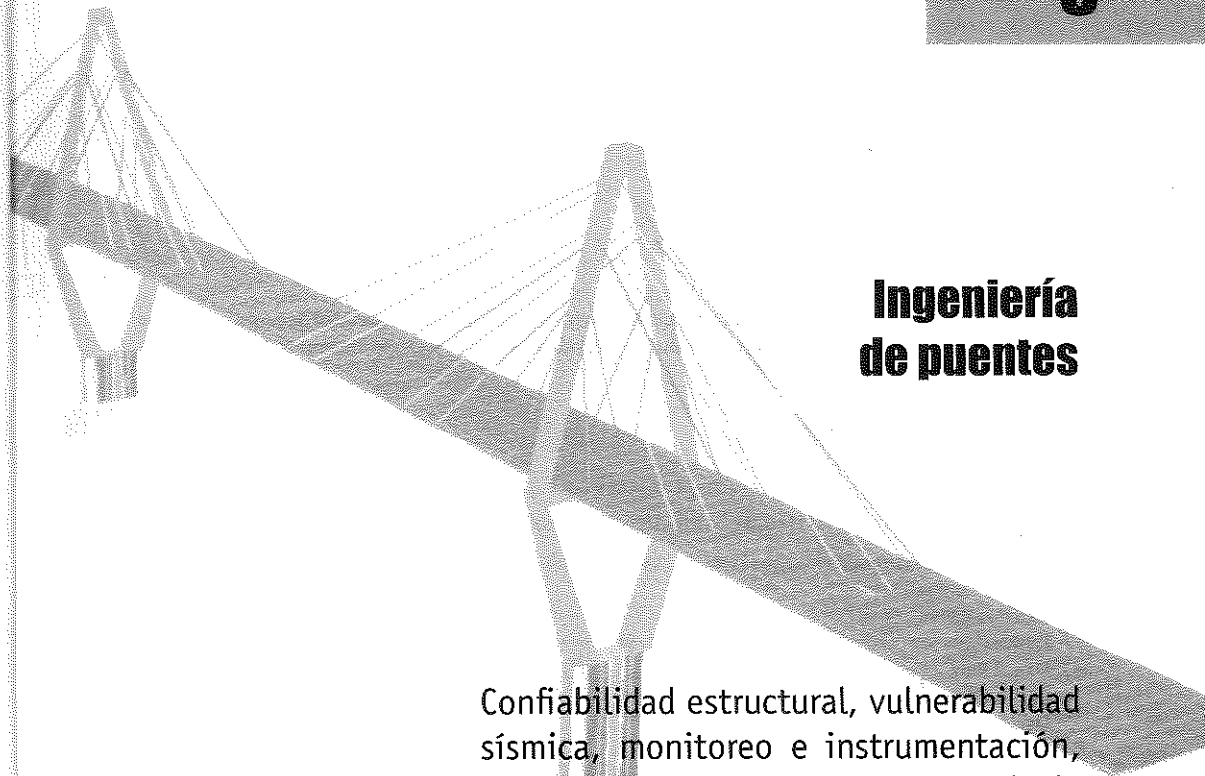




Ingeniería de puentes

Confiabilidad estructural, vulnerabilidad
sísmica, monitoreo e instrumentación,
capacidad de carga, estimación de la
tensión de cables a partir de frecuencias
naturales, aisladores sísmicos y cargas
dinámicas de camiones

Editor
Edgar Eduardo Muñoz



Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil, Electrónica e Instituto Geofísico

INGENIERÍA DE PUENTES

Confiabilidad estructural, vulnerabilidad sísmica, monitoreo e instrumentación, capacidad de carga, estimación de la tensión de cables a partir de frecuencias naturales, aisladores sísmicos y cargas dinámicas de camiones

© Pontificia Universidad Javeriana

Edgar Muñoz (Editor)
Federico Núñez
Antonio Magallón
Jorge Alberto Rodríguez
Alfonso Ramos
Camilo Otálora
Paul Smith
Daniel Ruiz
Carlos Flórez
David Gómez
Mahim Flórez
Giordano Alberto Avellaneda Araque
Ricardo Selim Noguera Facuseh
Francisco Galvis
Mauricio Bahamon
Wilson Rodríguez

Primera edición: Septiembre de 2012
Número de ejemplares: 300

ISBN: 978-958-716-566-1

Corrección de estilo:
Viviana Zuluaga

Diagramación y diseño de portada:
Luz Mery Avendaño

Impresión:
Editorial Gente Nueva
Carrera 17 # 30-16
Conmutador: 320 21 88
Bogotá, D. C.

Impreso y hecho en Colombia
Reservados todos los derechos

CONTENIDO

Introducción

7

CAPÍTULO 1

Conceptos básicos de confiabilidad estructural

Edgar Muñoz; Federico Núñez; Antonio Magallón

1.1	Antecedentes	14
1.2	Definición y fundamentos del índice de confiabilidad	16
1.3	Funciones de desempeño o estado límite	22
1.4	Tipos de variables estudiadas	24
1.5	Definición de falla	27
1.6	Aspectos básicos de la calibración de códigos basada en confiabilidad	27
1.6.1	Índice de confiabilidad límite	30
1.6.2	Carga de revisión	36
1.6.3	Factores de mayoración de carga muerta	37
1.6.4	Factores de mayoración de carga viva	38
1.6.5	Factores de reducción de la resistencia	39
1.6.6	Criterios de aplicación	41
	Referencias bibliográficas	43

CAPÍTULO 2

Tecnología aplicada a la instrumentación de puentes

Camilo Otálora; Mahim Flórez; Edgar Muñoz; Federico Núñez

2.1	Adquisición de datos	47
2.1.1	Sensores	48
2.2	Instrumentación en puente Puerto Salgar	57
2.2.1	Sensores utilizados	57
2.2.2	Montaje de los sensores en el puente	60

2.2.3 Acondicionamiento y adquisición de datos.....	60
2.3 Instrumentación en puente viaducto César Gaviria Trujillo (Pereira-Dosquebradas).....	62
2.3.1 Sensores utilizados.....	63
2.3.2 Sistema de adquisición.....	67
Referencias bibliográficas.....	71

CAPÍTULO 3

Estudio puente Puerto Salgar

Edgar Muñoz; Federico Núñez; Wilson Rodríguez; Camilo Otálora;

Daniel Ruiz

3.1 Antecedentes de puentes de armadura	74
3.1.1 Breve reseña histórica	74
3.1.2 Tipología de las armaduras.....	81
3.1.3 Colapsos de puentes de armadura	85
3.1.4 Daños típicos y obras de actualización en armaduras	91
3.2 Antecedentes del puente Puerto Salgar	91
3.3 Metodología	92
3.3.1 Recopilación de información existente	92
3.3.2 Autorización y permisos	94
3.3.3 Diseño del sistema electrónico para la instrumentación	94
3.3.4 Etapas en campo.....	95
3.3.5 Análisis de resultados	99
Conclusiones.....	114
Recomendaciones.....	115
Referencias bibliográficas.....	116

CAPÍTULO 4

Estudio viaducto César Gaviria Trujillo

Edgar Muñoz; Federico Núñez; Jorge A. Rodríguez

Camilo Otálora; Alfonso Ramos

4.1 Generalidades de puentes atirantados	120
4.2 Etapas y análisis de resultados del viaducto César Gaviria Trujillo.....	124
4.2.1 Datos generales y descripción	124
4.2.2 Información existente.....	126
4.2.3 Materiales y ensayos	127
4.2.4 Estudio de respuesta local.....	130
4.2.5 Desarrollo y calibración de modelos estructurales.....	170

4.2.6 Monitoreo e instrumentación.....	186
4.2.7 Verificación de tensiones de tirantes	189
4.2.8 Análisis de confiabilidad estructural	198
Conclusiones.....	207
Agradecimientos.....	209
Referencias bibliográficas.....	209

CAPÍTULO 5

Desarrollo de un algoritmo computacional para la estimación de la tensión de cables en puentes atirantados, con base en la medición experimental en laboratorio y campo de sus modos y frecuencias naturales de vibración

Giordano Alberto Avellaneda Araque; Ricardo Selim Noguera Facuseh;

Edgar Muñoz

5.1 Introducción.....	213
5.2 Metodología	214
5.2.1 Estado del arte	215
5.2.2 Marco conceptual.....	217
5.3 Desarrollo del algoritmo computacional.....	225
5.4 Diseño y construcción del modelo a escala.....	227
5.5 Calibración en laboratorio.....	229
5.6 Características del puente.....	232
5.7 Resultados de validación	233
Conclusiones.....	242
Recomendaciones.....	244
Agradecimientos.....	244
Referencias bibliográficas.....	245

CAPÍTULO 6

Estudio del comportamiento dinámico del viaducto Portachuelo basado en medición de vibraciones ambientales

Francisco Galvis; Mauricio Bahamon; Edgar Muñoz

Paul Smith; Jorge Alberto Rodríguez

6.1 Introducción.....	247
6.2 Marco conceptual y evaluación del estado del arte	248
6.3 Descripción del viaducto Portachuelo.....	250
6.3.1 Características generales	250
6.3.2 Superestructura	251
6.3.3 Subestructura.....	253

6.4	Criterios de diseño sísmico	253
6.4.1	Carga muerta y masa	253
6.4.2	Espectro de diseño	254
6.5	Materiales.....	255
6.5.1	Concreto.....	255
6.6	Apoyos.....	256
6.6.1	Comportamiento ante carga vertical.....	257
6.6.2	Comportamiento ante carga horizontal.....	258
6.7	Metodología y resultados.....	258
6.7.1	Monitoreo e instrumentación.....	259
6.8	Vibraciones ambientales de la estructura.....	262
6.8.1	Etapas de la instrumentación	263
6.9	Modelo conceptual	269
6.10	Desarrollo de modelos estructurales en el programa SAP-2000	271
6.11	Selección modelo calibrado.....	274
6.12	Cálculo del coeficiente de disipación de energía.....	276
6.13	Análisis cronológico y espectral.....	279
	Conclusiones.....	288
	Trabajos futuros.....	290
	Agradecimientos.....	290
	Referencias bibliográficas	290

CAPÍTULO 7

Estimación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación

Edgar Muñoz; David Gómez; Federico Núñez; Carlos Flórez

7.1	Resumen	293
7.2	Introducción.....	294
7.3	Marco teórico y estado del arte.....	295
7.4	Metodología	297
7.4.1	Selección del puente y recopilación de información.....	297
7.4.2	Diseño e implementación del sistema de instrumentación y monitoreo en el puente	298
7.4.3	Medición de tránsito.....	301
7.4.4	Desarrollo y calibración del algoritmo genético.....	301
7.5	Análisis de resultados.....	310
	Conclusiones.....	315
	Agradecimientos.....	316
	Referencias bibliográficas	316

INTRODUCCIÓN

Los puentes existentes son vulnerables a presentar condiciones de deterioro que afectan su operación, razón por la cual es importante indagar y profundizar sobre su estado y las metodologías para su evaluación estructural. Para ello es necesario documentarse y tener conocimiento sobre la historia, los tipos de puentes, materiales, cimentación, apoyos, juntas, clases de componentes, proceso constructivo y demás aspectos que son esenciales para las labores de inspección visual, diagnóstico, auscultación profunda, capacidad de carga, análisis de confiabilidad y riesgo, modelos de deterioro, mantenimiento, rehabilitación, entre otras.

