los errores aumentan, alcanzando valores superiores al 10 % en algunos casos. En el segundo caso, para el recorrido entre las vigas V3 y V4, el promedio de error para el PBV es ligeramente inferior, aunque se mantiene la tendencia de que los puntos más próximos a la trayectoria registran estimaciones más precisas.

Tabla 4. Estimación de peso para un recorrido sobre la viga 2.

Sensor	Peso Eje 1 [Ton]	Peso Eje 2 [Ton]	Peso Eje 3 [Ton]	PBV [Ton]	Error Eje 1 [%]	Error Eje 2 [%]	Error Eje 3 [%]	Error PBV [%]
V1	7.33	12.18	15.27	34.78	4.71	1.50	1.50	5.39
V2	6.88	11.89	14.16	32.93	1.71	0.93	0.93	0.23
V3	6.59	11.30	14.05	31.94	5.86	5.83	5.83	3.21
V4	6.47	10.65	13.47	30.59	7.57	11.25	11.25	7.30
V5	6.24	10.27	12.94	29.45	10.86	14.42	14.42	10.76
V6	6.36	10.55	13.13	30.04	9.14	12.08	12.08	8.97
V7	6.81	11.78	14.25	32.84	2.71	1.83	1.83	0.48
Promedio								5.19

Tabla 5. Estimación de peso para un recorrido entre carriles.

Sensor	Peso Eje 1 [Ton]	Peso Eje 2 [Ton]	Peso Eje 3 [Ton]	PBV [Ton]	Error Eje 1 [%]	Error Eje 2 [%]	Error Eje 3 [%]	Error PBV [%]
V1	7.51	12.53	15.64	35.68	7.29	4.42	11.71	8.12
V2	7.24	12.00	15.14	34.38	3.43	0.00	8.14	4.18
V3	7.09	11.66	14.78	33.53	1.29	2.83	5.57	1.61
V4	6.91	11.99	13.91	32.81	1.29	0.08	0.64	0.58
V5	6.81	11.11	14.21	32.13	2.71	7.42	1.50	2.64
V6	6.63	10.71	13.83	31.17	5.29	10.75	1.21	5.55
V7	6.56	13.84	14.96	35.36	6.29	15.33	6.86	7.15
Promedio								4.23

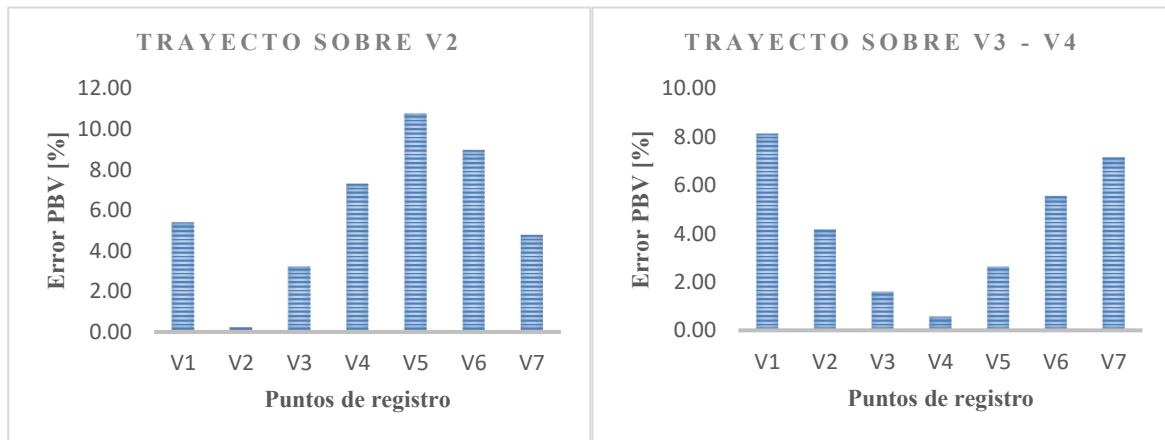


Figura 20. Error de identificación según los puntos de registros.

En general, los resultados confirman que la proximidad transversal del sensor a la trayectoria de la carga mejora la exactitud del cálculo de peso, mientras que sensores ubicados en vigas alejadas tienden a sobreestimar o subestimar los valores, incrementando el error relativo. Por

lo tanto, será necesario captar la respuesta en diferentes zonas transversales para reducir la incertidumbre en las estimaciones

- **Influencia de la identificación vehicular en la estimación de la carga**

Según lo anterior, para todos los escenarios simulados se identificaron los parámetros del vehículo, y su peso por eje y PBV, en los puntos óptimos seleccionados. Estos puntos corresponden a las ubicaciones que presentaron picos más definidos y menor error relativo en la estimación del PBV.

En las Tablas 6 a 9 se presenta un resumen de los resultados para algunos escenarios de los diferentes vehículos. Los datos completos de las simulaciones se incluyen en los anexos.

Tabla 6. Resultados de pesaje para el VEH C2

VEH C2		Valores Identificados					%Error				
Velocidad [km/h]	PT	Vel. [km/h]	X_ejes [m]	P1 [Ton]	P2 [Ton]	PBV [Ton]	Vel.	X_ejes	P1	P2	PBV
7.20	Centro	7.20	4.50	3.95	12.96	16.91	0.00	0.00	1.23	0.30	0.52
18.00	V2	18.00	4.52	3.98	12.99	16.97	0.00	0.44	0.56	0.07	0.19
36.00	V5	36.00	4.52	3.89	13.06	16.95	0.00	0.44	2.75	0.48	0.28
54.00	V2	53.93	4.49	3.59	13.34	16.93	0.13	0.22	10.30	2.61	0.43

Tabla 7. Resultados de pesaje para el VEH C3-1

VEH C3_1		Valores Identificados							%Error						
Vel. [km/h]	PT.	Vel. [km/h]	X1_ejes [m]	X2_ejes [m]	P1 [Ton]	P2 [Ton]	P3 [Ton]	PBV [Ton]	Vel.	X1_ejes	X2_ejes	P1	P2	P3	PBV
7.20	V2	7.20	3.70	1.44	7.93	11.06	10.91	29.89	0.00	0.00	0.69	0.94	0.51	0.84	0.37
18.00	V5	18.00	3.72	1.44	7.86	11.24	10.80	29.90	0.00	0.54	0.69	1.78	2.17	1.82	0.34
36.00	Centro	36.00	3.72	1.44	7.59	11.68	10.55	29.82	0.00	0.54	0.69	5.09	6.20	4.14	0.60
54.00	V5	53.93	3.72	1.44	7.45	11.67	10.80	29.91	0.13	0.43	0.69	6.91	6.08	1.85	0.29

Tabla 8. Resultados de pesaje para el VEH C3-2

VEH C3_2		Valores Identificados							%Error						
Vel. [km/h]	PT	Vel. [km/h]	X1_ejes [m]	X2_ejes [m]	P1 [Ton]	P2 [Ton]	P3 [Ton]	PBV [Ton]	Vel.	X1_ejes	X2_ejes	P1	P2	P3	PBV
7.20	V5	7.20	3.90	1.75	6.99	11.83	14.11	32.93	0.00	0.00	0.00	0.17	1.39	0.77	0.22
18.00	Centro	18.00	3.92	1.74	6.92	12.00	13.91	32.83	0.00	0.51	0.57	1.19	0.03	0.61	0.52
36.00	V2	36.07	3.93	1.80	6.55	13.37	12.95	32.88	0.20	0.77	2.86	6.41	11.42	7.47	0.38
54.00	V5	53.93	3.92	1.81	6.39	13.49	12.97	32.84	0.10	0.5	3.40	8.77	12.39	7.39	0.49

Tabla 9. Resultados de pesaje para el VEH C6

VEH C6														
Vel. [km/h]	PT	Valores Identificados												
		Vel. [km/h]	X1_ejes [m]	X2_ejes [m]	X3_ejes [m]	X4_ejes [m]	X5_ejes [m]	P1 [Ton]	P2 [Ton]	P3 [Ton]	P4 [Ton]	P5 [Ton]	P6 [Ton]	PBV [Ton]
7.2	Centro	7.2	3.20	1.40	5.00	1.40	1.40	4.97	8.96	8.94	11.90	11.95	13.96	60.67
18	V2	18.0	3.20	1.40	5.00	1.40	1.40	4.86	9.14	8.90	11.99	11.56	14.42	60.86
36	V5	36.0	3.20	1.40	5.00	1.40	1.40	4.72	9.74	8.16	12.43	11.14	14.63	60.81
54	V2	54.1	3.19	1.44	4.99	1.38	1.38	4.86	9.51	8.01	10.87	16.30	10.92	60.47

%Error												
Vel.	X1_ejes	X2_ejes	X3_ejes	X4_ejes	X5_ejes	P1	P2	P3	P4	P5	P6	PBV
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.44	0.71	0.80	0.45	0.31	0.53
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.79	1.57	1.12	0.12	3.68	2.96	0.23
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.64	8.23	9.36	3.61	7.21	4.49	0.31
0.20	0.31	3.14	0.20	1.43	1.43	2.78	5.62	11.01	9.41	35.83	21.97	0.87

En general, la identificación de parámetros del vehículo se logró con alta precisión, con errores inferiores al 3%. Se observó una ligera tendencia al aumento del error en condiciones de mayor velocidad (54 km/h), especialmente para las configuraciones de más ejes, como el vehículo C6. Esto sucede porque, a mayor velocidad el ruido se intensifica y afecta en mayor medida la señal. Aun así, los errores se mantienen en valores bajos, demostrando que el método, en teoría, es aplicable en diferentes condiciones de velocidad.

En cuanto a la influencia de la identificación de ejes en la estimación del peso por eje, el análisis representado en el gráfico de dispersión de la Figura 21 muestra que, aunque la tendencia no es estrictamente lineal, cuanto mayor es el porcentaje de error, la sensibilidad aumenta y es más probable que se presenten incrementos en los errores de peso por eje. Esto se debe a que el algoritmo necesita conocer con exactitud dónde están los ejes, para asignar el peso correcto a cada uno.

Para errores en la distancia entre ejes menores al 1%, los errores en el peso se mantienen generalmente bajos (por debajo del 13%). Por encima de este punto, aparecen errores cercanos al 15%, lo que evidencia la sensibilidad del algoritmo a este parámetro.

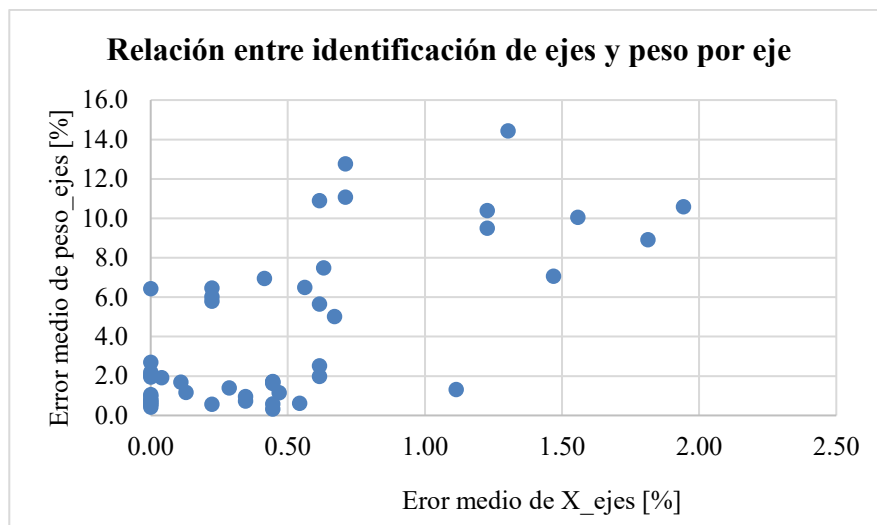


Figura 21. Gráfico de dispersión del error de peso por eje.