Por otro lado, se debe investigar en nuevas metodologías para la evaluación de puentes existentes basados en técnicas de confiabilidad estructural, y que permitan una futura normativa nacional, ya que en la actualidad se emplean las mismas especificaciones de diseño de puentes para su revisión. La reglamentación actual (CCCDSP) es concebida para el diseño de puentes nuevos y no para existentes, que tienen niveles de deterioro y desgaste que deberán considerarse en su evaluación. Tema en el que se debe ahondar y que ha sido analizado por diferentes investigadores, entre ellos Sobrino et al [1], quienes afirman:

(...) la evaluación de los métodos actualmente usados en el mundo para determinar la capacidad estructural de cualquier tipo de estructura existente, muestra que puede llegar a ser limitada por la naturaleza variable de muchos de los fenómenos asociados a cargas, resistencias de elementos estructurales, resistencias reales de los materiales con que fueron construidos, niveles de deterioro estructural, fluctuaciones en cargas que son altamente variables y repetitivas, entre otros.

De acuerdo con lo anterior y como se menciona en las referencias [2] y [3], el Estado ha trabajado en producir bienestar social y desarrollo económico en la nación, especialmente cuando implementó el Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL) en 1996, a través de un convenio internacional de asistencia técnica entre el Instituto Nacional de Vías (Invías) y la Dirección de Carreteras del Ministerio de Transportes de Dinamarca, herramienta que ha fortalecido la gestión relacionada con el seguimiento y conservación de los puentes de la red vial nacional. Dicho sistema se apoyó en las experiencias de DAMBRO (Sistema de Administración de Puentes de Dinamarca) y SIPUMEX (Sistema de Administración de Puentes de México).

Dada la importancia de este tema para el país y conscientes de la responsabilidad –del Estado y la academia– de investigar y generar aportes (nuevo conocimiento) significativos en esta área, el grupo de investigación “Estructuras y Construcción” de la Pontificia Universidad Javeriana presenta a la comunidad académica y a la ingeniería nacional esta segunda publicación. El tomo 3 del libro *Ingeniería de puentes*, incluye nuevas investigaciones y la profundización o complemento de algunas otras que hacen parte de los tomos anteriores (ver [2] y [3]). Este trabajo se fundó en:

- Proyectos de investigación internos auspiciados por la Vicerrectoría Académica, tales como:
 - ▷ Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación.
 - ▷ Vulnerabilidad sísmica de puentes existentes empleando confiabilidad estructural y apoyada en monitoreo e instrumentación.
 - ▷ Algoritmo genético para la determinación de las cargas dinámicas de camiones pesados que circulan sobre un puente instrumentado.
- El convenio interinstitucional entre la Pontificia Universidad Javeriana y el Instituto Nacional de Vías denominado: “Aunar esfuerzos técnicos y financieros para incrementar la seguridad y estabilidad del viaducto César Gaviria Trujillo de la carretera solución vial Pereira – Dosquebradas (ruta 29 RSA) y del puente Cajamarca en la carretera La Línea – Ibagué” (ver [4]).
- Trabajos llevados a cabo con profesores e investigadores de Seattle University e Illinois Institute Technology.
- Trabajos de grado meritario(s) o nominado(s) a mérito de la Pontificia Universidad Javeriana.

Esta obra contiene los avances y resultados del grupo de investigación “Estructuras y Construcción” que han sido publicados en el ámbito nacional e internacional en el área de puentes y es producto de un trabajo interdisciplinario, que se constituye en un aporte pertinente y útil (semilla) para el país y que consta de siete (7) capítulos.

El primer capítulo presenta algunos fundamentos de la confiabilidad estructural aplicados a la ingeniería de puentes, tales como: antecedentes, definición, estados límites, tipos de variables y definición de falla. Finalmente se exponen los aspectos principales utilizados para la calibración de algunos de los códigos apoyados en confiabilidad.

El segundo capítulo describe los equipos y sistemas electrónicos empleados para la instrumentación de los puentes: sistemas de adquisición de datos, sensores, potenciómetro lineal, (*linear variable differential transformer*, LVDT), *strain gages*, acondicionamiento de señal para *strain gages*, acelerómetros, sistemas de montaje, entre otros. También se transmite la experiencia del grupo en la instrumentación y el monitoreo de los puentes Puerto Salgar y viaducto César Gaviria Trujillo, que se constituye en un aporte para el país y un ejemplo de trabajo interdisciplinario entre el grupo de investigación y el Departamento de Ingeniería Electrónica.

El tercer capítulo contiene los resultados obtenidos del primer proyecto de investigación (interno) antes mencionado, y que fueron publicados internacionalmente (ver Muñoz et al. [5]). Allí se presentan los antecedentes y las labores que fueron necesarias para el análisis de confiabilidad estructural basado en instrumentación de la superestructura de este puente, solamente para efectos de carga vertical, tales como: levantamiento geométrico estructural, instalación del sistema electrónico, prueba de carga, tareas de instrumentación y monitoreo estructural, calibración del modelo estructural, ensayos en materiales, conteo de tráfico, comparación indirecta de las cargas reales con las cargas de diseño (C-40-95) y rangos de los índices de confiabilidad de los elementos instrumentados.

El cuarto capítulo comprende la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga del puente basado en confiabilidad estructural y apoyada en monitores e instrumentación; lo que implicó: levantamiento geométrico estructural, ensayos en materiales, estudios de refracción sísmica, estudio de la propiedades dinámicas del suelo, estudio de efectos locales, determinación de nueve (9) espectros con diferentes periodos de retorno, prueba de carga, calibración de modelo estructural para cargas verticales y comportamiento dinámico, índices de confiabilidad para cargas verticales y sismo, comparación de las cargas reales con las cargas de diseño, entre otras. Fue producto del convenio interinstitucional con el Invías (ver Muñoz et al. [4]) y cuyos resultados se encuentran en la referencia [6].

El quinto capítulo presenta una nueva metodología para estimar la tensión de tirantes de acuerdo con sus modos y frecuencias naturales de vibración, mediante el aplicativo computacional apoyado en el método de los elementos finitos (FEM) y en análisis detallados de las señales (ver Avellaneda et al. [7]).

El sexto capítulo es una investigación sobre el estudio del comportamiento dinámico experimental de la calzada en dirección Ubaté – Bogotá del puente Portachuelo construido con aisladores sísmicos (ver Galvis et al. [8]).

El último capítulo determina las cargas por eje de los camiones que circulan por un puente ubicado en una de las vías principales de Colombia, utilizando la técnica de control *Bridge Weight in Motion* (BWIM), no empleada antes en el país. Para ese fin, se instrumentaron cuatro vigas con un sistema electrónico de medición de tráfico en cada carril, además de un sistema de adquisición de datos y ensayos de laboratorio. Los resultados de esta investigación, establecidos en una prueba piloto, fueron publicados en todo el mundo (ver Muñoz et al. [9]).

Esta publicación está dirigida especialmente a profesores e investigadores en puentes e ingenieros civiles con fundamentos en el área de estructuras y con experiencia específica en labores de evaluación de capacidad de carga y vulnerabilidad sísmica. Es también una herramienta de seguimiento y control útil para las entidades públicas y privadas –tanto en el contexto nacional como internacional– que tengan dentro de sus alcances la responsabilidad de resguardar y conservar los puentes de la red vial nacional. Provee además a estudiantes de pregrado y posgrado de Ingeniería civil, una compilación de resultados prácticos, que sin duda serán de gran ayuda para sus estudios e investigaciones.

Referencias bibliográficas

- [1] Sobrino, J., y Casas, R. (1993). "Técnicas de evaluación de puentes existentes mediante criterios de fiabilidad. Aplicación a un puente de hormigón armado. *Revista Rutas*, España.
- [2] Muñoz, E. E. (2012). *Ingeniería de puentes. Tomo 1: Reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación*. Grupo de investigación "Estructuras y Construcción". Bogotá, Colombia: Editorial Javeriana, Pontificia Universidad Javeriana.
- [3] Muñoz, E. E. (2012). *Ingeniería de puentes. Tomo 2: Colapso, inspección especial, socavación, vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga*. Grupo de investigación "Estructuras y Construcción". Bogotá, Colombia: Editorial Javeriana, Pontificia Universidad Javeriana.
- [4] Informe final viaducto Pereira – Dosquebradas. (2008). Proyecto "Aunar esfuerzos técnicos y financieros para incrementar la seguridad y estabilidad del viaducto César Gaviria Trujillo de la carretera solución vial Pereira – Dosquebradas (ruta 29 RSA) y del puente Cajamarca en la carretera La Línea – Ibagué. Convenio Pontificia Universidad Javeriana e Instituto Nacional de Vías.
- [5] Muñoz, E., Núñez, F., Otálora, C., Rodríguez, W., y Ruiz, D. (2006). "Confiabilidad estructural de un puente en acero apoyados en monitoreo e instrumentación". Muñoz, Edgar et al. *Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente en acero basado en confiabilidad estructural*. Rev. ing. constr., 2008, vol.23, no.3, p.125-144. ISSN 0718-5073.
- [6] Muñoz, E., Rodríguez, J., Núñez, F., Otálora, C., y Ramos, A. (2008). "Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basado en confiabilidad estructural". Muñoz, Edgar et al. *Vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de un puente atirantado basados en confiabilidad estructural*. Rev. ing. constr., Ago 2010, vol.25, no.2, p.285-323. ISSN 0718-5073.
- [7] Avellaneda, G., y Noguera, R. (2011). "Desarrollo de un algoritmo computacional para la estimación de la tensión de cables en puentes atirantados con base en la medición experimental en laboratorio y campo de sus modos y frecuencias naturales de vibración". Tesis de grado de la Pontificia Universidad Javeriana. Postulada a meritaria. Director: Édgar Eduardo Muñoz Díaz. Bogotá, Colombia.
- [8] Galvis, M., y Bahamon, M. (2011). "Estudio del comportamiento dinámico del viaducto Portachuelo basándose en mediciones de vibraciones ambientales". Tesis de grado de la Pontificia Universidad Javeriana. Declarada meritaria. Director: Édgar Eduardo Muñoz Díaz y Paul Smith. Bogotá, Colombia.
- [9] Muñoz, E. E., Gómez, D., Núñez, F., y Flórez, C. (2011). "Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación". Muñoz, Edgar et al. *Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación*. Rev. ing. constr., Dic 2011, vol.26, no.3, p.321-352. ISSN 0718-5073.

- [22] AGOM. (2008). *Test certificate of elastometric e-link bearings document No. TC.0801254.001*.
- [23] Applied Technology Council. (1995). *ATC 19: Structural response modification factors*.
- [24] Aguilar, R. (2007). *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte*. Quito, Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército.
- [25] Kappos, A., Paraskeva, T., y Sextos, A. (2005). "Modal pushover analysis as a means for the seismic assesment of bridge structures". *Proceedings of the 4th European Workshop the seismic behaviour of irregular and Complex Structures*, Thessaloniki, Greece.
- [26] Newmark, N. M., y Hall, W. J. (1982). Harvard University. *Earthquake spectra and design*, Berkeley, Calif.: Earthquake Engineering Research Ins.
- [27] Miranda, E. (2000) "Inelastic displacement ratios for structures on firm sites". *Journal of Structural Engineer*, 126, 1150-1159.
- [28] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sísmo resistente NSR-10*. Bogotá, Colombia: AIS.
- [29] Illinois, 2011, Board of trustees of University of Illinois at Urbana- Champaign and Youseff Hashash.
- [30] National Instruments Inc., 1976. NI LabVIEW. *Austin*, Texas.
- [31] Computers and Structures Inc., 1999. SAP2000: Three dimensional static and dynamic finite element analysis and design of structures. Berkeley, California, p.381.

CAPÍTULO 7

ESTIMACIÓN DE CARGAS DINÁMICAS DE CAMIONES PESADOS QUE TRANSITAN EN UN PUENTE BASADO EN ALGORITMOS GENÉTICOS E INSTRUMENTACIÓN

EDGAR MUÑOZ, M.Sc, PROFESOR E INVESTIGADOR¹
 DAVID GÓMEZ, M.Sc, PROFESOR E INVESTIGADOR²
 FEDERICO NÚÑEZ, MSc, PROFESOR E INVESTIGADOR³
 CARLOS FLÓREZ, M.Sc, PROFESOR E INVESTIGADOR⁴

7.1 Resumen

Esta investigación determina las cargas por eje de los camiones que circulan por un puente ubicado en una de las vías principales de Colombia, utilizando la técnica de control *Bridge Weight in Motion* (BWIM), no empleada antes en el país. Nuestro grupo de investigación implementó la metodología de los algoritmos genéticos, instrumentación y monitoreo, para el puente denominado Boquerón, en la vía Bogotá-Villavicencio.

Para ese fin, se instrumentaron cuatro vigas con un sistema electrónico de medición de tráfico en cada carril, además de un sistema de adquisición de datos y ensayos de laboratorio. Se desarrolló la calibración de su modelo estructural y la generación de funciones matemáticas para hacer converger líneas de influencia de cargas con pruebas experimentales y así determinar las cargas en movimiento de los camiones. En adición, se desarrolló una herramienta computacional, capaz de representar con aceptable precisión las cargas en movimiento. Los resultados de esta investigación,

¹ Profesor asociado y director del grupo de investigación de "Estructuras y Construcción" del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

² Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Director de la especialización en Gerencia de construcciones y Tecnología de construcción de edificaciones.

³ Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana y estudiante de doctorado en Ingeniería de *Illinois Institute of Technology*

⁴ Profesor asistente del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Director de la Especialización en Geotecnia vial y pavimentos.

basados en una prueba piloto, fueron publicados internacionalmente (ver Muñoz et al. [1]).

7.2 Introducción

Los puentes de la red vial nacional de Colombia son estructuras esenciales para el país y son, en su mayoría, estructuras antiguas, con deficiencias en mantenimiento durante su vida útil, y en consecuencia, vulnerables por sus condiciones de deterioro. Una de las razones de ese deterioro es el sobrepeso que pueden causar los camiones que circulan por las vías troncales y transversales de la red, que acelera los fenómenos de daños y disminuye apreciablemente su durabilidad. El aumento de estas cargas ha sido detectado por el INVÍAS y las empresas concesionarias, mediante estaciones de control de peso, fijas y móviles; encontrándose sobrepesos de camiones entre 1% y 10% en las estaciones fijas y entre 4% y 16% en las estaciones móviles. Los daños en puentes causados por este sobrepeso exigen del país la inversión de recursos adicionales para su rehabilitación, que se podrían evitar si se mejorara y complementara el sistema de control de pesos en las vías.

Una de las líneas de investigación del grupo de investigación es la referida a la “Ingeniería de puentes y confiabilidad estructural” y está relacionada desde hace cinco años con el estudio estadístico de las cargas reales (pesajes, conteo, entre otros). Para este objetivo, empleamos técnicas de confiabilidad estructural en la evaluación de puentes existentes –a la fecha hemos monitoreado e instrumentado tres puentes de la red vial nacional encontrándose resultados importantes–. En particular, en el proyecto de investigación denominado: “Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación”, hemos estudiado el puente Puerto Salgar (localizado en la carretera Honda–río Ermitaño), con instrumentación, y se encontró que el sobrepeso de los camiones que circulan por el puente varía entre 10 y 15%, además, se pudo comprobar que la carga de diseño C40-95 del CCDSP no incorpora en forma suficiente lo que producen los camiones reales que transitan por esta estructura.

Lo más crítico para la ingeniería nacional es que se han presentado colapsos parciales y totales en algunos de los puentes vehiculares de la red vial nacional; donde la sobrecarga es considerada una de las probables causas. Esta afirmación, se comprueba también en otras investigaciones del grupo de investigación, particularmente en: “Causas del colapso de algunos puentes en Colombia” (Muñoz [2] y Muñoz et al. [3]). Por lo expuesto, las obras de infraestructura vial, nuevas y antiguas, requieren ser sometidas a planes muy claros de mantenimiento, que certifiquen su funcionamiento adecuado, estabilidad y vida útil, entre estos, el control de pesos de los tracto camiones que circulan por las carreteras principales. En consecuencia, es urgente complementar los sistemas de control de pesaje convencionales que actualmente están funcionando

en el país, además implementar sistemas nuevos y de mejor desempeño, con mayores alcances, mayor cobertura y que tengan un costo relativamente bajo, es decir, económicamente viables con el presupuesto asignado por la nación. De acuerdo con esta necesidad, se propone en este documento, un sistema de pesaje en movimiento que determine el peso bruto, peso por eje, tipo y conteo, entre otros, de los camiones que circulan por un puente, a través de instrumentación y el desarrollo de un algoritmo genético para su estado dinámico.

7.3 Marco teórico y estado del arte

Los puentes nuevos y existentes de la red vial nacional de Colombia se diseñan y revisan empleando el camión de diseño C40-95, del CCDSP. Esta carga la determinó la AIS y fue ratificada por la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) en el año de 1997 con el estudio: “Definición de las cargas de diseño para puentes en Colombia”.

En la actualidad, el control y estudio de las cargas de los tracto camiones que circulan por la red vial nacional de Colombia, se realizan a través de sistemas de pesajes estáticos y en movimiento, que son administrados por parte del INVÍAS, del Instituto Nacional de Concesiones (INCO) y las concesiones.

Por otro lado, en el mundo existen dos sistemas de pesaje en movimiento fundamentados en las especificaciones internacionales de la norma ASTM E 1318-02:

El primero, es denominado *Weight in motion* (WIM), que consiste en medir las fuerzas estáticas y dinámicas de los ejes de un vehículo en movimiento permitiendo almacenar datos sobre el peso de los vehículos, el volumen de tráfico, su clasificación y velocidad. Por su forma y manera de instalación tiene la ventaja que los conductores no están enterados de la operación de pesaje y no intentan evitarla; generalmente se encuentran después de un peaje y cuando detectan un camión sobrecargado se realiza el traslado del vehículo a una estación fija (estática), de tal forma que se compruebe la sobrecarga y eventual sanción. Este sistema ha servido para supervisar los vehículos sobrecargados que intentan evadir la normativa vigente del país, que corresponda en el mundo, como fruto del crecimiento del tráfico durante las últimas décadas y buscando la protección de las obras de infraestructura vial, especialmente los puentes.

El segundo sistema de pesaje en movimiento se da a través de un puente instrumentado y se denomina *Bridge weight in motion* (BWIM) que permite determinar el peso dinámico –total y por ejes, entre otros– de los camiones pesados que circulan sobre un puente, basados en su instrumentación y en desarrollos matemáticos denominados algoritmos genéticos. Este sistema proporciona la información sobre factor de impacto, factor de distribución lateral y los registros de esfuerzos que se utilizan para el análisis adicional del puente. Pueden adecuarse para tener las mismas aplicaciones del sistema WIM, con precisión razonable, y ventajas como: ser portátil y eco-

nómico, tener instalación rápida y facilidad de mantenimiento. El BWIM fue creado y utilizado en el mundo en los años setenta por la administración federal de carreteras de Estados Unidos (FHWA), denominándolo inicialmente B-WIM. Por otro lado, Moses [4] introdujo un algoritmo para determinar la carga móvil sobre un puente instrumentado empleando el método de las líneas de influencia. En los años ochenta, se desarrolló el sistema B-WIM denominado AXWAY en Australia, que se apoyó en el mismo concepto de las líneas de la influencia; adicionalmente en 1986, se desarrolló un sistema con mayor eficacia usando alcantarillas, que fue denominado CULWAY. Así mismo, la empresa *Bridge Weighing Systems Inc.* de Estados Unidos, desarrolló uno de los primeros sistemas comerciales de B-WIM en 1989, cimentándose en algoritmos genéticos de Moses. En los años noventa, se desarrollaron tres nuevos sistemas, en Irlanda, Eslovenia y Japón. En Europa, este sistema se utilizó extensamente a partir de 1999, cuando se encontraron mejoras significativas apoyadas en recientes investigaciones (ver Quilligan [5]). Actualmente, en el mundo se están investigando nuevos algoritmos dinámicos para este sistema, empleando técnicas de optimización que buscan mejorar su alcance, exactitud y confiabilidad. En Eslovenia se empleó este sistema, especialmente como parte de la elaboración de la norma para la evaluación de la capacidad de carga de puentes existentes (ver Znidaric et al. [6]).

Los algoritmos genéticos, según Goldberg [7], son algoritmos de búsqueda que se utilizan ampliamente para resolver u obtener soluciones parciales a problemas de optimización. Estos algoritmos, parten de un conjunto de posibles soluciones al problema en cuestión, que se van mejorando por medio de la simulación de procesos de evolución, en los que se incluyen selección natural y de intercambio de información genética, tal y como ocurre en la evolución natural (a lo cual se debe su alusión genética en el análisis estructural). Una de las características principales de este tipo de procedimientos corresponde al hecho de que trabajan sobre una población de soluciones y no con una sola como hacen los procedimientos tradicionales. Con los algoritmos genéticos se pueden explorar diferentes regiones del espacio de soluciones al mismo tiempo, con lo cual la posibilidad de quedar atrapado en un mínimo local se reduce.

Según Quilligan [5], se está investigando en diferentes países métodos de algoritmos genéticos para la evaluación de las cargas en movimiento, que se han fundado en diferentes aspectos y criterios tales como: líneas de influencia, modelos estructurales avanzados en elementos finitos, superficies de influencia en modelos de elementos finitos, entre otros. También en simulaciones numéricas avanzadas que incluyen la presencia múltiple de vehículos, diferentes tipos de puentes y algoritmos dinámicos (ver Chan et al. [8], Law et al. [9], Law et al. [10], Zhu et al. [11], European Commission 4th Framework Programme Transport [12], Gagarine [13], Rowley et al. [14], Tarrantola [15], Chan et al. [16], entre otros).