En general, los resultados demuestran un alto grado de precisión. Los errores en el peso por eje, que se mantienen por debajo del 15%, y los del Peso Bruto Vehicular (PBV), en su mayoría inferiores al 1% (Figura 22), se encuentran claramente dentro de los límites establecidos por normativas como la ASTM E1318-94, que permite diferencias de hasta el 30% para el peso por eje y del 15% para el PBV en este tipo de sistemas [45].

En la Figura 22 se muestra que los porcentajes más altos corresponden a las velocidades más altas, tal vez porque en estos escenarios es donde se presentó la mayor diferencia en la identificación de parámetros. Esto se resalta en el caso del vehículo C6, que por su mayor número de ejes y reducido espaciamiento entre ellos, aumenta la complejidad en la identificación de estas medidas.

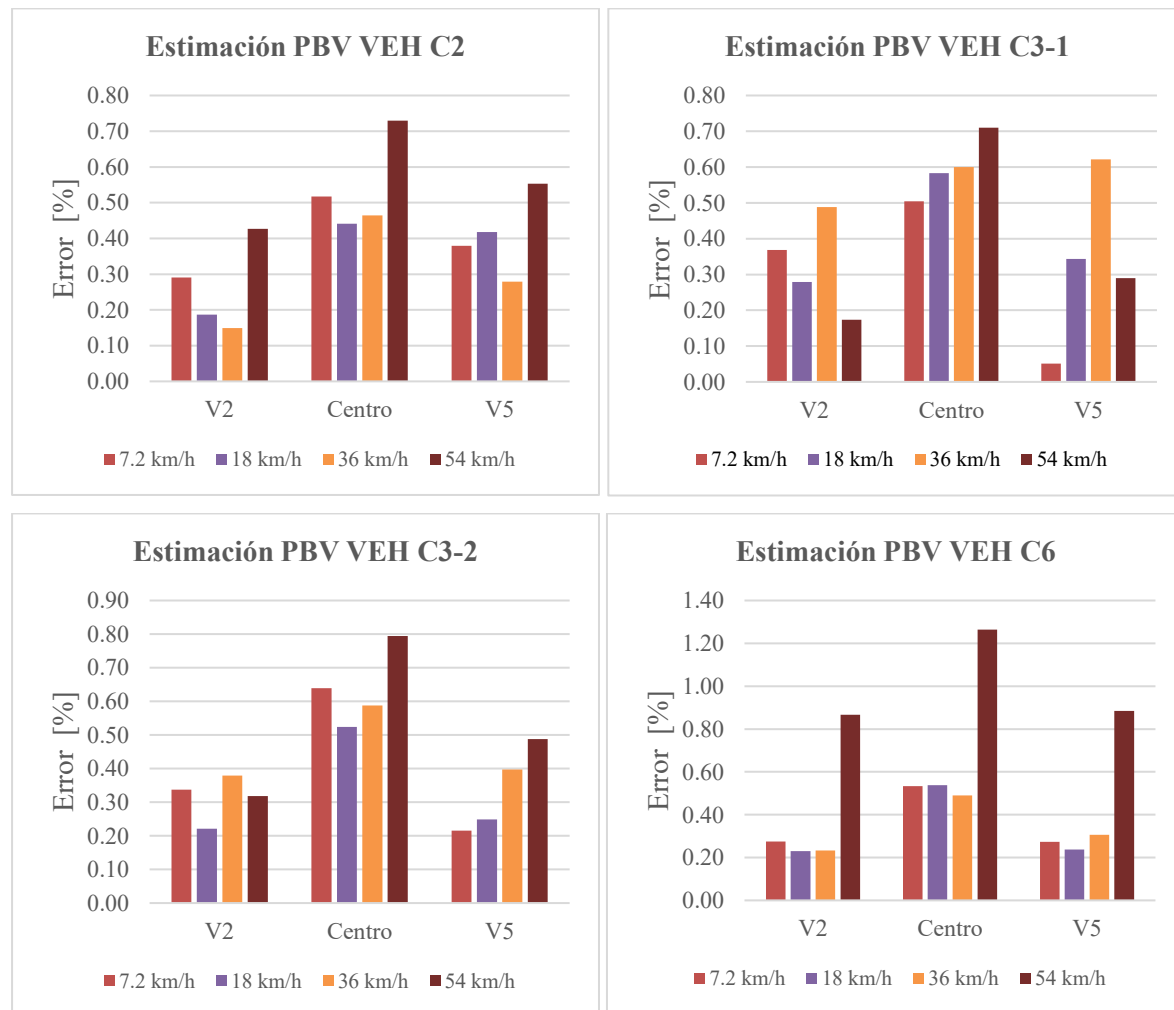


Figura 22. Error en la identificación del PBV.

3.5.2. Propuesta del arreglo de sensores

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, se propone un arreglo de sensores que optimiza la capacidad de identificación vehicular y la estimación de cargas, considerando las características geométricas y el comportamiento dinámico del puente de estudio. La propuesta se basa en las tendencias observadas en el modelo numérico, buscando maximizar la calidad de la señal.

El análisis de sensibilidad evidenció que, para la identificación de ejes vehiculares, la señal es más clara en puntos intermedios cercanos a los apoyos y en las vigas más próximas a la trayectoria transversal de la carga (Figura 18). Para la estimación del peso, también se confirmó que la precisión es máxima cuando el punto de registro se encuentra transversalmente alineado con la carga vehicular, mientras que los errores aumentan en los sensores ubicados en vigas lejanas (Figura 20).

Si bien la práctica común de B-WIM recomienda instalar sensores de pesaje en todas las vigas para registrar las máximas respuestas [34], en este caso se busca optimizar la configuración que permita obtener resultados aceptables con un número reducido de sensores. Con base en la evaluación analítica, se propone un **arreglo ideal** compuesto por dos sensores en cada carril (entrada y salida), ubicados en la zona de las vigas 3 y 5 para la identificación de ejes. Para el pesaje, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 20, se considera suficiente ubicar sensores en tres vigas (vigas 2, 4 y 5) cubriendo las trayectorias del Carril 1, del Carril 2 y de la zona entre carriles. Estos sensores deben ubicarse en el centro de la luz, sobre el patín inferior de la viga, ubicación en la que para este tipo de estructura (viga-losa), se registra la máxima respuesta [16]. El arreglo ideal, compuesto por un total de siete sensores, se ilustra en la Figura 23.

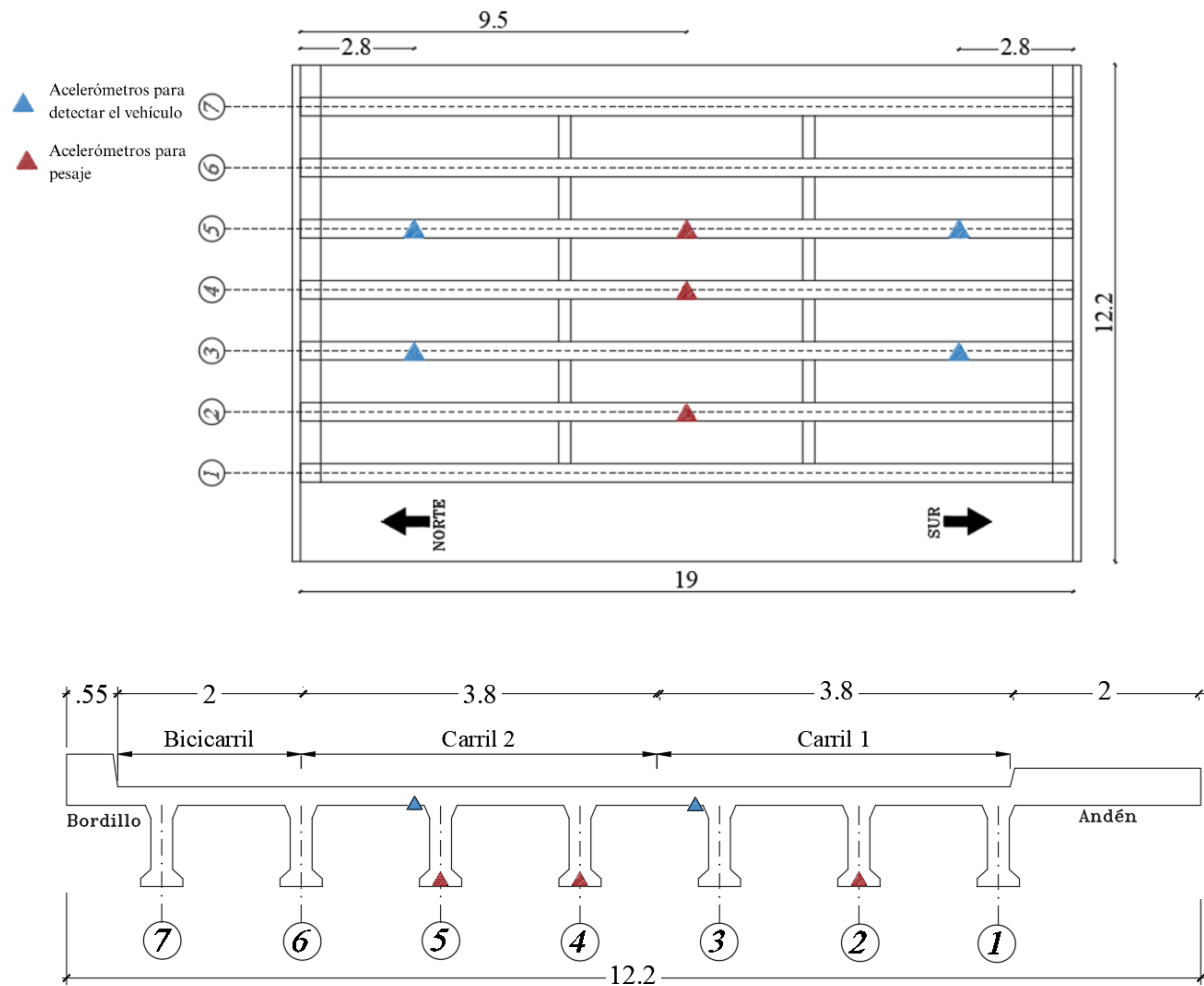


Figura 23. Propuesta ideal del arreglo de sensores (a) Vista en planta; (b) Vista en elevación.

Por otra parte, considerando la disponibilidad de equipos y las limitaciones presupuestales de este trabajo, se plantea un **arreglo reducido** como la configuración final a implementar en campo. Aunque no captura la totalidad de la respuesta descrita en la configuración ideal, se considera apropiada para validar experimentalmente la metodología. Esta propuesta consiste en la instalación de tres acelerómetros adheridos a la losa: dos en la zona de la viga 3 (entrada y salida), y uno en la zona de la viga 5 (en la entrada). Con ello se espera hacer la identificación vehicular en ambos carriles. Para el pesaje, se plantea la instalación de un sensor en la viga 4, por su posición central. El esquema de este arreglo reducido se presenta en la Figura 25.

4. IMPLEMENTACIÓN EXPERIMENTAL Y PRUEBAS DE CARGA

4.1. Diseño del sistema de monitoreo estructural

Dado que esta investigación se enmarca en un proyecto de monitoreo estructural a largo plazo, se implementó un sistema de instrumentación permanente en el puente, con el propósito de garantizar el registro continuo de su respuesta y facilitar el desarrollo de futuros trabajos de investigación.

La red de instrumentación fue conformada por gabinetes de protección, cableado de energía y datos, tuberías de protección, y dispositivos de seguridad. La ubicación de los gabinetes, así como el trazado de las redes, se definió priorizando la conservación de la integridad estructural del puente y la eficiencia del sistema.

4.1.1. Instrumentación utilizada

El sistema se diseñó para registrar vibraciones estructurales y deformaciones unitarias. Los equipos seleccionados para este propósito, mostrados en la Figura 24, se describen a continuación.