Experiencia nacional en el tema

El sistema B-WIM no ha sido empleado en Colombia, ni por el INVÍAS, ni el INCO, ni las concesiones o las universidades. No obstante, en un trabajo de grado de la Pontificia Universidad Javeriana (ver Acevedo et al. [17]), se estudió el sistema a través de un prototipo a escala del puente Puerto Salgar (ver figura 7.1), constituyéndose en la primera experiencia nacional en este tema; se basa en simulaciones y pruebas de laboratorio, incluyendo el desarrollo de un algoritmo genético y la instrumentación del prototipo, lográndose resultados, que sirven como insumo para este proyecto y futuras investigaciones relacionadas.

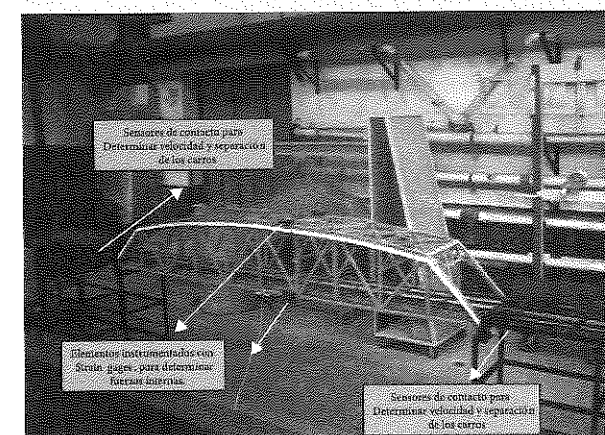


Figura 7.1. Prototipo a escala del puente Puerto Salgar, con su respectivo sistema de instrumentación.

Fuente: [1]

7.4 Metodología

A continuación se presentan cada una de las etapas que implementamos para la ejecución de este proyecto de investigación, con su correspondiente descripción.

7.4.1 Selección del puente y recopilación de información

Esta etapa consistió en la selección de un puente vehicular que sirvió para la adecuación del sistema de pesaje en movimiento, de manera que cumpliera los siguientes requisitos: ser una estructura de una sola luz, estar localizado en vía principal y donde no exista curva horizontal, además, que tenga una superficie de pavimento en buen estado. Para ello, nuestro grupo de investigación de "Estructuras y Construcción" se contactó con la concesión Coviandes, que tiene a su cargo la administración de la carretera Bogotá-Villavicencio, a quienes presentamos los alcances de este proyecto de investigación y decidieron autorizar su implementación en el puente Boquerón.

Este puente está compuesto estructuralmente de vigas postensadas y losa en concreto reforzado, simplemente apoyada, y luz de 20 m. (entre ejes); el ancho del tablero es de 14,50 m. (ver figura 7.2).



Figura 7.2. Vista en perfil del puente Boquerón simplemente apoyado de viga postensada y losa en concreto reforzado.
Fuente: [1]

Adicionalmente, para el trabajo de investigación sobre este puente, la concesión Coviandes nos suministró los planos de construcción y apoyo logístico para las labores de su instrumentación y monitoreo, así mismo, para la información sobre las características del tráfico que pasa sobre el puente; nos proporcionó registros de las cargas por eje de los camiones en la carretera Bogotá-Villavicencio, en los mismos días en que se realizó la instrumentación.

7.4.2 Diseño e implementación del sistema de instrumentación y monitoreo en el puente

Esta labor de campo se dividió en dos partes que se explican a continuación:

7.4.2.1 Sistema de medición del tránsito

Para esta etapa el grupo de investigación adquirió el sistema TRS fabricado por la empresa Canadiense *International Road Dynamics Inc.* (IRD), que permite tener conocimiento en tiempo real de: la velocidad, el número de ejes y la distancia entre ejes de los vehículos de todo tipo que circulan en cada calzada por el puente. Para su instalación y puesta en marcha se contrató a la empresa nacional Contelec, especialista en la adaptación de los sistemas de pesajes estáticos y en movimiento (fabricados por IRD) con quienes realizamos cortes del pavimento y embebimos dos *loop* inductivos y cuatro piezoeléctricos en cada calzada, como se observa en las figuras 7.3 y 7.4.

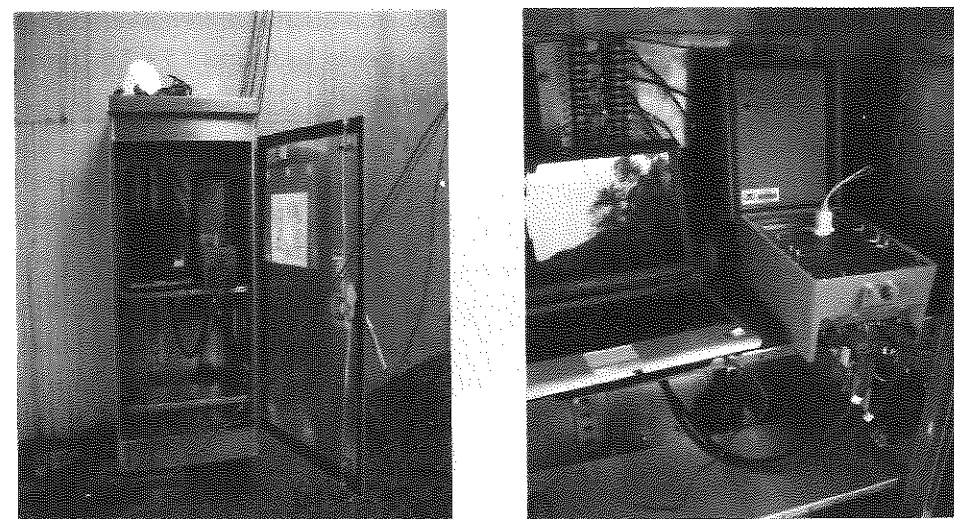


Figura 7.3. Gabinete con las conexiones electrónicas, el sistema suministrado por la empresa canadiense IRD y un computador para la adquisición de los datos de conteos y medición de los vehículos que circulan por el puente.
Fuente: [1]

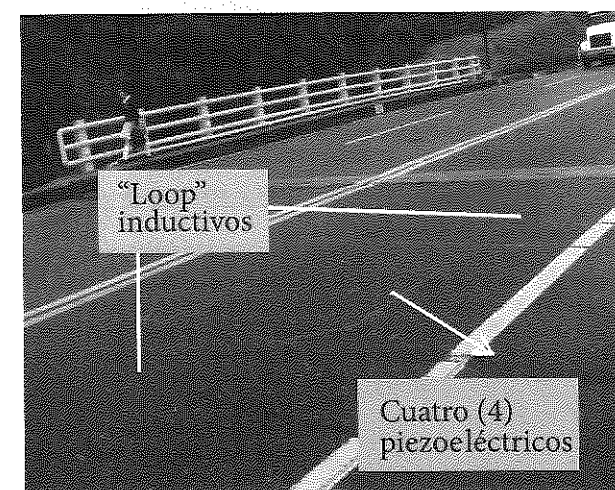


Figura 7.4. Dos loop inductivos y cuatro piezoeléctricos instalados en la calzada Bogotá-Villavicencio.
Fuente: [1]

7.4.2.2 Instrumentación de las vigas

Cuatro de las cinco vigas preesforzadas del puente se instrumentaron mediante la instalación de LVDT, que permitieron medir sus desplazamientos verticales a tiempo real, sincronizados con el sistema de medición del tráfico explicado. Para ello, se dise-

ñaron cerchas apoyadas en andamios, que permitieron instalar en forma vertical los LVDT a la mitad de la luz del puente, como se observa en las figuras 7.5 y 7.6. (Sobre los fundamentos de la instrumentación ver capítulo 2).

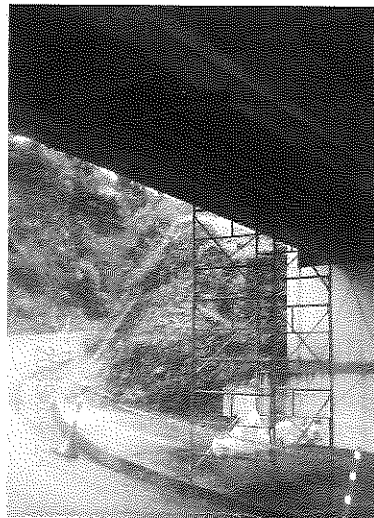


Figura 7.5. Instalación de los LVDT en el centro de las cuatro vigas preesforzadas principales del puente, que permiten medir deformaciones verticales por el paso del tráfico sobre este.

Fuente: [1]

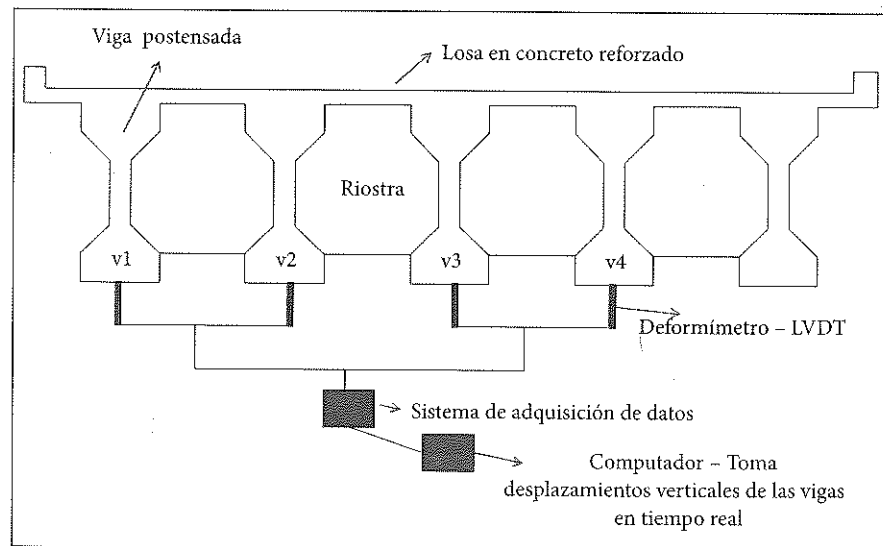


Figura 7.6. Esquema con la localización de los LVDT en las vigas del puente y el sistema de toma de datos.

Fuente: [1]

7.4.3 Medición de tránsito

Otra aplicación del sistema de instrumentación, es la automatización de medición del tránsito discriminado en la vía. Al comparar los resultados obtenidos con los volúmenes de tránsito que presenta el INVÍAS, se comprueba la precisión del dispositivo para medir el tránsito, lo que genera un gran potencial de investigación desde el punto de vista de la ingeniería de tránsito y transporte.

El TPD de camiones obtenido en la presente prueba piloto fue de 5.858; el TPD de camiones reportado por el INVÍAS para el 2008 fue de 5.153, que con un crecimiento moderado podría estar del orden de 5.500 a 5.800 para el 2010; demostrando la consistencia que tienen las mediciones automatizadas de tránsito mediante los sensores de piso instalados. En cuanto al análisis comparativo de la distribución porcentual obtenida en la prueba piloto y la suministrada por el INVÍAS, se encuentra también una gran similitud; en la prueba piloto de la presente investigación se obtuvo una distribución porcentual de pesados de 76%, 5%, 11% y 8%, para C2, C3-4, C5 y >C5; en los volúmenes del INVÍAS la distribución porcentual de pesados es de 64%, 10%, 10% y 16%, para C2, C3-4, C5 y >C5, respectivamente.