Sensores de medición instalados

- **Acelerómetros:** Se instalaron acelerómetros triaxiales, modelo ADLX354BZ diseñados para medir vibraciones estructurales. Estos sensores MEMS, ofrecen mediciones de alta precisión con bajo nivel de ruido y admiten un rango de medición configurable en ± 2 g, ± 4 g en un amplio rango de frecuencias (0 Hz a ~ 1 kHz).
- **Galgas extensiométricas:** Se instalaron galgas extensiométricas de tipo alambre con respaldo de poliéster, diseñadas para medir deformaciones en superficies de concreto. Cuatro de ellas se ubicaron en vigas principales para registrar las deformaciones longitudinales, y las otras cuatro se instalaron en un punto cercano y se conectaron en serie con las galgas de medición para corrección de efectos térmicos. Estas galgas funcionan para un límite de deformación de hasta 2 % sin daño estructural.

Sistema de adquisición y almacenamiento de datos

- **Nodo de adquisición:** Se utilizó un nodo LORD V-Link-200, encargado de alimentar los sensores y digitalizar las señales. Este dispositivo permite la conexión de hasta ocho canales (cuatro diferenciales y cuatro de terminación simple), e incluye filtros anti-aliasing y un conversor analógico-digital (A/D) de 18 bits de resolución.
- **Gateway y Transmisión:** Un Gateway LORD WSDA-2000 centraliza la información recibida desde el nodo y la transmite por cable UTP a un gabinete ubicado en el CAI de Policía al costado del puente.
- **Almacenamiento:** En el CAI, un computador de gama media (procesador Intel® Core™ 2 Duo, 4 GB RAM, 175 GB de almacenamiento) recibe y almacena las señales capturadas por el sistema.

Sistema de seguridad y monitoreo

Para proteger los equipos, se implementó un sistema de seguridad que incluye un sensor de proximidad conectado con una alerta visual en el CAI y a un reflector que se activa al detectar movimiento. Adicionalmente, dentro del gabinete principal se instaló un acelerómetro con GPS para su rastreo. El sistema se complementa con una cámara de video fija que apunta al tablero del puente para registrar visualmente el paso de los vehículos.

En la Figura 24 se observa una parte de la instrumentación instalada.

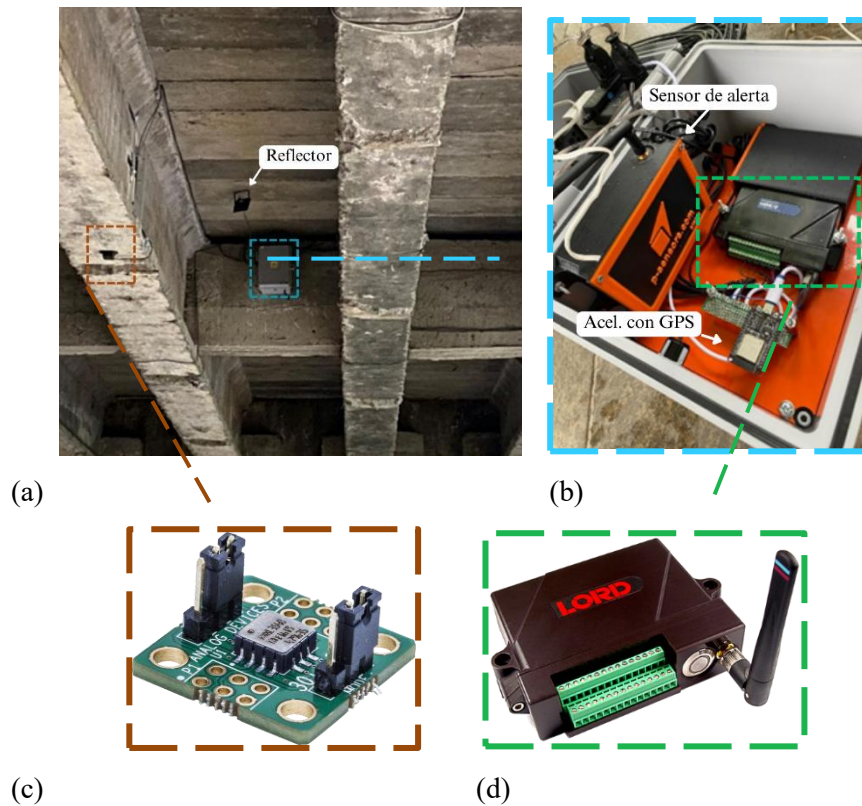


Figura 24. Detalle de la instrumentación: (a) Vista general de una zona instrumentada; (b) Gabinete principal; (c) Acelerómetro ADLX354BZ (d) nodo LORD V-Link-200.

4.1.2. Configuración e instalación del arreglo de sensores en el puente

La instalación final del sistema se llevó a cabo siguiendo la propuesta de arreglo reducido definida en la sección 3.5.2. El puente fue instrumentado con un total de cuatro acelerómetros, cuyas especificaciones técnicas se describieron anteriormente.

El gabinete principal, encargado de la alimentación y adquisición de datos, se instaló sobre una de las riostras intermedias. Además, se colocaron galgas extensiométricas que, aunque no forman parte del alcance de este estudio, complementan la instrumentación general del sistema. La configuración implementada se presenta en la Figura 25.

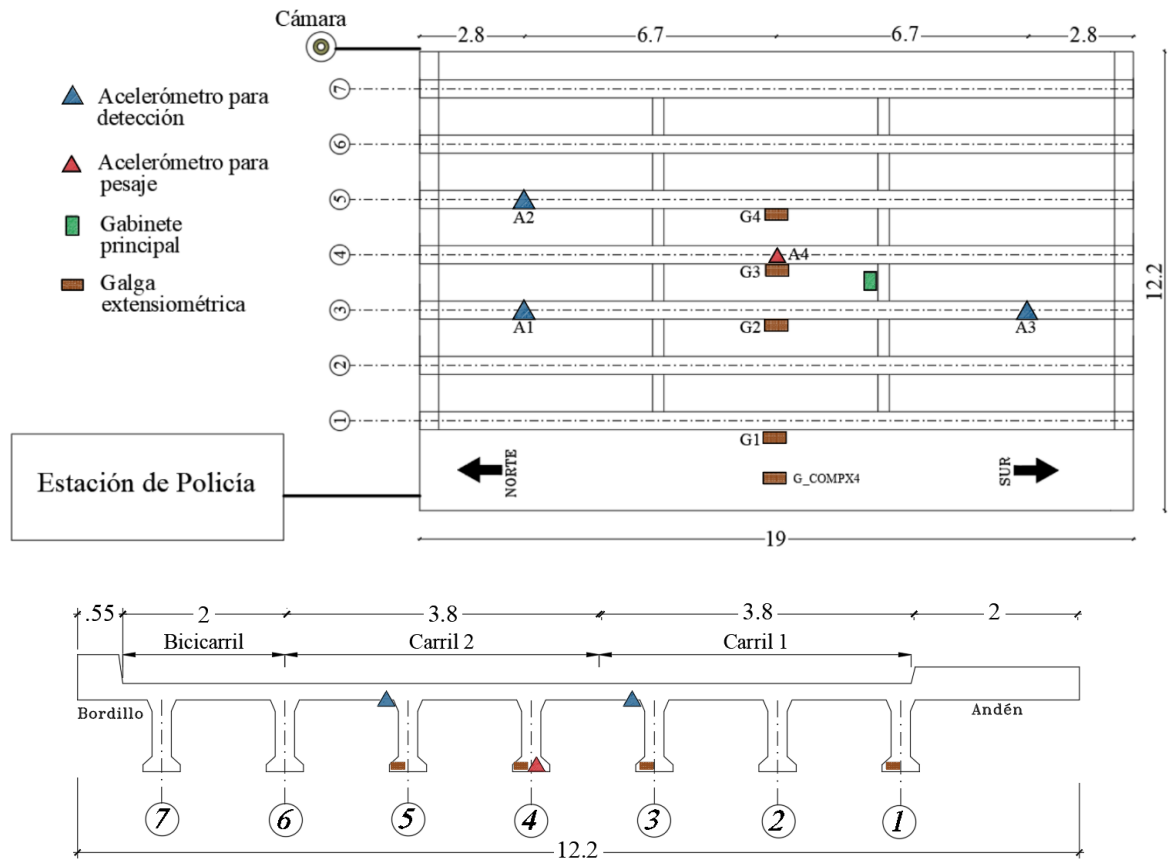


Figura 25. Configuración de la instrumentación definitiva del puente (a) Vista en planta; (b) Vista en elevación.

4.2. Ejecución de las pruebas de carga controladas

Para la validación de la metodología se llevaron a cabo una serie de pruebas de carga controladas en el puente instrumentado. Estas consistieron en el paso de vehículos con características geométricas y de peso previamente conocidas.

4.2.1. Caracterización de los vehículos de prueba

Se utilizaron dos vehículos de carga tipo volqueta. Cada uno fue cargado y pesado en una báscula estática certificada para conocer su peso bruto y la distribución de carga por eje.

- Vehículo 1 (VEH1): volqueta de dos ejes separados por 3.90 m, con un peso bruto de 15.41 t, distribuido en 3.85 t sobre el eje delantero y 11.56 t sobre el eje trasero.
- Vehículo 2 (VEH2): volqueta de tres ejes tipo tándem, con distancias entre ejes de 4.14 m (entre el eje delantero y el segundo) y 1.30 m (entre el segundo y el tercero). Su peso bruto

fue de 28.90 t, distribuido en 4.89 t sobre el eje delantero y 12.01 t en cada uno de los ejes 2 y 3.

En las Figuras 26 y 27 se muestran los vehículos empleados y sus características.

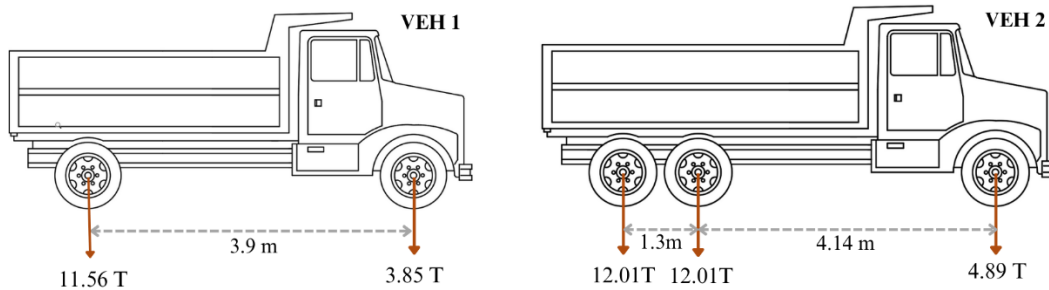


Figura 26. Configuración de los vehículos de prueba.



Figura 27. Volquetas utilizadas en las pruebas de carga.

4.2.2. Protocolo de carga

Se definió un protocolo de carga para generar un gran conjunto de datos que permitiera evaluar la metodología bajo una variedad de condiciones. Para ello, se realizaron múltiples pruebas de carga dinámicas con ambos vehículos circulando por diferentes posiciones transversales del tablero: sobre el carril 1 (C1) y sobre el carril 2 (C2). Las velocidades variaron entre 18 km/h y 50 km/h, aproximadamente.

Las pruebas se ejecutaron sin restricción de tráfico en el puente y para el análisis se seleccionaron únicamente aquellas en las que el vehículo de prueba fue el único en transitar sobre la estructura. En total, se obtuvieron 13 pruebas válidas, cuyos detalles se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Protocolo de las pruebas de carga

N° de prueba	Vehículo	Posición Transversal	Velocidad [km/h]
1	VEH1	C1	21.8
2	VEH1	C1	47.9
3	VEH1	C2	26.4
4	VEH1	C2	36.8
5	VEH1	C2	43.8
6	VEH2	C1	41.1
7	VEH2	C1	46.3
8	VEH2	C1	35.9
9	VEH2	C1	36.5
10	VEH2	C1	50.0
11	VEH2	C2	39.1
12	VEH2	C2	19.1
13	VEH2	C2	18.0

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología de pesaje a los datos de las pruebas de carga controladas.