Por otra parte, la prueba piloto realizada permitió capturar información de las velocidades de los vehículos con gran consistencia.

7.4.4 Desarrollo y calibración del algoritmo genético

A continuación se presentan las etapas ejecutadas para el desarrollo del algoritmo genético, mediante un aplicativo computacional implementado en MATLAB. Este,

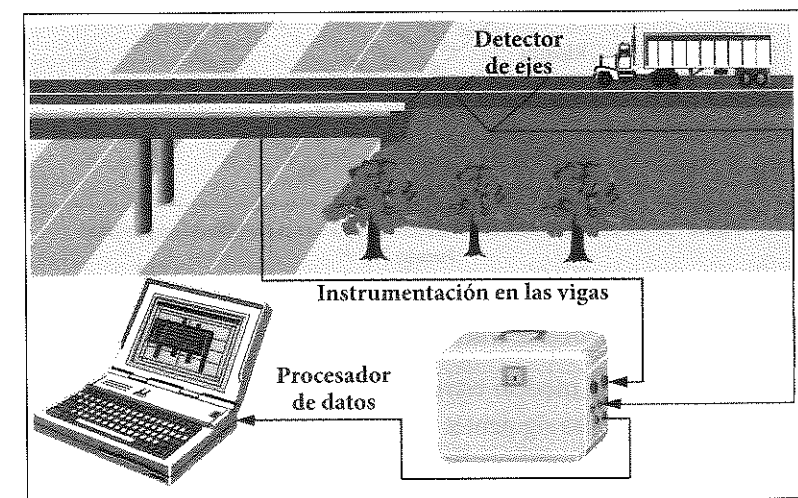


Figura 7.7. Esquema del sistema de pesaje en movimiento de puentes.

Fuente: Znidaric et al. [6], [1].

permite estimar las cargas por eje de los camiones detectados por el sistema electrónico explicado en el numeral 7.4.2.1, de tal forma que se acerque a la magnitud de las deformaciones verticales que sufren las cuatro vigas instrumentadas mediante los sistemas electrónicos explicados en el numeral 7.4.2.2 (ver figura 7.7).

7.4.4.1 Desarrollo del modelo estructural

Con base en los planos de diseño del puente se elaboró el modelo estructural de su tablero tipo "parrilla" o "entramado" que está compuesto por elementos finitos discretos tipo barra o Frame en el programa SAP2000. Este modelo contiene las propiedades geométricas de los elementos de dicho entrepiso (ver figura 7.8), tales como: vigas principales, losa, riostras y bordillos.

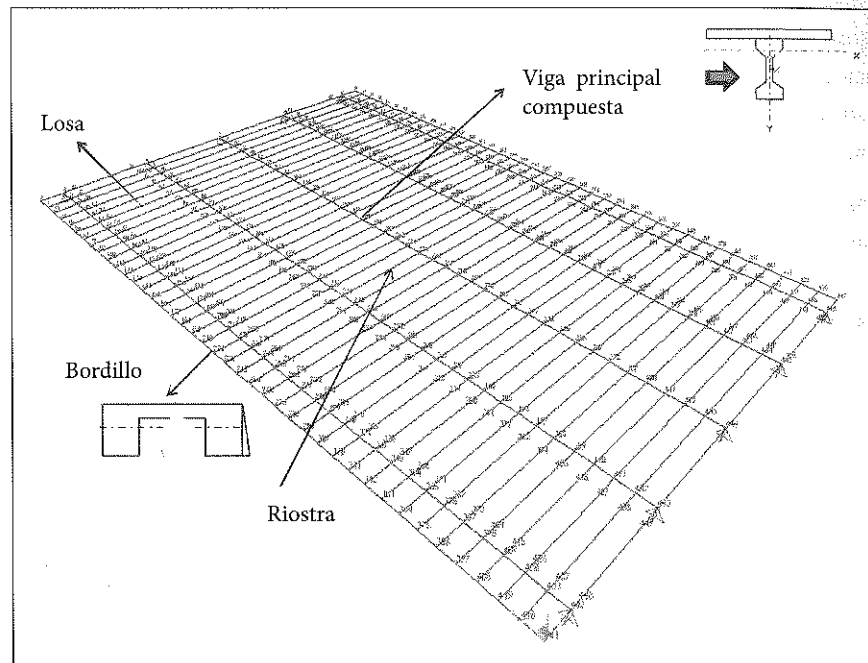


Figura 7.8. Modelo estructural del tablero del puente desarrollado en SAP2000.

Fuente: [1]

7.4.4.2 Calibración del modelo estructural

Para la calibración del modelo estructural del tablero del puente y su matriz de rigidez, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

1. Variación del módulo de elasticidad: se investigó el módulo de elasticidad del concreto del tablero del puente, mediante la extracción de cuatro núcleos. Los núcleos se ensayaron en la máquina universal del laboratorio de mate-

riales del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, encontrándose que tienen una desviación estándar y un coeficiente de variación de 14.143,8 Mpa. (141.438 Kg/cm²) y 39% respectivamente, es decir, valores altos y que pueden tener origen en variaciones de la calidad del concreto durante los procesos constructivos del puente. Dicho módulo varía entre 27.076 y 62.026 Mpa. (270.760 a 620.260 Kg/cm²) y una media de 35.636,5 Mpa. (356.365 Kg/cm²). Para el proceso de calibración del modelo estructural, se emplearon estas características estadísticas y variaciones.

2. Geometría y propiedades del modelo SAP2000: el aplicativo computacional desarrollado en MATLAB se diseñó para extraer información del modelo estructural en SAP2000 y poder trabajar en los procesos de calibración y desarrollo del algoritmo genético solamente en MATLAB. La información obtenida corresponde a:

- Número de nudos y coordenadas en el espacio de los nudos (x, y, z).
- Número de elementos e incidencia de cada uno.
- Propiedades geométricas de cada elemento.
- Número e identificación de los grados de libertad y restringidos.

3. Construcción de la matriz de rigidez global de cada elemento: para la investigación se decidió trabajar en una matriz de rigidez espacial, que tiene seis grados de libertad por nudo (tres desplazamientos y rotaciones). En la ecuación 7-1 se presenta la matriz de rigidez local del elemento tipo "barra" empleada, que se convierte en una matriz de rigidez global usando las ecuaciones 7-2, 7-3 y 7-4 que se muestran a continuación.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & \frac{4EI_y}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \\ \delta_7 \\ \delta_8 \\ \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix} \quad (7-1)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} T_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_0 \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

$$[T_0] = \begin{bmatrix} \cos\phi_{XX} & \cos\phi_{YX} & \cos\phi_{ZX} \\ \cos\phi_{XY} & \cos\phi_{YY} & \cos\phi_{ZY} \\ \cos\phi_{XZ} & \cos\phi_{YZ} & \cos\phi_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

$$[K_{global}] = [T]^T [K_{local}] [T] \quad (7-4)$$

4. Ensamble de la matriz de rigidez de la estructura: con apoyo en los aportes de rigidez de cada elemento se determina la matriz de rigidez de la estructura del modelo estructural a través de un proceso matemático de ensamblaje desarrollado en MATLAB.
5. Vector de cargas externas: el sistema computacional tiene la capacidad de construir un vector con las cargas conocidas por eje de los camiones pesados (obtenidos de las pruebas de carga estáticas y dinámicas), teniendo en cuenta su localización y la correspondiente aplicación en los nudos, y considerando la geometría de los camiones (ver figura 7.9). Se diseñó esta subrutina para tener la capacidad de generar un vector de trenes de carga dinámica o en movimiento que transiten por una o por las dos calzadas.

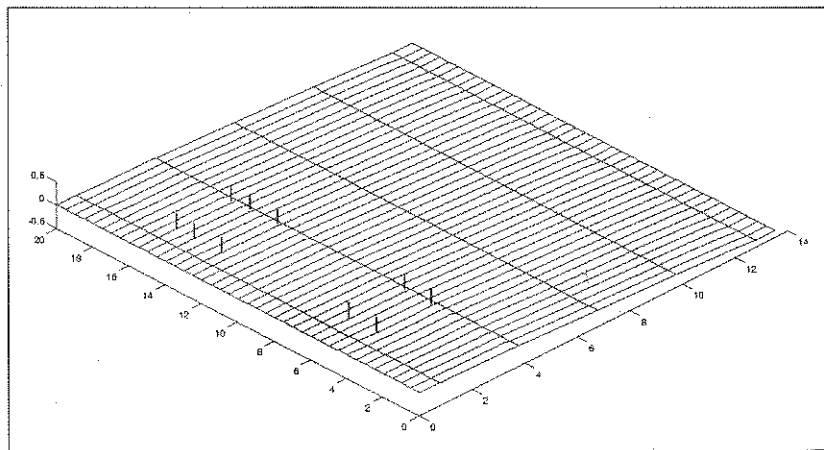


Figura 7.9. Aplicativo computacional en MATLAB del modelo estructural con una hipótesis de carga, cuyos datos se construyen en un vector.

Fuente: [1]

6. Determinación de los desplazamientos: empleando el método de análisis matricial se encontraron estos valores para cada prueba de carga estática, y dentro del proceso de calibración, los desplazamientos teóricos verticales en la mitad de las vigas V1, V2, V3 y V4.
7. Cálculo del error de calibración: se determinaron los errores fundados en la comparación entre los resultados de los desplazamientos en las vigas V1, V2, V3 y V4 experimental y teórica, como se expresa a continuación:

$$ERRORV_i = \frac{ABS(dVit - dVite)}{dVite} * 100 \quad (7-5)$$

$dVit$: Desplazamiento teórico viga i

$dVie$: Desplazamiento experimental viga i

$ERRORV_i$: Error de viga i

El error acumulado promedio, teniendo en cuenta la combinación del error individual en cada viga se determinó como:

$$ERRORAPV_i = \frac{\sum ERRORV_i}{N} \quad (7-6)$$

$ERRORV_i$: Error en cada viga

N : Número de errores en vigas tenidos en cuenta

En el proceso anterior se obtuvieron diferentes alternativas analíticas de solución, lo que permitió seleccionar la que tiene el menor error y la de mayor confiabilidad al comportamiento real del puente. Se procedió a seleccionar una de las pruebas estáticas realizadas en campo, que consistió en colocar en uno de los carriles del puente, un camión C3 (suministrado por la concesión), del que conocíamos previamente su geometría y las cargas por eje. De acuerdo con esta prueba estática y utilizando las etapas que se mencionaron (ver tabla 7.1), se encontraron los siguientes resultados para cada una de las pruebas ejecutadas.

Después del análisis de las diferentes pruebas, se halló que la prueba 5 es la más cercana al comportamiento real del puente, con la cual se obtuvo una matriz de rigidez calibrada de 2676×2676 , con un módulo de elasticidad de 44.000 Mpa (440.000 Kg/cm^2) y que fue la que se utilizó para el desarrollo del algoritmo genético.

Tabla 7.1. Tipos de pruebas de calibración realizadas

Número de prueba	Módulo de elasticidad (ton/mm ²)	Error acumulado promedio (%)	Comentario
1	4,36	8,355	Rigidez de las vigas 2, 3 y 4 sin aumentar. Considerando los errores de las vigas V1, V2, V3 Y V4
2	4,36	7,3525	Disminución de la rigidez de las vigas 2, 3 y 4 en un 5% hasta 0.1507 m ⁴ . Considerando los errores de las vigas V1, V2 V3 y V4
3	4,4	6,83	Disminución de la rigidez de las vigas 2, 3 y 4 en un 5% hasta 0.1507 m ⁴ . Variación del módulo de elasticidad hasta detectar E=4,4 Ton/mm ² . Considerando los errores de las vigas V1, V2 V3 y V4
4	4,4	8,145	Disminución de la rigidez de las vigas 2, 3 y 4 en un 5% hasta 0.1507 m ⁴ , aumento de la rigidez de las vigas 1 y 4 hasta 0,1613 m ⁴ . Considerando los errores de las vigas V1, V2 V3 y V4
5	4,4	4,65	Desplazando las cargas del camión C3 10 cm más cerca de la viga V2, comparando con las anteriores pruebas. Inercia de las vigas V2, V3 y V4 de 0.1586 m ⁴ y módulo de elasticidad de 4.4 Ton/mm ² .

Fuente: [1].

7.4.4.3 Fundamentos y validación del algoritmo genético

Utilizando los resultados obtenidos, se implementó el algoritmo genético, con el que se pueden estimar las cargas por eje de los camiones que circulan por el puente, empleando el siguiente procedimiento:

- Estudio de los rangos de carga estática por eje. La concesión nos proporcionó el registro de los pesajes de los camiones que circularon las fechas en que el puente estuvo instrumentado en este estudio. Esta información sirvió para realizar un análisis de las características estadísticas de cada uno de los ejes de los diferentes camiones, con los que se determinaron los rangos de cargas que se incluyeron para el diseño del algoritmo (ver tabla 7.2).
- Determinación de líneas de influencia teóricas: se desarrolló en MATLAB un aplicativo computacional que permite determinar las líneas de influencia del desplazamiento vertical en el centro de la luz de las vigas V1, V2, V3 y V4 que producen el paso de un camión en cualquier carril. En otras palabras, el

aplicativo se encarga de simular el paso de cualquier tipo de camión variando la magnitud de las cargas por eje a través de un proceso interactivo.

Tabla 7.2. Variación de los pesos por eje de diferentes tipos de camiones que circulan por la carretera Bogotá–Villavicencio

Tipo de camiones	Eje 1					Eje 2					Eje 3					Eje 4				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
C2	3,878	12,6	1,1	1,1	29%	8,976	20,5	1,1	3,32	37%	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
C3	5,526	23,6	1,1	1,4	26%	18,25	25,5	1,3	6,09	33%	18,25	25,5	1,32	6,09	33%	NA	NA	NA	NA	NA
C4	11,51	17,1	4,2	4,5	39%	11,51	17,1	4,2	4,5	39%	18,179	25,4	4,52	7,4	41%	18,18	25,4	4,52	7,4	41%
C3-S2	5,386	30,7	1,6	2,6	49%	11,72	34,3	1,6	5,89	50%	11,721	34,3	5,89	5,89	50%	11,13	20	1,02	6,6	59%
C3-S3	5,6	37,7	1,6	3,1	55%	17,9	39,6	1,0	5,73	32%	17,854	39,6	5,73	5,73	32%	20,8	42,3	1,4	6,7	32%

Tipo de camiones	Eje 5					Eje 6					Peso total				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
C2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	12,854	23,9	4,34	3,65	28%
C3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	23,769	29,2	8,07	6,35	27%
C4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	29,689	36,2	12,9	9,62	32%
C3 S2	11,13	20	1	6,6	0,59	11,13	20	1	6,61	0,59	28,233	48,9	12	12,4	44%
C3-S3	20,82	42,3	1,4	6,7	32%	20,82	42,3	1,4	6,71	32%	44,294	54,6	11,5	12,4	28%

- (a) Promedio
(b) Máximo
(c) Mínimo
(d) Desviación estandar
(e) Coeficiente de variación

Fuente: [1].

Uno de los casos utilizados para el desarrollo y la validación de este algoritmo fue el paso de un camión C3-S3 del que se consultó su geometría, peso por ejes y peso total. La separación entre ejes y su velocidad se obtuvo a través del equipo de medición de tráfico explicado en el numeral 7.4.2.1. En la figura 7.10(a) se presenta una línea de influencia para la viga V1, producto de 6.424 simulaciones en el aplicativo computacional en MATLAB, donde se varió la magnitud de las cargas de los seis ejes del camión.

- Estimación de las cargas por eje: a través de un proceso de convergencia dentro del algoritmo genético sustentado en un proceso de comparación de las diferentes líneas de influencia teóricas con respecto a la línea de influencia experimental del desplazamiento –en el centro de las cuatro vigas obtenidas mediante instrumentación–, se estimaron las magnitudes de las cargas (por eje) de cada camión que circula por el puente.

Para ello se presenta en la figura 7-10(b) las líneas de influencia experimental del desplazamiento de las cuatro vigas instrumentadas, producto del paso por el puente del camión C3-S3.

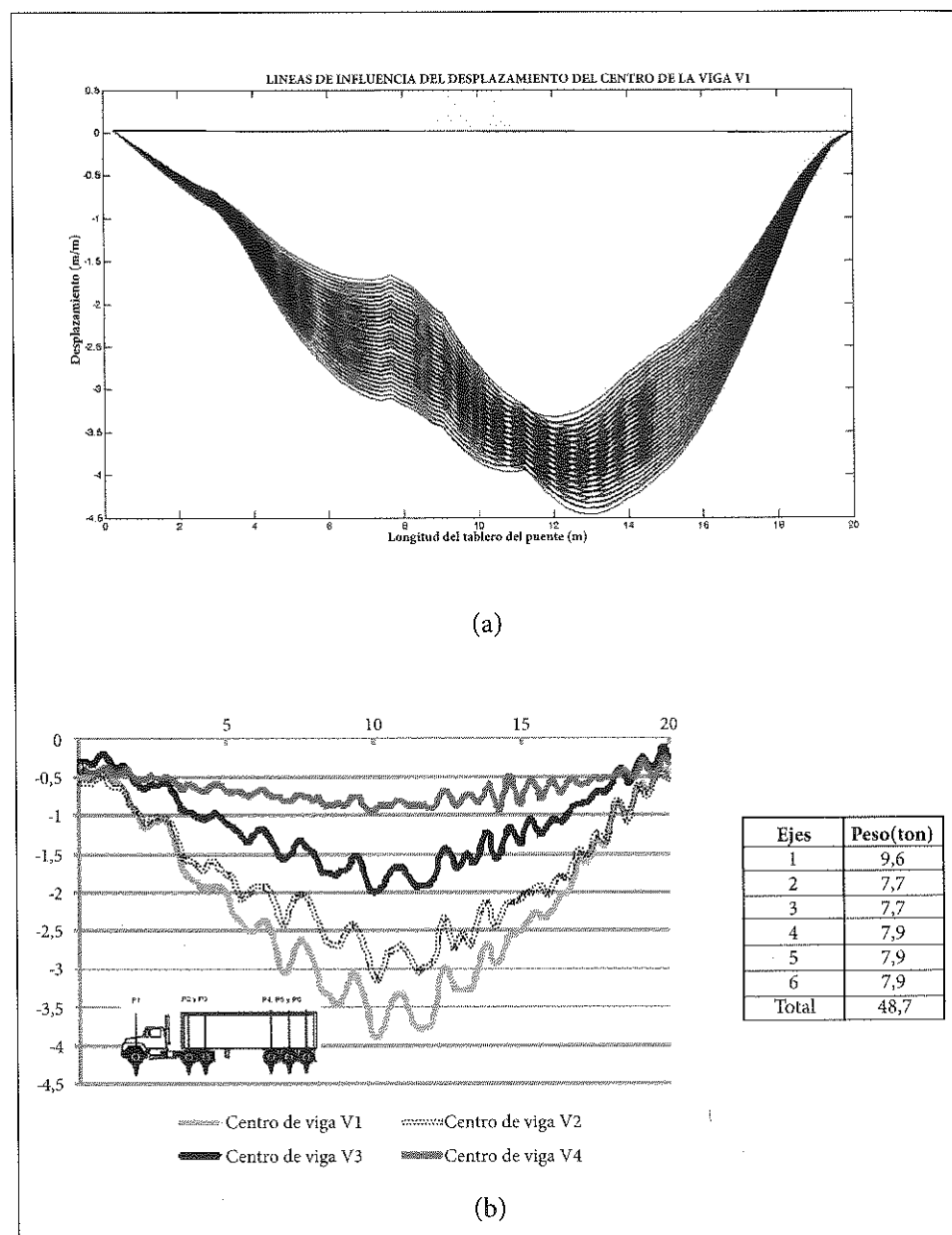


Figura 7-10 (a) Líneas de influencia teórica del desplazamiento en el centro de la luz del puente en la viga V1.
(b) Líneas de influencia experimental del desplazamiento en el centro de la luz del puente en el centro de las vigas V1, V2, V3 y V4.
Fuente: [1]

Con esta información de campo se diseñó una primera etapa del algoritmo que consiste en estimar la carga total del camión, considerando que los pesos por eje son iguales y crecen hasta converger y encontrar el mínimo error acumulado promedio, como se observa en la figura 7.11

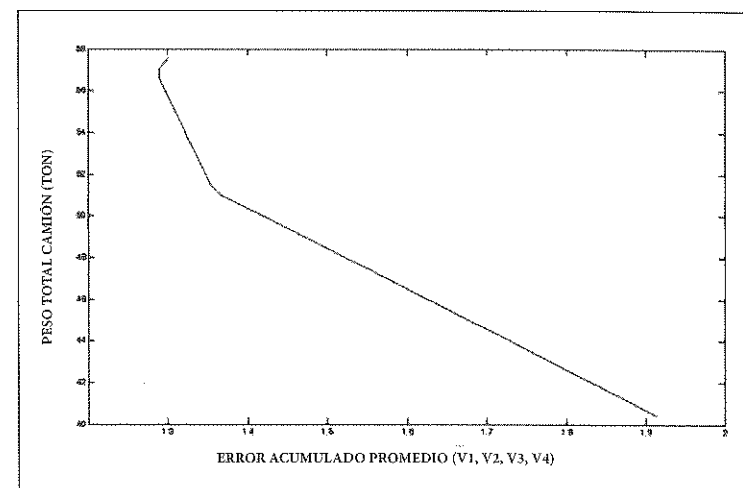


Figura 7.11. Proceso de convergencia para la estimación inicial de la carga total del camión. En la estimación inicial, la carga total del camión C3-S3 encontrada fue de 57.57 toneladas basado en el criterio de seleccionar el menor error acumulado promedio.
Fuente: [1]

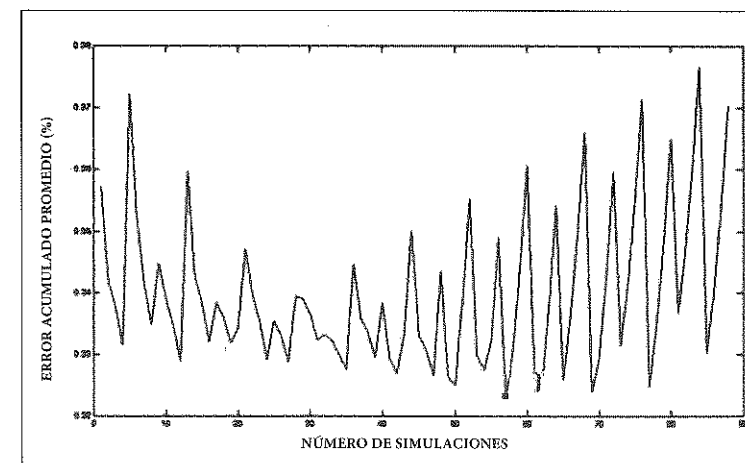


Figura 7.12. Proceso para la estimación final de la carga por eje del camión C3-S3. Identificación del mínimo error acumulado.
Fuente: [1]

Empleando técnicas de optimización y considerando que trabajan sobre una población de soluciones y no con una sola, como hacen los procedimientos tradicionales,

se diseñó la segunda parte del algoritmo donde las variables son el peso de cada eje del camión. Para el caso del camión C3-S3 se tuvieron en el proceso matemático, seis variables y se hicieron diferentes pruebas de calibración, con variaciones del impacto entre 10% y 30%, encontrándose que para el valor del 22% se obtiene la mejor solución al problema basado en un proceso de convergencia, con el que se obtuvo el mínimo error acumulado.