5.1. Ajuste de la relación carga-respuesta

Para la calibración de la relación carga-respuesta, se ajustó nuevamente el modelo numérico utilizando los datos obtenidos de las pruebas dinámicas. En particular, se procesaron los datos registrados de la prueba N° 5. La señal de aceleración fue doblemente integrada para obtener la respuesta en desplazamiento, eliminando previamente la media de la señal para suprimir el componente constante asociado al sesgo del sensor.

En el modelo numérico se simuló el mismo escenario de carga para comparar las respuestas en desplazamiento. A pesar de que el modelo estaba ajustado en términos de las propiedades dinámicas, no tenía una buena aproximación a los desplazamientos experimentales, así que fue necesario un nuevo proceso de ajuste para aproximar la respuesta analítica.

Se llevó a cabo un proceso de ajuste iterativo desde Matlab, considerando como variables de calibración los parámetros de los que se tiene cierta incertidumbre: espesores de las vigas y la losa, que fueron medidos en condiciones complicadas; las propiedades de los materiales (módulo de elasticidad), y la rigidez de los apoyos. Los límites se definieron según el trabajo hecho por Marín [15], quien basó las estimaciones en los planos estructurales obtenidos a partir de un levantamiento y en información adicional recopilada.

El ajuste se realizó minimizando la función objetivo mostrada en la Ec. 18

$$F = \left| \frac{d_e - d_a}{d_e} \right| + \sum_{i=1}^5 \left| \frac{fn_{ei} - fn_{ai}}{fn_{ei}} \right| + \sum_{i=1}^5 1 - MAC(\varphi_{ei}, \varphi_{ai}) \quad \text{Ec. 18}$$

El primer término representa el error relativo entre el desplazamiento máximo analítico y el experimental en la viga 4. El segundo evalúa el error promedio entre frecuencias naturales para los cinco primeros modos, y el tercero mide la discrepancia en las formas modales, a través del Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) para los mismos cinco modos. El MAC es una medida estadística que evalúa la concordancia entre dos formas modales, en este caso entre las formas de los modos

experimentales (φ_{ei}) y las de los modos analíticos (φ_{ai}), en una escala de 0 a 1, donde 1 indica una correlación perfecta. La ecuación utilizada para su cálculo se presenta en la Ec. 19.

$$MAC_{j,k} = \frac{(\varphi_{ei}^T \varphi_{ai})^2}{\varphi_{ei}^T \varphi_{ei} \varphi_{ai}^T \varphi_{ai}} \quad \text{Ec.19}$$

Los límites de las variables empleadas se muestran en la Tabla 11. La rigidez de los apoyos, determinada por el espesor de las capas de neopreno, presentó variaciones entre apoyos según las mediciones de las capas realizadas en campo [15]; por esta razón, en el modelo se asignaron valores diferenciados para cada viga, que varían entre los límites de 85.43 MN/m y 199.5 MN/m.

Tabla 11. Variables consideradas en el ajuste

Variable	Límite inferior	Límite superior	Valor final
$t_{\text{alasu}} [\text{cm}]$	37	50	50
$t_{\text{alma}} [\text{cm}]$	25	40	40
$t_{\text{alainf}} [\text{cm}]$	47	55	55
$t_{\text{losa}} [\text{cm}]$	16	25	24
$E_{c_{\text{losa}}} [\text{Gpa}]$	23.2	29.9	29.9
$E_{c_{\text{vigas}}} [\text{Gpa}]$	29.9	32.8	32.8

Con el ajuste se alcanzó un valor final de 0.38 para la función objetivo y se obtuvo como resultado la respuesta graficada en la Figura 28. El modelo ajustado muestra una mejor concordancia con la respuesta experimental, reduciendo el error en el desplazamiento máximo del punto de la viga 4 de un 58% a un 9.4%. Este resultado se obtuvo rigidizando el modelo, lo que causó un aumento en la diferencia de las propiedades dinámicas, resultando en un error promedio del 14.7% para las frecuencias y un valor promedio del MAC de 0.86 (Tabla 12).

Tabla 12. Resultados de las propiedades dinámicas del modelo ajustado.

Modo	Diferencia en frecuencia	MAC
1	7.0%	0.93
2	13.9%	0.76
3	25.7%	0.93
4	25.0%	0.88
5	2.1%	0.78
Promedio	14.7%	0.86

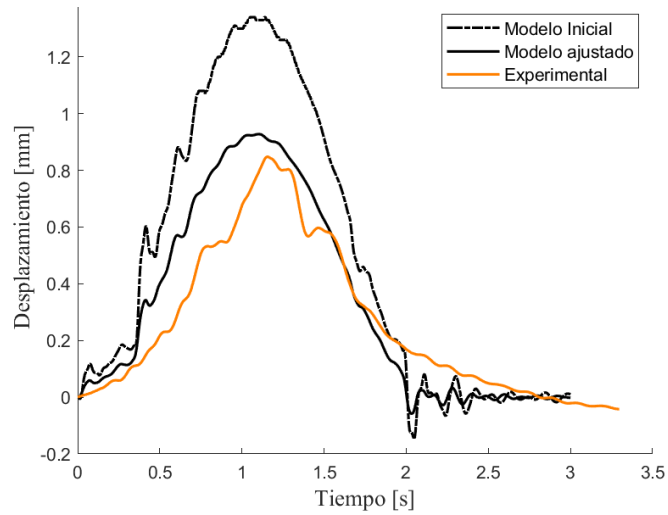


Figura 28. Respuesta en desplazamiento de la prueba N°5.

A pesar de la pérdida de precisión en los parámetros modales, se considera que el ajuste fue adecuado. La prioridad para esta metodología es la coincidencia con la magnitud de los desplazamientos experimentales, y el modelo final lo representa de manera más precisa.

Con el modelo ajustado, se construyó nuevamente la SI, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.4. Para el mismo escenario de carga, se presenta a continuación la superficie generada para la viga 4 (punto A4).

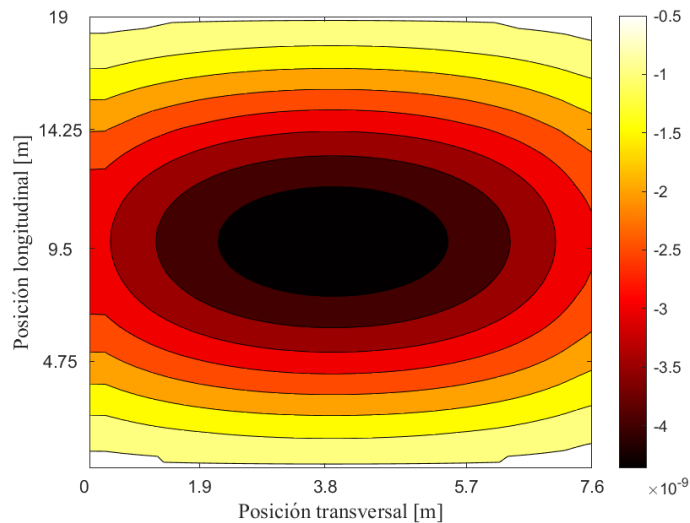


Figura 29. Superficie de influencia calibrada de la viga 4 (Unidades en m/N).

5.2. Identificación de parámetros vehiculares

Para la identificación de los parámetros del vehículo, el procesamiento de los datos se realizó aplicando un filtro paso alto con una frecuencia de corte de 21 Hz, como se mencionó en la evaluación analítica, para reducir los efectos de la dinámica del puente.

Posteriormente, se aplicó la transformada wavelet continua con función Morlet (Ec. 2), que resulta efectiva para este tipo de análisis, debido a su capacidad para representar la variación del contenido frecuencial durante el tiempo, y así detectar los eventos transitorios asociados al paso de un vehículo. En este procedimiento es fundamental la selección correcta de la escala de interés. Las escalas pequeñas están relacionadas con las componentes de alta frecuencia, y escalas grandes capturan componentes de baja frecuencia. En la Figura 30 se presenta el espectrograma obtenido para la prueba N° 1, registrada por el sensor A3 (Figura 25), donde se observa la distribución del contenido frecuencial de la señal a lo largo del tiempo.

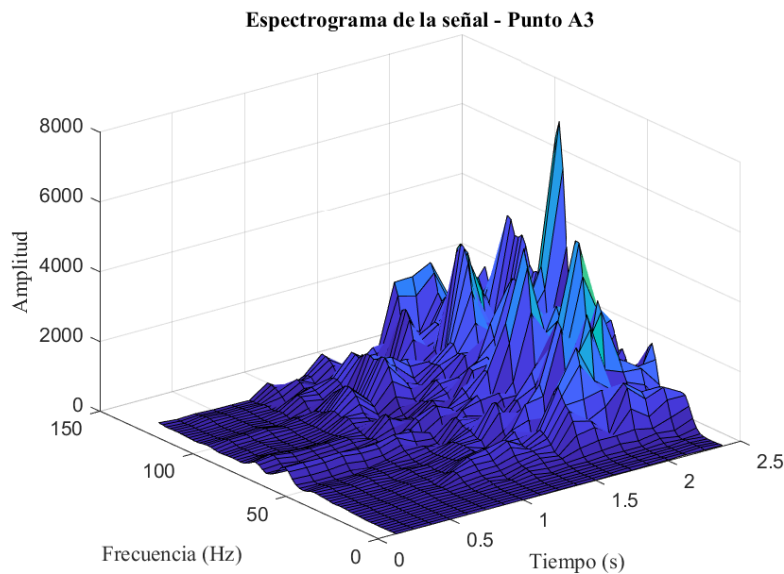


Figura 30. Respuesta en tiempo-frecuencia de la prueba N° 1.

La elección de la escala correcta resulta compleja debido a la interacción vehículo-puente y a las diferentes variables que afectan la respuesta estructural, lo que hace imposible definir un único valor que represente de manera satisfactoria todos los eventos registrados, ya que cada paso vehicular genera una respuesta particular. En este sentido, se hizo un análisis de sensibilidad para

evaluar los resultados al considerar diferentes escalas. Los resultados de este análisis, mostrados en la Figura 31, evidencian que la escala utilizada influye significativamente en los resultados, generando errores que varían notablemente entre pruebas sin que sea posible establecer un patrón único.

Para el vehículo VEH1, se observa que en varias pruebas los menores errores se dan en la escala 20; sin embargo, en otras condiciones esa misma escala resulta ser la de mayor error. En el caso del vehículo VEH2, el comportamiento también es heterogéneo; aunque en la mayoría de los escenarios la escala 1 presenta mejores resultados, en ciertas pruebas los errores superan el 30 %, incluso en condiciones aparentemente similares, como sucede entre las pruebas 6 y 7. Esta variabilidad confirma que la selección de la escala depende de múltiples factores asociados tanto al vehículo como a la dinámica de la estructura, de modo que no es adecuado trabajar con una escala única, sino que resulta necesario considerar un rango de escalas e identificar la más representativa en cada situación. En las gráficas se incluyó una línea horizontal que señala un límite normativo establecido para este error [45], utilizado como referencia en la comparación.