Después se calcularon las líneas de influencia teóricas y se compararon con las experimentales, donde se determinó el nivel de convergencia y, por lo tanto, la confiabilidad en los resultados que se lograron a través del algoritmo genético desarrollado. Se obtuvo un impacto del 22% –que es muy cercano al que recomienda el CCDSP– y una distribución de la magnitud de los ejes con errores que varían entre el 1 y 7%.

Se utilizó el mismo procedimiento explicado para incluir dentro del algoritmo la evaluación de las cargas totales y por eje de los camiones C4 y C3. Estos se lograron gracias a que la concesión nos suministró camiones C4 y C3, de los que conocimos su geometría y peso.

7.5 Análisis de resultados

El algoritmo genético, que se implementó mediante esta prueba piloto, tiene la capacidad de considerar las cargas dinámicas por eje y totales de los diferentes tipos de camiones que circulan por el puente instrumentado. Sin embargo, estima las cargas de dichos camiones cuando hay uno por carril, esto es, cuando no hay presencia múltiple simultánea de cargas en el puente. Este se diseñó para que en trabajos futuros pueda ser adaptado, de tal forma que permita detectar las cargas múltiples simultáneas en un carril o en los dos carriles actuando en el puente.

A través del algoritmo se puede determinar la relación que existe entre diferentes variables, como: peso total de los camiones, desplazamiento promedio del tablero y velocidad de los camiones. Con esta información fue posible determinar una ecuación potencial que permite conocer el peso total de los camiones C3-S3 (que circulan por uno de los carriles) con relación al desplazamiento promedio del tablero (ver figura 7.13); esta es una simplificación con una confiabilidad adecuada, producto de un proceso matemático amplio que incluyó la calibración del modelo estructural, la matriz de rigidez y el algoritmo genético. Con esta relación se pueden comparar las cargas por eje en movimiento con respecto a los límites establecidos, lo que se constituye en una herramienta de control de peso preliminar, muy útil para la empresa de concesión, si decidiera implementar este sistema permanentemente. Mediante este mecanismo se pueden identificar los camiones cuyo peso debe ser verificado en una estación de pesaje fija y hacer un control más óptimo.

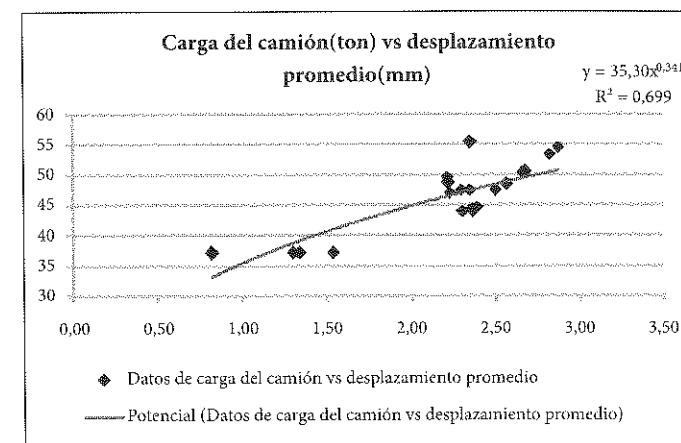


Figura 7.13. Determinación de la función de tendencia que relaciona los desplazamientos de las vigas con la carga total del camión.

Fuente: [1]

En las figuras 7.4 a 7.18 se presentan el peso total en movimiento de los camiones C3-S3 durante 24 horas (día y noche) incluyendo el desplazamiento promedio del tablero. A través de estas gráficas se pueden identificar:

- Horas en las que hay mayor frecuencia de este tipo de camiones.
- Promedio de los pesos en movimiento.
- Horas donde se producen los pesos máximos y mínimos.
- Otros.

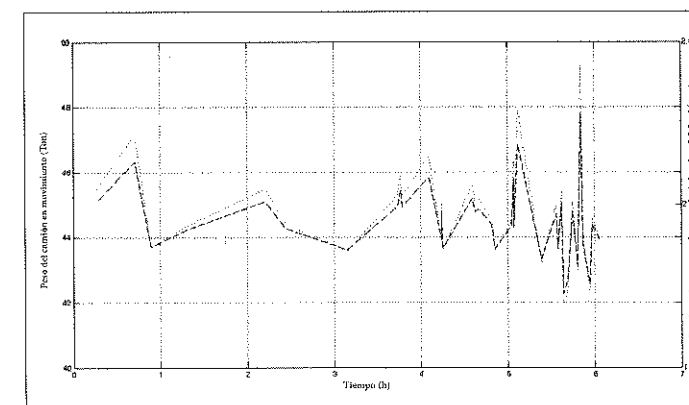


Figura 7.14. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2, V3 y V4) desde las 0 a las 6 horas del día. Número de camiones C3-S3 detectados: 40.

Fuente: [1]

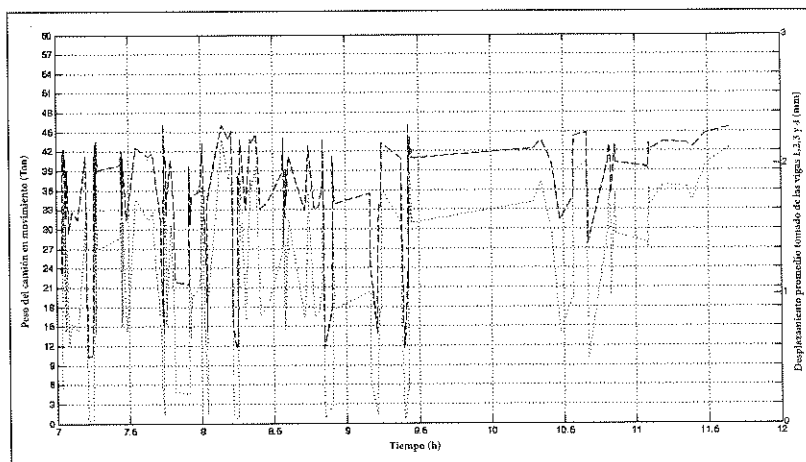


Figura 7.15. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2, V3 y V4) desde las seis a las doce horas del día. Número de camiones C3-S3 detectados: 176. Fuente: [1]

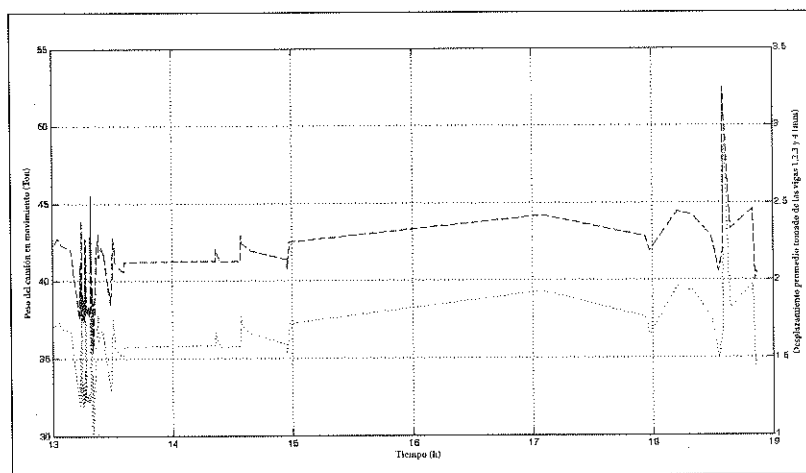


Figura 7.16. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2, V3 y V4) desde las doce a las dieciocho horas del día. Número de camiones C3-S3 detectados: 154. Fuente: [1]

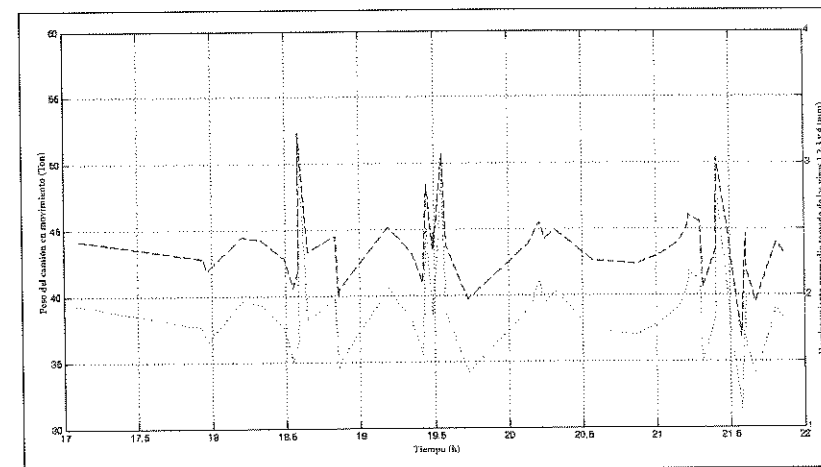


Figura 7.17. Peso total en movimiento y desplazamiento promedio de las vigas del puente (V1, V2, V3 y V4) desde las 18 a las 24 horas del día. Número de camiones C3-S3 detectados: 152. Fuente: [1]

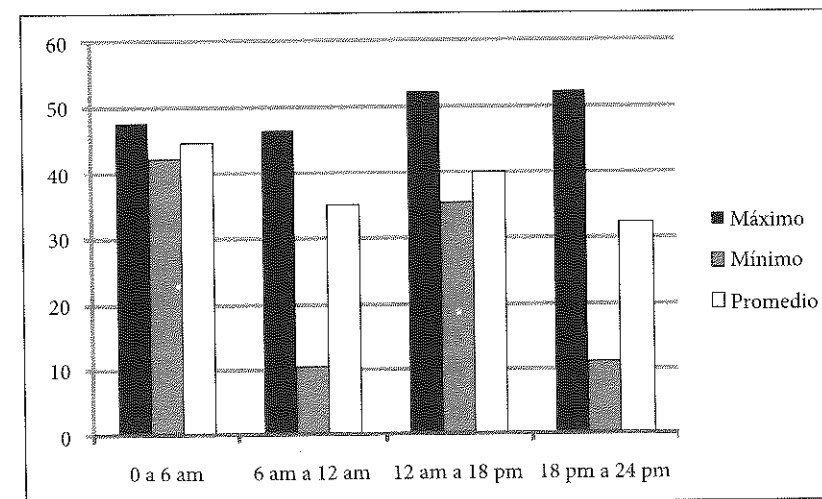


Figura 7.18 Resumen de la carga en toneladas en 24 horas del día, de camiones C3-S3, cuando circulan por el carril Villavicencio-Bogotá. Fuente: [1]

El ejemplo anterior, que se puede extrapolar a cada tipo de camión y carril, es una demostración aproximada de las ventajas del sistema implementado, cuya relación costo/beneficio es mayor, comparada con la obtenida del sistemas de pesaje estático tradicional o el sistema WIM, por lo que se convierte en una opción complementaria que permitiría optimizar la existente.