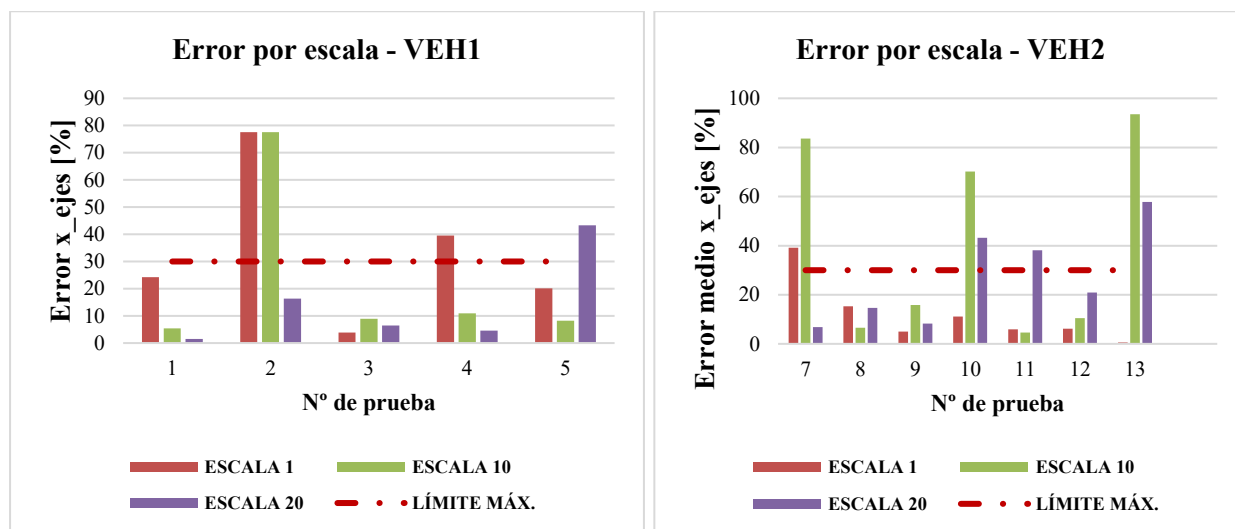


Figura 31. Error en el espaciamiento de ejes según la escala.

Con las señales filtradas fue posible resaltar los picos asociados al paso de los ejes del vehículo. A partir de estos, mediante el método pico a pico, tal como se mencionó en el apartado 3.5.1, se calculó la velocidad y el espaciamiento entre ejes. En la Figura 32 se muestra gráficamente una de las respuestas, correspondiente a la prueba N° 9, donde se distinguen claramente los máximos que representan el tránsito de cada eje. En el registro del sensor de la entrada es más evidente (A2)

porque el vehículo pasó más cerca a este sensor. Aunque en el punto A3 la amplitud de la respuesta es menor, todavía es posible identificar el último pico, correspondiente a la salida del último eje del vehículo.

De esta manera, se llevó a cabo la identificación de parámetros para cada prueba, seleccionando las respuestas que presentaron una mayor claridad gráfica y un menor porcentaje de error.

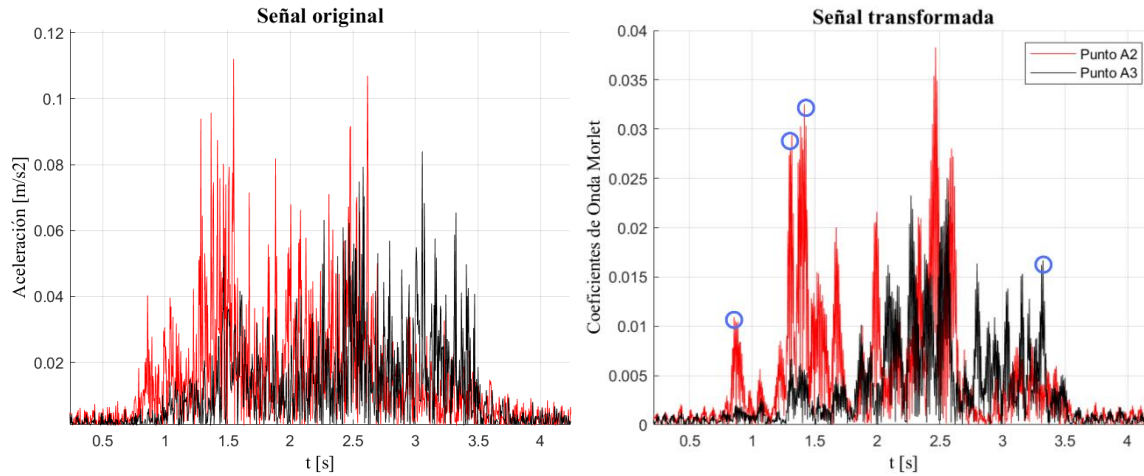


Figura 32. Identificación para la prueba N° 9.

En general, los resultados muestran que se logró una identificación satisfactoria de los parámetros de los vehículos. Para el vehículo VEH1, como se presenta en la Tabla 13, los errores se mantuvieron en un rango entre 2.6 % y 14.2 %, donde los mayores porcentajes tienden a darse en las velocidades más altas.

Tabla 13. Identificación de los parámetros vehiculares para el vehículo VEH1.

VEH1					
Prueba	Vel. de Tránsito [km/h]	Vel. Identificada [km/h]	Espaciamiento x1 [m]	Error Vel [%]	Error x1 [%]
1	21.87	22.43	4.11	2.56	5.42
2	47.93	53.44	4.45	11.49	14.18
3	26.42	27.31	4.25	3.34	8.91
4	36.80	38.00	4.33	3.25	10.97
5	43.85	46.06	4.22	5.04	8.26

En el caso del VEH2 (Tabla 14), los errores presentaron valores en su mayoría inferiores al 10%, con excepción de la prueba 6, que si bien podría relacionarse con la alta velocidad de tránsito, en otras condiciones similares no ocurre lo mismo. Por lo anterior, la precisión en la identificación se atribuye principalmente al adecuado filtrado de la señal. La elección de la escala sigue siendo un factor determinante y complejo de elegir. También es importante mencionar que es probable que la velocidad real del vehículo pudo no haber sido completamente constante durante el recorrido, debido a factores humanos, lo que también contribuye a los errores en la identificación.

Tabla 14. Identificación de los parámetros vehiculares para el vehículo VEH2.

VEH2							
Prueba	Vel. de Tránsito [km/h]	Vel. Identificada [km/h]	Espaciamiento x1 [m]	Espaciamiento x2 [m]	Error Vel [%]	Error x1 [%]	Error x2 [%]
6	41.11	36.72	5.02	1.42	10.68	21.33	9.20
7	46.30	50.65	4.36	1.41	9.41	5.39	8.26
8	35.93	39.51	4.50	1.12	9.96	8.67	13.48
9	36.50	35.32	4.17	1.42	3.27	0.70	9.41
10	50.00	54.72	4.41	1.37	9.46	6.47	5.23
11	39.10	39.31	4.15	1.31	0.53	0.23	0.80
12	19.08	20.34	4.29	1.19	6.50	3.65	8.79
13	17.96	19.51	3.79	1.36	8.62	8.50	4.72

5.3. Estimación del peso vehicular

La estimación de la carga se hizo, al igual que en el apartado 3.5.1, siguiendo la metodología de Moses (Ec. 6), e implementando el concepto de SI, propuesto por Yu et. al [20]. Para ello, se utilizó la respuesta registrada en el punto ubicado en el centro de la luz (A4), los parámetros vehiculares identificados en el apartado anterior y la superficie de influencia calibrada.

En algunos casos, particularmente para el vehículo de tres ejes, fue necesario aplicar la regularización de Tikhonov al sistema final de ecuaciones para mejorar la estimación de los pesos por eje. Esta técnica contribuye a reducir la influencia del ruido en las mediciones y evita que el sistema se torne inestable ante pequeñas variaciones de los datos, que en este caso pueden verse amplificadas por las condiciones de deterioro de la estructura, como la rugosidad de la superficie

de rodadura. La regularización consiste en añadir un término adicional al sistema clásico de ecuaciones, dando lugar a la siguiente formulación:

$$M = (F * \lambda I) * A \quad \text{Ec. 20}$$

El parámetro de regularización (λ) define el equilibrio entre el ajuste de los datos medidos y la estabilidad de la solución, y su selección resulta crítica. En la literatura se han propuesto distintos enfoques para determinarlo; en este trabajo se empleó el método de la curva-L, descrito por O'Brien et al. [38], mencionado en la metodología (apartado 2.2.2). Este método consiste en graficar la norma del error residual vs la norma de la solución (Ec. 11 y Ec. 12) para un rango de valores de λ , identificando el punto de equilibrio en el “codo” de la curva.

Para el vehículo VEH2, por ejemplo, el parámetro de regularización se evaluó entre $1*10^{-30}$ y 1, obteniendo para la prueba N° 12 la curva-L mostrada en la Figura 33 (a). En la Figura 33 (b) se amplía la región donde se ubica el valor óptimo de λ , comprendido entre $1.1*10^{-17}$ y $8.7*10^{-17}$. Gráficamente el punto de mayor curvatura se ubica alrededor de $4.3*10^{-17}$.

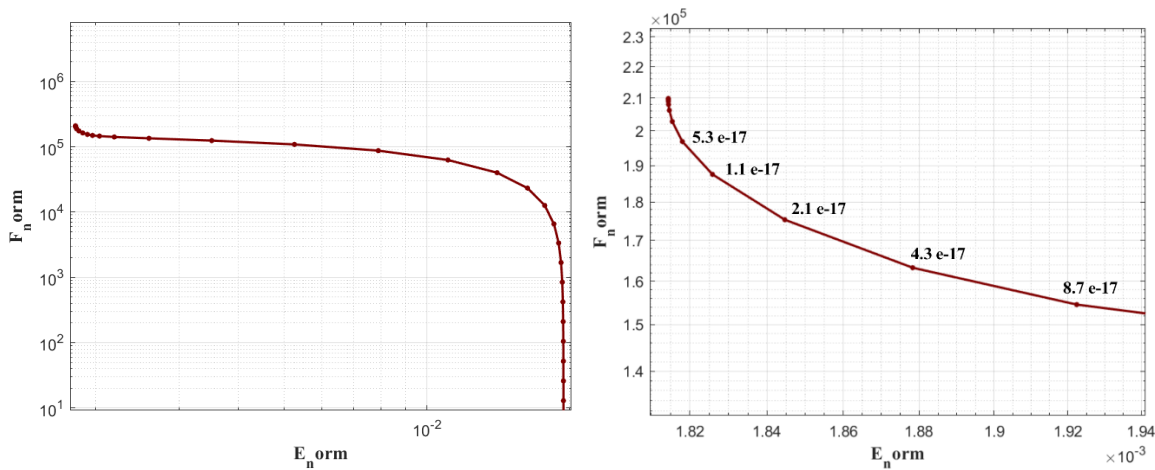


Figura 33. Curva-L para la prueba N°12 (a) Rango completo de λ (b) Región de λ óptimo.

En la Tabla 15 se presentan los resultados de peso por eje obtenidos para cada valor de λ . Para $\lambda=0$ (la solución no regularizada de Moses), los errores alcanzan hasta un 25% por eje. Con la aplicación de la regularización ($\lambda = 4.30*10^{-17}$ aproximadamente), la precisión mejora notablemente, reduciendo este porcentaje a un 3 %. Así, fue posible mejorar la precisión de los

pesos por eje, que tienden a presentar mayor error, principalmente en configuraciones con ejes poco espaciados [38].

Adicionalmente, desde el punto de vista computacional, es importante mencionar los tiempos de ejecución de la técnica. La etapa que toma más tiempo es la elección del parámetro de regularización. La duración de este proceso dependerá del tiempo que se invierta en cada caso para definir el rango de valores a evaluar y posteriormente seleccionar el punto de mayor curvatura en la curva-L, donde se ubica el parámetro óptimo. En este trabajo, dicho procedimiento se realizó de forma manual, y el tiempo empleado fue de aproximadamente dos minutos. Una vez determinado el valor óptimo, el procesamiento final para la identificación de peso fue casi inmediato, completándose en un segundo o menos.

Tabla 15. PBV para diferentes valores de λ .

λ	Peso Eje 1 [Ton]	Peso Eje 2 [Ton]	Peso Eje 3 [Ton]	Error eje 1 [%]	Error eje 2 [%]	Error eje 3 [%]
0	6.09	9.31	9.31	25	22	22
5.30E-17	5.77	9.43	9.43	18	21	21
1.10E-17	5.52	9.52	9.52	13	21	21
2.10E-17	5.17	9.64	9.64	6	20	20
4.30E-17	4.76	9.79	9.79	3	18	18
8.70E-17	4.4	9.88	9.88	10	18	18

Los resultados finales de la identificación de carga para todas las pruebas se presentan en las Tablas 16 y 17, y se representan gráficamente en la Figura 34.

Se observa una notable diferencia en la precisión de las estimaciones dependiendo de la trayectoria del vehículo. Como era de esperarse, aquellos que circulan por el carril 1, más alejados del sensor de pesaje (A4), generan una respuesta de menor magnitud y presentan errores de hasta 62% en el PBV. Para los que circularon por el carril 2, más cerca al sensor, la estimación fue satisfactoria. En el caso del vehículo VEH1 se lograron errores menores a 3% para el PBV y menores a 9% para el peso por eje. Para el vehículo VEH2 los porcentajes estuvieron dentro de un rango de 2.4% y 15.8% para el PBV, y entre 8% y 27% para peso por eje. Sin embargo, estos niveles de precisión se consideran aceptables ya que cumplen con los límites definidos en la norma ASTM E1318-94

[45], previamente citada como marco de referencia. En general, los resultados son satisfactorios, especialmente teniendo en cuenta las condiciones no ideales del puente y que la estimación se llevó a cabo con un único sensor de pesaje.

Tabla 16. Estimación de carga para el vehículo VEH1.

VEH1							
N° de prueba	%Error en espaciamiento	Peso Eje 1 [Ton]	Peso Eje 2 [Ton]	PBV [Ton]	Error Eje 1 [%]	Error Eje 2 [%]	Error PBV [%]
1	5.42	2.38	4.82	7.20	38	58	53
2	14.18	2.37	7.85	10.22	38	32	34
3	8.91	3.85	12.08	15.93	0	5	3
4	10.97	3.49	11.86	15.35	9	3	0
5	8.26	3.76	11.50	15.26	2	0	1

Tabla 17. Estimación de carga para el vehículo VEH2.

VEH2									
N° de prueba	% Error promedio en espaciamiento	Peso Eje 1 [Ton]	Peso Eje 2 [Ton]	Peso Eje 3 [Ton]	PBV [Ton]	Error Eje 1 [%]	Error Eje 2 [%]	Error Eje 3 [%]	Error PBV [%]
6	15.26	3.70	3.98	3.98	11.66	24	67	67	59.7
7	6.82	1.76	4.63	4.63	11.01	64	61	61	61.9
8	11.08	3.36	7.85	7.85	19.06	31	35	35	34.0
9	5.05	4.85	9.17	9.17	23.18	1	24	24	19.8
10	5.85	3.63	9.50	9.50	22.63	26	21	21	21.7
11	0.51	5.21	9.74	9.74	24.69	7	19	19	14.6
12	6.22	4.76	9.79	9.79	24.33	3	18	18	15.8
13	6.61	3.65	12.97	12.97	29.58	25	8	8	2.4

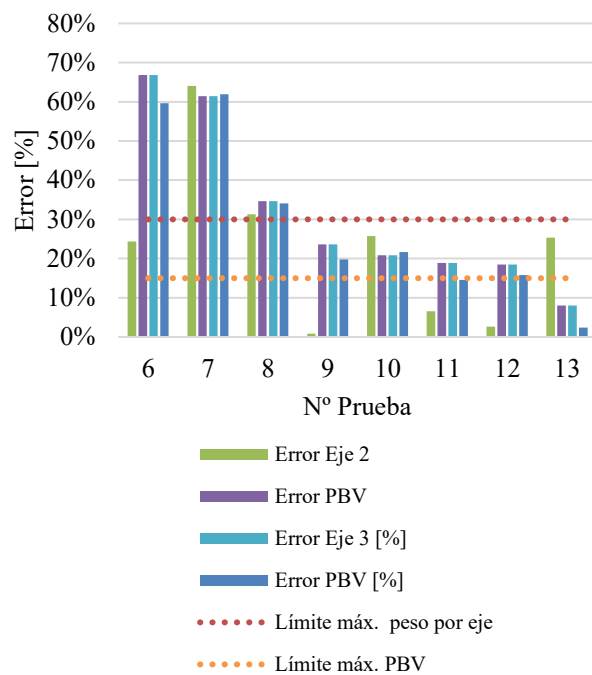
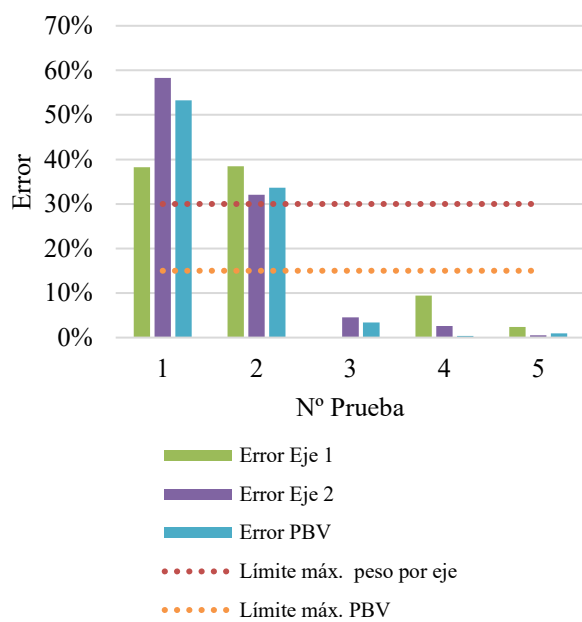


Figura 34. Representación gráfica de la diferencia en la estimación de carga.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

6.1. Conclusiones

- La aplicación de esta metodología en un puente que no cumple con las condiciones ideales típicamente requeridas por las metodologías B-WIM, debido a su superficie de rodadura irregular y a la pendiente pronunciada en el acceso, representa un desafío significativo. Sin embargo, se obtuvieron resultados satisfactorios: el error en el PBV se mantuvo en un rango entre 2 % y 15 %, mientras que para el peso por eje estuvo entre 9 % y 27 % en las pruebas donde los vehículos circularon más próximos al sensor. Estos valores se encuentran dentro de los límites máximos establecidos por la norma ASTM E1318-94 (15 % para PBV y 30% para peso por eje), lo que constituye una valiosa contribución al campo de estudio.
- Los acelerómetros empleados ofrecen una alternativa viable para la identificación de las cargas vehiculares. Estos dispositivos, pequeños y de bajo costo, simplifican el proceso de medición e implementación. Aunque el arreglo implementado no resultó suficiente para garantizar una identificación precisa en todo el puente, se obtuvieron resultados satisfactorios en el carril instrumentado. Esto demuestra que con un sensor por carril puede lograrse una estimación adecuada, lo cual reafirma la ventaja de los acelerómetros frente a los sensores de deformación tradicionalmente empleados, que por su sensibilidad requieren un mayor número de dispositivos. Por consiguiente, esta metodología, que además es no invasiva, se presenta como una alternativa más práctica que los sistemas convencionales basados en galgas extensiométricas.
- La precisión del pesaje depende de la correcta identificación de los parámetros iniciales del vehículo. El proceso de filtrado de la señal, especialmente la selección de la escala en la transformada wavelet, es un paso crítico y complejo que influye directamente en los resultados. Si bien los resultados obtenidos fueron favorables, el procedimiento se realizó de forma manual, lo cual demanda tiempo y limita el análisis a un número reducido de escalas.

- Los sistemas BWIM basados en aceleración presentan dificultades para estimar el peso por eje, especialmente en vehículos con ejes poco espaciados como el vehículo VEH2. La implementación de la técnica de regularización de Tikhonov demostró ser una herramienta que ayuda a mitigar esta limitación. Sin embargo, la elección del parámetro óptimo de regularización continúa siendo un aspecto debatible y sujeto a investigación en próximos trabajos.
- Un desafío importante en las metodologías BWIM es su aplicación en escenarios de tráfico real, donde múltiples vehículos circulan simultáneamente sobre la estructura y generan señales superpuestas que impiden la identificación precisa del vehículo de interés. Por ello, en este estudio solo fue posible validar los resultados mediante pruebas de carga controladas con un único vehículo. Aun así, los resultados obtenidos en diferentes escenarios de velocidades y posiciones permiten concluir que la metodología aplicada es válida y puede ser considerada para aplicaciones en campo.

6.2. Perspectivas

Como línea futura, se recomienda avanzar hacia la automatización del proceso de pesaje, desarrollando algoritmos basados en inteligencia artificial que optimicen la selección de parámetros del filtrado y regularización. Asimismo, se sugiere abordar el desafío del tráfico real con múltiples vehículos, mediante técnicas de visión utilizando cámaras, lo cual podría mejorar la precisión del sistema en contextos más complejos y dinámicos. Finalmente, se plantea complementar la instrumentación de acuerdo con la propuesta ideal planteada para mejorar la precisión de la estimación de cargas en todo el tablero.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Prieto, «Publican el informe oficial sobre el colapso del puente Nanfang'ao en Taiwán». Accedido: 18 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://estructurando.net/2020/12/15/informe-oficia-sobre-el-colapso-del-puente-nanfangao-en-taiwan/>
- [2] G. Forero, «Atentado, sobrecarga o deterioro, posibles causas del colapso del puente El Alambrado, según la ANI», abr. 2023, Accedido: 18 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://redmas.com.co/colombia/Atentado-sobrecarga-o-deterioro-posibles-causas-del-colpaso-del-puente-El-Alambrado-segun-la-ANI-20230413-0008.html>
- [3] P. Puerto, «Fallas de los puentes en Colombia, ¿cuestión de tiempo, monitoreo o apropiación?», *Periódico UNAL*, 1 de septiembre de 2023. Accedido: 9 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://periodico.unal.edu.co/articulos/fallas-de-los-puentes-en-colombia-cuestion-de-tiempo-monitoreo-o-apropiacion>
- [4] D. Morales, «Estudio de las causas y soluciones estructurales del colapso total o parcial de los puentes vehiculares de Colombia desde 1986 al 2011, y la evaluación de las consecuencias del derrumbamiento de uno de ellos», Pontificia Universidad Javeriana, 2011. Accedido: 18 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10554/7494>
- [5] Ministerio de transporte, «El transporte público de carga por carretera movilizó más de 135 millones de toneladas de mercancías en 2022», 2022.
- [6] K. García, «Evaluación de tarifas de peaje por factor daño al pavimento », Universidad de los Andes, 2013. Accedido: 14 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/fef49155-75aa-4e47-908a-7e3767bc2357/content>
- [7] El Tiempo, «El transporte de carga, el más sancionado por llevar sobrepeso», 2016. Accedido: 15 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/sobrepeso-principal-causa-de-multas-en-transporte-de-carga-44855>
- [8] A. Lansdell, W. Song, y B. Dixon, «Development and testing of a bridge weigh-in-motion method considering nonconstant vehicle speed», *Engineering Structures*, 2017.
- [9] J. R. Hernandez y M. de J. Fabela, «Diseño y construcción de un prototipo para determinar el peso de vehículos ligeros en movimiento», Instituto Mexicano del Transporte, 2004.

- [10] S. Lobo y G. Mora, «¡Puentes que nos hablan! Puentes Inteligentes, tecnología aplicada para la administración de la infraestructura vial». Accedido: 18 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/transporte/es/puentes-que-nos-hablan-puentes-inteligentes-tecnologia-aplicada-para-la-administracion-de-la-infraestructura-vial/>
- [11] ASTM, *Standard specification for highway weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test methods E 1318–09*. USA: Annual Book of ASTM Standards, 2009.
- [12] INVIAS, *Guía para la instrumentación y monitoreo de puentes*. 2022. Accedido: 14 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/14383-guia-shm-sigp-protocolo-v2-pa/file>
- [13] E. Muñoz, D. Gómez, F. Ñuñez, y C. Flores, «Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación», *Revista Ingeniería de Construcción*, 2011.
- [14] Y. Yu, C. Cai, y L. Deng, «Vehicle axle identification using wavelet analysis of bridge global responses», *Journal of Vibration and Control*, vol. 23, n.º 17, dic. 2017, doi: 10.1177/1077546315623147.
- [15] M. Marín, «Caracterización de cargas vehiculares en un puente con monitoreo estructural», Universidad del Valle, 2019.
- [16] Y. Yu, C. Cai, y L. Deng, «State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology», *Advances in Structural Engineering*, vol. 19, pp. 1514-1530, 2016.
- [17] G. Badilla, «Incidencia de las estaciones de pesaje móvil en los factores camión en pavimentos de Costa Rica», Universidad de Costa Rica, 2007.
- [18] P. Olaszek, M. Lagoda, y R. J. Casa, «Diagnostic load testing and assessment of existing bridges: examples of application», *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 10, n.º 6, pp. 834-842, 2014, doi: <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.772212>.
- [19] S. Crespo, F. Carrion, J. Quintana, A. Hernandez, y J. López, «Análisis del deterioro estructural por fatiga y prognosis de un puente típico de concreto utilizando simulación Monte Carlo», 2013. doi: 10.13140/RG.2.1.1560.8809.
- [20] Y. Yu, C. S. Cai, y L. Deng, «Nothing-on-road bridge weigh-in-motion considering the transverse position of the vehicle», *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 14, n.º 8, pp. 1108-1122, ago. 2018, doi: 10.1080/15732479.2017.1401095.
- [21] F. Moses, «Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridges», *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 1979.

- [22] R. J. Peters, «CULWAY-An Unmanned and Undetectable Highway Speed Vehicle Weighing System», *Proc. 13th Aust. road Res. board Conf.*, vol. 13, pp. 70-83, 1986.
- [23] S. S. Law, T. H. T. Chan, y Q. H. Zengb, «Moving Force Identification: a Time Domain Method», *J Sound Vib*, vol. 201, pp. 1-22, mar. 1997.
- [24] T. H. T. Chan, T. H. T. Law a, T. H. Yung a, y T. H. Yuan b, «An interpretive method for moving force identification», *J Sound Vib*, vol. 219, n.º 3, pp. 503-524, ene. 1999.
- [25] S. S. Law, T. H. T. Chan, y Q. H. Zeng, «Moving Force Identification—A Frequency and Time Domains Analysis», *Dynamic systems, measurement and control*, vol. 121, n.º 3, pp. 394-401, sep. 1999.
- [26] F. Carraro, M. Gonçalves, R. H. Lopez, L. Miguel, y A. M. Valent, «Weight estimation on static B-WIM algorithms: A comparative study», *Eng Struct*, vol. 198, n.º 109463, 2019.
- [27] WAVE, «Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe», 2002.
- [28] A. Žnidarič, I. Lavrič, y J. Kalin, «Latest practical developments in the bridge WIM technology », 2010. doi: 10.1201/b10430-141.
- [29] J. Kalin, A. Žnidarič, y I. Lavrič, «Practical Implementation of Nothing-on-the-Road Bridge Weigh-in-Motion System», Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, 2006.
- [30] M. Marín, D. Millán, S. Castellanos, J. Marulanda, y Thomson P, «Caracterización de cargas vehiculares en un puente con monitoreo estructural», *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. 2021.
- [31] J. OBrien, A. Znidaric, y A. Dempsey, «Comparison of two independently developed bridge weigh-in-motion systems», *International journal of heavy vehicle systems IJHVS*, ene. 1999, doi: 10.1504/IJHVS.1999.054503.
- [32] E. MacLeod y K. Arjomandi, «Enhanced Bridge Weigh-in-Motion System Using Hybrid Strain–Acceleration Sensor Data», *Journal of Bridge Engineering*, vol. 27, n.º 9, jul. 2022.
- [33] J. C. Monroy y M. Tovar, «Estimación de cargas dinámicas de camiones pesados que circulan por un puente instrumentado con acelerómetros», Pontificia Universidad Javeriana , 2013.
- [34] S. Mustafa, H. Sekiya, S. Hirano, y C. Miki, «Iterative linear optimization method for bridge weigh-in-motion systems using accelerometers», *Structure and Infrastructure Engineering*, pp. 1245-1256, ago. 2020, doi: 10.1080/15732479.2020.1802490.

- [35] C. Maduro, K. Batista, y J. Batista, «Estimating Vehicle Velocity Using Image Profiles on Rectified Images», *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 5524, pp. 64-71, 2009, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02172-5_10.
- [36] X. Jian, Y. Xia, J. A. Lozano-Galant, y L. Sun, «Traffic Sensing Methodology Combining Influence Line Theory and Computer Vision Techniques for Girder Bridges», *J Sens*, vol. 2019, may 2019.
- [37] Arturo Gonzalez, C. Rowley, y J. OBrien, «A general solution to the identification of moving vehicle forces on a bridge», *Int J Numer Methods Eng*, pp. 335-354, jul. 2008.
- [38] E. J. OBrien, C. W. Rowley, A. Gonzalez, y M. F. Green, «A regularised solution to the bridge weigh-in-motion equations», *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, vol. 16, n.º 3, pp. 310-327, jul. 2009.
- [39] C. Hansen, «Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems», *Soc Ind Appl Math*, 1998.
- [40] T. Ojio y K. Yamada, «Bridge weigh-in-motion systems using stringers of plate girder bridges», *Proceedings of the 3rd international WIM conference*, pp. 209-218, 2002.
- [41] A. Žnidarič, yo Lavric, J. Kalin, y M. Kreslin, « Using strips to mitigate the multiple-presence problem of BWIM systems», *Proceedings of the 6th international WIM conference*, pp. 89-98, 2012.
- [42] N. Zolghadri, M. W. Halling, N. Johnson, y P. J. Barr, «Field Verification of Simplified Bridge Weigh-in-Motion Techniques», *Journal of Bridge Engineering*, vol. 21, n.º 10, abr. 2016.
- [43] E. J. O'Brien, M. J. Quilligan y R. Karoumi, «Calculating an influence line from direct measurements», *Bridge Engineering*, vol. 159, no. 1, pp. 31–34, 2006.
- [44] M. Marín, «Evaluación de la capacidad de carga de un puente vehicular mediante monitoreo estructural y pesaje dinámico», Universidad del Valle, 2025.
- [45] McCall, Bill;Vodrazka, Walter C. Jr., «States' Successful Practices Weigh-in-Motion», Iowa State University, (1997).

8. ANEXOS

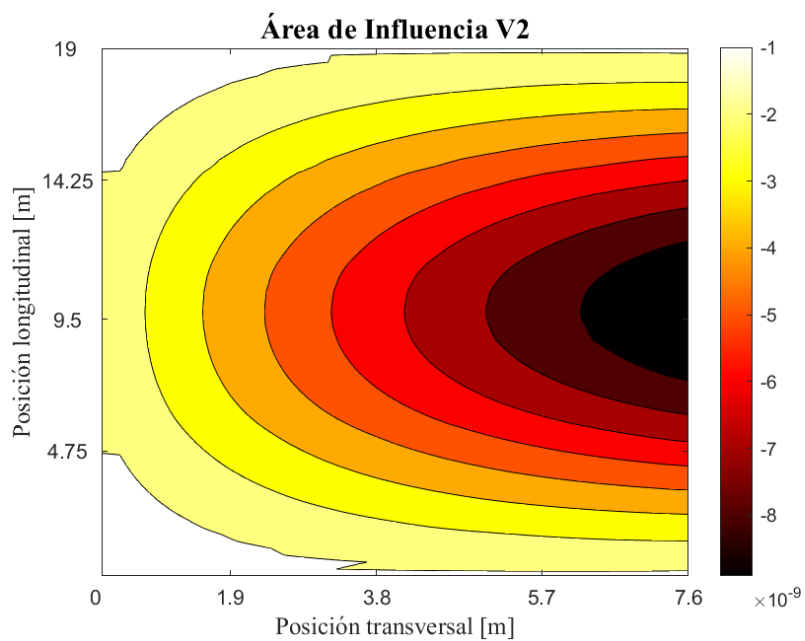


Figura A1. Gráfica de contorno del área de influencia analítica en la V2 (Unidades: m/N).

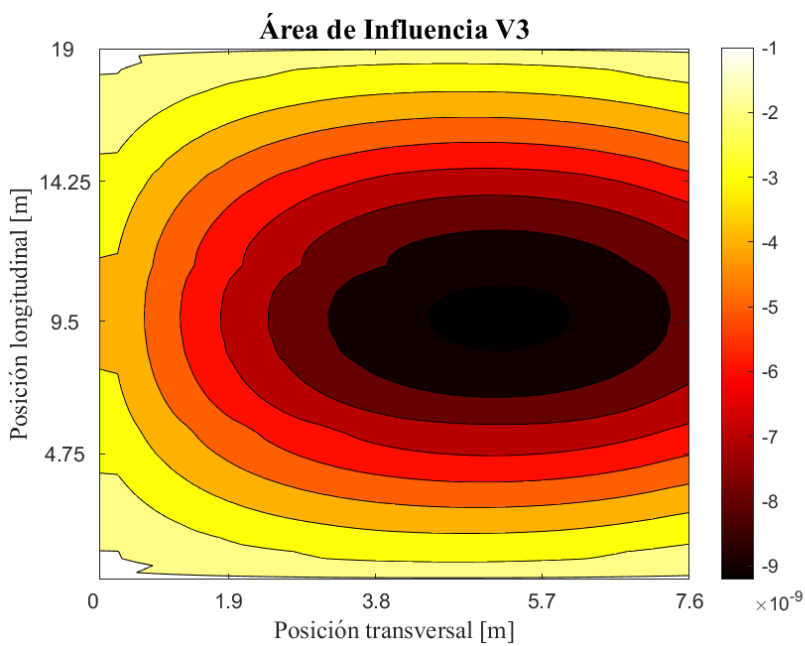


Figura A2. Gráfica de contorno del área de influencia analítica en la V3 (Unidades: m/N).

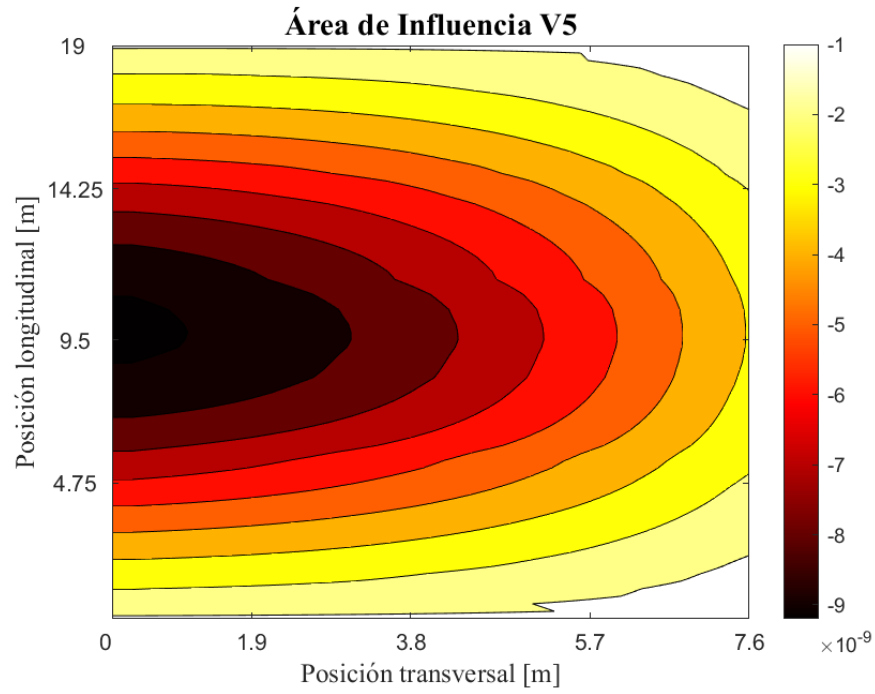


Figura A3. Gráfica de contorno del área de influencia analítica en la V5 (Unidades: m/N).

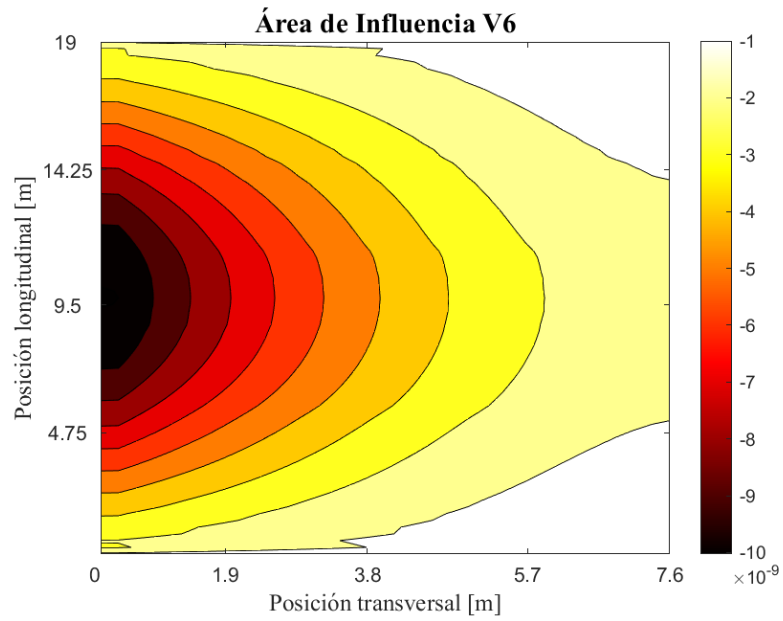


Figura A4. Gráfica de contorno del área de influencia analítica en la V6 (Unidades: m/N).

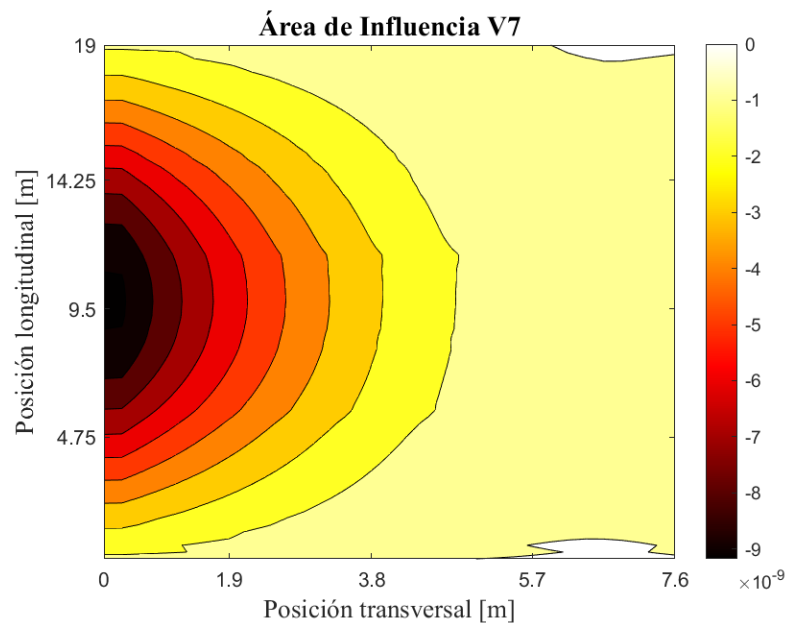


Figura A5. Gráfica de contorno del área de influencia analítica en la V7 (Unidades: m/N).

Tabla A1. Resultados de pesaje para las simulaciones del VEH C3-1

VEH C3_1		Valores Identificados							%Error						
Velocidad [km/h]	PT	Vel. [km/h]	X1_ejes [m]	X2_ejes [m]	P1 [Ton]	P2 [Ton]	P3 [Ton]	PBV [Ton]	Vel.	X1_ejes	X2_ejes	P1	P2	P3	PBV
7.20	V2	7.2	3.7	1.4	7.9	11.1	10.9	29.9	0.0	0.0	0.7	0.9	0.5	0.8	0.4
7.20	Centro	7.2	3.7	1.4	7.9	10.9	11.0	21.9	0.0	0.0	0.7	0.8	1.2	0.3	0.5
7.20	V5	7.2	3.7	1.5	8.0	10.6	11.3	22.0	0.0	0.1	0.1	0.1	3.2	3.0	0.1
18.00	V2	18.0	3.7	1.4	7.8	11.3	10.7	22.1	0.0	0.5	0.7	1.9	3.1	2.4	0.3

18.00	Centro	18.0	3.7	1.4	7.8	11.0	11.0	22.0	0.1	0.1	0.8	2.1	0.2	0.2	0.6
18.00	V5	18.0	3.7	1.4	7.9	11.2	10.8	22.0	0.0	0.5	0.7	1.8	2.2	1.8	0.3
36.00	V2	36.0	3.7	1.4	7.4	12.6	9.9	22.5	0.0	0.5	0.7	7.6	14.2	9.9	0.5
36.00	Centro	36.0	3.7	1.4	7.6	11.7	10.5	29.8	0.0	0.5	0.7	5.1	6.2	4.1	0.6
36.00	V5	36.0	3.7	1.4	7.4	12.6	9.8	22.4	0.0	0.7	0.7	7.7	14.5	10.6	0.6
54.00	V2	53.9	3.7	1.4	7.4	11.9	10.7	22.5	0.1	0.4	0.8	7.2	7.7	3.0	0.2
54.00	Centro	54.1	3.7	1.4	7.3	12.9	9.6	22.5	0.2	0.7	0.7	8.7	16.8	12.5	0.7
54.00	V5	53.9	3.7	1.4	7.4	11.7	10.8	22.5	0.1	0.4	0.7	6.9	6.1	1.8	0.3

Tabla A2. Resultados de pesaje para las simulaciones del VEH C3-2

VEH C3_2		Valores Identificados							%Error						
Velocidad [km/h]	Posición transv.	Vel. [km/h]	X1_ejes [m]	X2_ejes [m]	P1 [Ton]	P2 [Ton]	P3 [Ton]	PBV [Ton]	Vel.	X1_ejes	X2_ejes	P1	P2	P3	PBV
7.20	V2	7.2	3.9	1.8	6.9	12.1	13.8	26.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	1.3	0.3
7.20	Centro	7.2	3.9	1.8	6.9	12.2	13.7	25.9	0.0	0.3	0.0	1.0	1.3	2.1	0.6
7.20	V5	7.2	3.9	1.8	7.0	11.8	14.1	25.9	0.0	0.0	0.0	0.2	1.4	0.8	0.2
18.00	V2	18.0	3.9	1.8	6.9	11.9	14.2	32.9	0.0	0.5	1.7	1.7	0.9	1.1	0.2
18.00	Centro	18.0	3.9	1.7	6.9	12.0	13.9	32.8	0.0	0.5	0.6	1.2	0.0	0.6	0.5
18.00	V5	18.0	3.9	1.8	7.0	11.7	14.2	32.9	0.0	0.0	0.6	0.4	2.4	1.6	0.2
36.00	V2	36.1	3.9	1.8	6.6	13.4	13.0	32.9	0.2	0.8	2.9	6.4	11.4	7.5	0.4
36.00	Centro	36.1	4.0	1.8	6.7	13.2	12.9	32.8	0.4	1.8	1.1	4.4	9.8	7.6	0.6
36.00	V5	36.1	3.9	1.8	6.7	12.7	13.5	32.9	0.2	0.8	0.6	4.4	5.7	3.6	0.4
54.00	V2	54.1	3.9	1.8	6.4	13.5	13.0	32.9	0.2	0.3	2.9	8.0	12.1	7.2	0.3
54.00	Centro	53.9	3.9	1.7	6.3	12.5	13.9	32.7	0.1	0.3	0.6	9.8	4.0	0.4	0.8
54.00	V5	54.0	3.9	1.8	6.4	13.5	13.0	32.8	0.1	0.5	3.4	8.8	12.4	7.4	0.5

Tabla A3. Resultados de pesaje para las simulaciones del VEH C6

VEH C6		Valores Identificados												
Velocidad [km/h]	Posición transv.	Vel. [km/h]	X1_ejes [m]	X2_ejes [m]	X3_ejes [m]	X4_ejes [m]	X5_ejes [m]	P1 [Ton]	P2 [Ton]	P3 [Ton]	P4 [Ton]	P5 [Ton]	P6 [Ton]	PBV [Ton]
7.2	V2	7.2	3.20	1.4	5.0	1.4	1.4	4.9	9.1	8.9	12.1	11.9	14.1	60.8
7.2	Centro	7.2	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	5.0	9.0	8.9	11.9	11.9	14.0	60.7
7.2	V5	7.2	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.9	9.1	8.9	11.8	11.9	14.1	60.8
18	V2	18.0	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.9	9.1	8.9	12.0	11.6	14.4	60.9
18	Centro	18.0	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.9	9.1	8.9	11.7	11.7	14.4	60.7
18	V5	18.0	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.9	9.2	8.9	12.0	11.4	14.6	60.9
36	V2	36.0	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.9	8.9	8.9	11.7	12.5	13.9	60.9
36	Centro	36.0	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.8	9.1	8.9	11.7	11.9	14.3	60.7
36	V5	36.0	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.7	9.7	8.2	12.4	11.1	14.6	60.8
54	V2	54.1	3.2	1.4	5.0	1.4	1.4	4.9	9.5	8.0	10.9	16.3	10.9	60.5
54	Centro	53.9	3.24	1.38	4.97	1.38	1.38	4.8	9.7	8.0	12.3	13.9	11.6	60.2
54	V5	53.9	3.24	1.38	4.97	1.38	1.38	4.8	9.8	7.8	12.0	14.3	11.7	60.5

%Error												
Vel.	X1_ejes	X2_ejes	X3_ejes	X4_ejes	X5_ejes	P1	P2	P3	P4	P5	P6	PBV
0	0	0	0	0	0	0.5	0.6	1.4	0.1	0.8	0.1	0.3
0.0	0	0	0	0	0	0.5	0.4	0.7	0.8	0.5	0.3	0.5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.7	0.8	1.3	0.9	1.0	0.3
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.8	1.6	1.1	0.1	3.7	3.0	0.2
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.3	1.5	1.6	2.4	2.6	2.8	0.5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.0	2.0	1.4	0.0	5.4	4.3	0.2
0.0	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	1.5	0.8	1.2	2.8	4.5	0.6	0.2

0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.8	0.7	1.4	2.5	0.8	2.5	0.5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.6	8.2	9.4	3.6	7.2	4.5	0.3
0.2	0.31	3.14	0.20	1.43	1.43	2.8	5.6	11.0	9.4	35.8	22.0	0.9
0.1	1.2	1.43	0.60	1.43	1.43	3.3	7.4	11.6	2.1	15.7	16.9	1.3
0.1	1.2	1.43	0.60	1.43	1.43	4.9	8.5	13.0	0.4	19.4	16.1	0.9