Otra aplicación del sistema de instrumentación, es la automatización en la medición del tránsito discriminado de la vía. En particular, en la prueba piloto realizada

se pudo hacer la medición de camiones, diferenciada por número de ejes; para los conteos del 5 y 6 de octubre de 2010 no se obtuvo el aforo completo del día, para el día 20 de octubre se presentó el problema que por falta de canalización, era posible que los vehículos utilizaran un tercer carril y no pasaran por los medidores; para los días 21 y 22 de octubre de 2010, se subsanaron estas situaciones y se pudo contar con una medición de 24 horas continuas, compuesta por la tarde-noche del 21 de octubre y la mañana del 22 de octubre, periodo en el que se calculó el TPD para camiones. Al comparar los resultados obtenidos con los volúmenes de tránsito que presenta el INVÍAS, se comprueba la precisión del dispositivo para medir tránsito, lo cual genera un gran potencial de investigación desde el punto de vista de la ingeniería de tránsito y transporte.

El TPD de camiones obtenido en esta prueba piloto fue de 5.858; el TPD de camiones reportado por el INVÍAS para el 2008 fue de 5.153, que con un crecimiento moderado podría estar del orden de 5.500 a 5.800 para el 2010; demostrando la consistencia que tienen las mediciones automatizadas de tránsito mediante los sensores de piso instalados. En cuanto al análisis comparativo de la distribución porcentual obtenida en la prueba piloto y la suministrada por el INVÍAS, se encuentra también una gran similitud; en la prueba piloto de la investigación se obtuvo una distribución porcentual de pesados de 76%, 5%, 11% y 8%, para C2, C3-4, C5 y >C5; en los volúmenes del INVÍAS la distribución porcentual de pesados es de 64%, 10%, 10% y 16%, para C2, C3-4, C5 y >C5, respectivamente.

Otra aplicación que podrían tener los pesajes de los vehículos pesados desde la perspectiva de la ingeniería de transporte, es en los estudios de cuantificación de oferta y demanda en estimación de la carga que llevan los vehículos; en la actualidad, dichos estudios se efectúan a través de encuestas que se aplican a una muestra de los conductores de los vehículos de carga, evitando la subjetividad que implican las respuestas de los encuestados; permitiendo focalizar las encuestas a otras variables tales como el origen/destino de la carga y el tipo de carga transportada.

Por otra parte, la prueba piloto realizada también permitió capturar información de las velocidades de los vehículos, que evidencia una gran consistencia. Por ejemplo, para los días 21 y 22 de octubre de 2011, la velocidad promedio en el sentido Bogotá-Villavicencio fue de 38,3 y 38,5 respectivamente, y en el sentido Villavicencio-Bogotá, fue de 32,3 y 32,0, respectivamente; la diferencia del orden del 20% se debe a que en el sentido hacia Bogotá los vehículos llevan una menor velocidad ya que a poca distancia se encontraba el peaje, en cambio en el otro sentido no se presentaba ninguna restricción a la circulación.

Poder contar con datos confiables de velocidades tiene varias bondades, entendiendo que la velocidad es una variable fundamental para establecer el nivel de servicio de un tramo vial. Dicha captura automática de velocidades, en futuras implemen-

taciones podría permitir una aproximación certera del servicio que está presentando una vía en un momento determinado, lo que es de mucha utilidad, de manera especial en vías concesionadas, donde el servicio que recibe el usuario es muy importante. Mediante el monitoreo en línea de la velocidad, se puede fortalecer el concepto de nivel de servicio, lo que indirectamente tiene unas vastas implicaciones en inversiones y gradualidad de las obras, porque para ofrecer un nivel de servicio operacional a los usuarios, la operación de las carreteras no debe ser superior al nivel de servicio "D" por más de 50 horas al año, información que perfectamente se puede capturar mediante dispositivos como los utilizados en la prueba piloto. También se podrían tener aplicaciones relacionadas con señalización dinámica, información a los usuarios, atención a imprevistos en la vía, operación en condiciones especiales y condiciones críticas de tráfico, elementos que con algunas rutinas en función de la velocidad se podrían reportar.

Por último, información como la recopilada en esta prueba piloto tiene el potencial de servir como ayuda en temas de regulación sobre el transporte de carga en las carreteras colombianas; además de las variables explicadas, como el peso, el volumen de tránsito y la velocidad, se podría recopilar información de suma utilidad en el establecimiento de la estructura tarifaria del transporte de carga, tema que tiene bastantes discrepancias en nuestro país entre los transportadores y el regulador, justamente por la asimetría de la información existente. La tendencia mundial es la desregulación, obligando a concentrar el papel del Estado en aspectos de calidad del servicio. Por ejemplo, para la estructuración de la canasta de costos del transporte de carga, es usual que los transportadores planteen argumentos como que muchas veces se ven obligados a realizar viajes en vacío, lo que disminuye la rentabilidad de su negocio. Si los medidores utilizados se complementan con dispositivos de captura de placas mediante video, se podría tener información de peso asociado a placas, y conocer con mayor exactitud, si en algunos orígenes-destinos existe compensación de las cargas o no; esta información sería de gran utilidad para el regulador, en cuanto a el establecimiento de fletes, entre otros temas, coadyuvando a mejorar la eficiencia del modo, entendiendo que los costos de transporte son una parte significativa de los costos logísticos de los productos.

7.6 Conclusiones

- La metodología basada en algoritmos genéticos apoyados en líneas de influencia, desarrollada en la presente investigación, permite encontrar, con gran confiabilidad, las cargas dinámicas producidas por los camiones pesados que circulan por un puente instrumentado, así como, las cantidades de tránsito vehicular discriminados por tipo de vehículo, con gran eficiencia frente a procesos tradicionales de medición estática.

- El error de calibración promedio de 4,6%, encontrado en el modelo analítico computacional de la superestructura del puente, partiendo de una prueba estática y las técnicas numéricas de optimización sobre el comportamiento son aceptables, considerando la complejidad de las acciones y efectos en este tipo de estructuras.
- Un aporte cualitativo y cuantitativo importante de esta investigación, es la determinación de una matriz de rigidez de la superestructura del puente, que se apoya en el modelo analítico computacional calibrado y que es el fundamento del algoritmo genético.
- El proceso de calibración y validación del algoritmo genético partiendo del paso de diferentes camiones de peso y geometría conocida, empleados en la investigación, encontró que es más preciso cuando determina cargas de mayor magnitud por eje, específicamente para camiones C3-S3 o C3-S2.
- El sistema desarrollado tiene la capacidad de determinar, con una precisión satisfactoria, el peso total en movimiento –de cualquier tipo de camión– durante el día y la noche, por cada carril en función del desplazamiento promedio de las cuatro vigas.
- El sistema empleado puede ser implementado de manera primaria en los puentes simplemente apoyados de una sola luz en el país para ser complementario a los sistemas tradicionales de pesaje estático, permitiendo, de esa manera, la optimización de las labores de control de peso.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al permiso y apoyo logístico de la concesión Co-viandes.

Referencias Bibliográficas

- [1] Muñoz, E. E., Gómez, S., Núñez, F., y Flórez, C. (2011). "Determinación de cargas dinámicas de camiones pesados que transitan en un puente basado en algoritmos genéticos e instrumentación". Santiago de Chile, Chile: *Revista Ingeniería de Construcción*, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [2] Muñoz, E. E. (2001). "Estudio de las causas del colapso de algunos puentes de Colombia". Bogotá, Colombia: *Revista Ingeniería y Universidad*, Pontificia Universidad Javeriana.
- [3] Muñoz, E. E., Núñez, F. F., y Jamshid, M. (2009). "An investigation of common causes of bridges collapse in Colombia". EE. UU.: ASCE – *Practice Periodical on Structural Design and Construction*.
- [4] Moses, F. (1979). "Weigh-in motion system using instrumented bridges". *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 105, TE3, 233-249.
- [5] Quilligan, M. (2003). *Bridge weight-in-motion. development of a 2-d multi-vehicle algorithm*. Stockholm, Sweden: Department of Civil and Architectural Engineering. Royal Institute of Technology.

- [6] Znidaric, J., y Moses, F. (1994). *Evaluation of the carrying capacity of existing bridges. Final report*. Ljubljana, Slovenia: Institute for Testing and research in materials and structures.
- [7] Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison Wesley.
- [8] Chan, T. H. T., y Ashebo, D. B. (2006). "Moving axle load from multi-span continuous bridge: laboratory study". *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 128, 4, 521-526.
- [9] Law, S. S., Chan, T. H. T., y Zeng, Q. H. (1997). "Moving force identification: a time domain method". *Journal of Sound and Vibration*, 201, 1, 1-22.
- [10] Law, S. S., Chan, T. H. T., y Zeng, Q. H. (1999). "Moving force identification a frequency and time domains analysis". *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, 121, 3, 394-401.
- [11] Zhu, X. Q., y Law, S. S. (2000). "Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic responses". *Journal of Sound and Vibration*, 236, 4, 705-724.
- [12] European Commission 4th Framework Programme Transport (2001). *Weighing-in-motion of axles and vehicles for Europe (WAVE)*. Dublin, Ireland: Report of work package, bridge WIM systems (B-WIM), University College Dublin.
- [13] Gagarine, N. (1991). *Advances in weigh-in-motion with pattern recognition and prediction of fatigue life of highway bridges*. University of Maryland, College Park, Md, USA: Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering.
- [14] Rowley, C., González, A., Obrien, E., y Znidaric, A. (2008). Comparison of conventional and regularized bridge weigh-in-motion algorithms. In *Proceedings of the 5th International Conference on Heavy Vehicles (ICWIM '08)*, Paris, France.
- [15] Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and model parameter estimation*. New Jersey, USA: SIAM.
- [16] Chan, T. H. T., y Ashebo, D. B. (2006). "Theoretical study of moving force identification on continuous bridges". *Journal of Sound and Vibration*, 295, 3-5, 870-883.
- [17] Acevedo, A. M., y Martínez, L. A. (2006). *Diseño de algoritmos para la determinación indirecta de las cargas dinámicas de los carros que actúan sobre un prototipo instrumentado del puente Puerto Salgar*. Trabajo de grado, director: Édgar Muñoz, Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil.