



Informe 01

CONFIDENCIAL

Proyecto: **eBridge 3.0: Sistema para el monitoreo de puentes**

Fecha de inicio: 01/01/2016 Fecha finalización: 31/12/2017

Documento 1 – Informe técnico de los resultados del proyecto

Fecha del informe: 01/02/2018

Preparado por: Grupo de investigación de eBridge

Autores:

Garita Rodríguez, César

Ortiz Quesada, Giannina



Coordinador: Giannina Ortiz Quesada
Institución: Tecnológico de Costa Rica
e-mail: gortiz@tec.ac.cr
Tel.: (506) 2550-2309
Página web: www.tec.ac.cr

*El presente es el informe final del proyecto de investigación denominado **eBridge 3.0: Sistema para el monitoreo de puentes**, se compone de dos documentos, el informe técnico de resultados y el informe administrativo y de productos.*

***eBridge** es un proyecto multidisciplinario coordinado por el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción de la Escuela de Ingeniería en Construcción y en el que participaron las escuelas de Ingeniería en Electrónica, Computación, Forestal y Producción Industrial; además se contó con participación en algunas tareas de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Además de estudiantes de otras carreras como Ingeniería en Diseño Industrial, Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Ingeniería en Computadores e Ingeniería en Mecatrónica. Dicho proyecto se encuentra dentro programa de investigación eScience.*

Otro elemento fundamental para el desarrollo del proyecto fue la participación del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) y el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).

Este proyecto es la tercera etapa de un proyecto a largo plazo que pretende generar herramientas para la predicción de fallas en puentes.

FIRMAS

<hr/> Ing. Gustavo Rojas Moya, MSc. Director Escuela de Ingeniería en Construcción	<hr/> Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc. Coordinadora Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO)	<hr/> Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc. Coordinadora Proyecto eBridge 3.0: Sistema para el monitoreo de puentes
--	--	--

Contenido

1.	Resumen Ejecutivo	7
1.1.	Código y Título del proyecto	8
1.2.	Autores y direcciones	8
1.3.	Resumen	8
1.4.	Palabras clave	9
2.	Introducción.....	9
3.	Objetivo 1. Analizar los requerimientos para el establecimiento de un sistema de monitoreo de puentes10	
3.1.	Introducción.....	10
3.2.	Marco teórico.....	10
3.3.	Metodología.....	11
3.4.	Resultados	12
3.5.	Discusión y conclusiones	12
3.6.	Recomendaciones.....	13
4.	Objetivo 2. Diseñar los protocolos de instrumentación para el monitoreo remoto de puentes	14
4.1.	Introducción.....	14
4.2.	Marco teórico.....	14
4.3.	Metodología.....	18
4.4.	Resultados	19
4.5.	Discusión y conclusiones	44
4.6.	Recomendaciones.....	45
5.	Objetivo 3. Desarrollar metodologías para el diagnóstico de la condición estructural de puentes	46
5.1.	Introducción.....	46
5.2.	Marco teórico.....	46
5.3.	Metodología.....	47
5.4.	Resultados	48
5.5.	Discusión y conclusiones	49
5.6.	Recomendaciones.....	49
6.	Objetivo 4. Desarrollar metodologías para evaluar la vulnerabilidad ambiental de los puentes	49
6.1.	Marco teórico.....	50
6.2.	Metodología.....	57
6.3.	Resultados	57
6.4.	Discusión y conclusiones	58
6.5.	Recomendaciones.....	58
7.	Objetivo 5. Diseñar un prototipo de sistema de inteligencia de negocios para la toma de decisiones	58
7.1.	Introducción.....	58
7.2.	Marco Teórico	59
7.3.	Metodología.....	59
7.4.	Resultados	60
7.5.	Discusión y conclusiones	60

7.6.	Recomendaciones.....	61
8.	Resumen de principales resultados	62
9.	Resumen de principales conclusiones	63
10.	Resumen de discusiones y recomendaciones	65
11.	Referencias.....	66
12.	Apéndices	67

Indice de Figuras

FIGURA 1. ESQUEMA DE INTEGRACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL DE MONITOREO.....	9
FIGURA 2. NIVELES DE RIESGO SEGÚN LA INTENSIDAD DE VIBRACIÓN. (WENZEL, 2009).....	16
FIGURA 3. VISTA AÉREA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	19
FIGURA 4. CORTE TRANSVERSAL DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	22
FIGURA 5. FOTOGRAFÍA DE SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	22
FIGURA 6. VISTA LATERAL DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	23
FIGURA 7. FOTOGRAFÍA LATERAL DEL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	23
FIGURA 8. CONFIGURACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN EN EL PUENTE SOBRE EL RÍO PEJE.....	24
FIGURA 9. CASO DE CARGA I-E.....	25
FIGURA 10. UBICACIÓN DE CARGAS CASO I-E.....	26
FIGURA 11. CASO DE CARGA II-E.....	26
FIGURA 12. UBICACIÓN DE CARGAS CASO II-E.....	27
FIGURA 13. EJEMPLO CASO DE CARGA DINÁMICA, CASO DE CARGA IV.....	28
FIGURA 14. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS PARA EL CASO DE CARGA I-E.....	29
FIGURA 15. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS PARA EL CASO DE CARGA II-E.....	30
FIGURA 16. ACELERACION (G) "IN SITU" PARA EL EJE Z.....	31
FIGURA 17. FRECUENCIAS "IN SITU" Y DEL MODELO ESTRUCTURAL EN LA DIRECCIÓN Z.....	32
FIGURA 18. COMPARACIÓN DE LA ENVOLVENTE DE LAS FRECUENCIAS "IN SITU" Y DEL MODELO ESTRUCTURAL.....	33
FIGURA 19. COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS IDENTIFICADAS.....	34
FIGURA 20. VISTA AÉREA DEL PUENTE SOBRE TOMA DE AGUAS, PH REVENTAZÓN.....	35
FIGURA 21. FOTOGRAFÍA EN LÍNEA DE CENTRO DE LA ESTRUCTURA.....	37
FIGURA 22. FOTOGRAFÍA DE LA SUPERESTRUCTURA.....	37
FIGURA 23. FOTOGRAFÍA LATERAL DE LA ESTRUCTURA.....	38
FIGURA 24. CONFIGURACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA EN EL PUENTE.....	39
FIGURA 25. COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CASO IV-E.....	42
FIGURA 26. ACELERACIONES (G) "IN SITU" VS TIEMPO (S) EN LA DIRECCIÓN Z - CASO I-D.....	42
FIGURA 27. CONTENIDO FRECUENCIAL OBTENIDO DE DATOS IN SITU PARA EL CASO I-D.....	43
FIGURA 28. CONTENIDO FRECUENCIAL OBTENIDO DE DATOS IN SITU VERSUS MODELO ESTRUCTURAL.....	43
FIGURA 29. COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS ENCONTRADAS.....	44
FIGURA 30. METODOLOGÍA PARA OBTENER OBJETIVO 3 (ESQUEMA).....	48
FIGURA 31. VULNERABILIDADES EN INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE. (HUSDAL, 2005).....	50
FIGURA 32. ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA (CFIA, 2013).....	52
FIGURA 33. CLASIFICACIÓN DEL SITIO DE CIMENTACIÓN (CFIA, 2013).....	53
FIGURA 34. CLASIFICACIÓN DEL SITIO DE CIMENTACIÓN (CFIA, 2013).....	53
FIGURA 35. FALLAS ACTIVAS QUE TIENEN UN POTENCIAL DE GENERAR UN SISMO DE MAGNITUD MW = 6.5 O MAYOR (CFIA, 2013).....	54

Indice de cuadros

Cuadro 1. Autores y direcciones	8
Cuadro 2. Resumen de objetivo, entregables y actividades.....	10
Cuadro 3. Resumen de objetivo, entregables y actividades.....	14
Cuadro 4. Equipos utilizados en la instrumentación del puente sobre el río Peje.....	24
Cuadro 5. Determinación de esfuerzos en las vigas para el caso I-E.....	29
Cuadro 6. Determinación de esfuerzos en las vigas para el caso II-E.....	30
Cuadro 7. Frecuencias fundamentales identificadas.....	34
Cuadro 8. Casos de carga estática utilizados.....	40
Cuadro 9. Casos de carga dinámica utilizados.....	40
Cuadro 10. Determinación de esfuerzos para el caso IV-E.....	41
Cuadro 11. Frecuencias fundamentales identificadas.....	44
Cuadro 11. Resumen de objetivo, entregables y actividades.....	46
Cuadro 12. Resumen de objetivo, entregables y actividades.....	50
Cuadro 13. Resumen de objetivo, entregables y actividades.....	59

1. Resumen Ejecutivo

El presente documento contiene el informe final del proyecto de investigación **eBridge 3.0: Sistema para el monitoreo de puentes**. eBridge es un proyecto multidisciplinario coordinado por el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción de la Escuela de Ingeniería en Construcción y en el que participaron las escuelas de Ingeniería en Electrónica, Computación, Forestal y Producción Industrial; además se contó con participación en algunas tareas de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Además de estudiantes de otras carreras como Ingeniería en Diseño Industrial, Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Ingeniería en Computadores e Ingeniería en Mecatrónica. Dicho proyecto se encuentra dentro programa de investigación eScience.

El informe presenta los resultados técnicos principales, agrupados por cada uno de los objetivos específicos planteados al inicio del proyecto, siendo el objetivo general el desarrollar un prototipo de sistema integrado de información para consultas estratégicas sobre el desempeño de los puentes, basado en datos obtenidos por medio de sistemas de información geográfica, medición cuantitativa del desempeño, modelos de confiabilidad estructural e información técnica de la estructura.

Dado que este es un proyecto multidisciplinario, para su ejecución se definió 5 objetivos específicos por área de conocimiento, cada uno de los cuales estuvo a cargo de un investigador, sin embargo, es importante mencionar que cada uno de ellos se encuentra ligado uno con otro y el desarrollo fue conjunto. Los objetivos específicos planteados fueron:

- Analizar los requerimientos para el establecimiento de un sistema de monitoreo de puentes.
- Diseñar los protocolos de instrumentación para el monitoreo remoto de puentes.
- Desarrollar metodologías para el diagnóstico de la condición estructural de puentes.
- Desarrollar metodologías para evaluar la vulnerabilidad ambiental de los puentes.
- Diseñar un prototipo de sistema de inteligencia de negocios para la toma de decisiones.

En la primera etapa del proyecto eBridge (eBridge 1.0: Predicción remota de fallas en puentes) se identificaron metodologías y herramientas para la determinación de las variables que más influyen en el desempeño estructural de una estructura de puente.

En la segunda etapa eBridge 2.0: Sistema integrado para el desempeño de puentes, se trabajaron herramientas para la integración de la información que sea la base de un sistema nacional de monitoreo de estructuras de puentes, con un fuerte apoyo tecnológico y motivando cada vez más el uso de tecnología. Se trabajó en varias áreas la integración de sistemas, instrumentación, evaluación de estructuras y modelo de confiabilidad y sistemas de información geográfica.

En esta tercera etapa se trabajó en el diseño de un prototipo de un sistema de monitoreo de salud estructural de puentes, que incluya metodologías de evaluación principalmente no destructivas, análisis de riesgos ambientales, diagnóstico e inteligencia de negocios para estudios de confiabilidad en puentes.

1.1. Código y Título del proyecto

eBridge 3.0: “Sistema para el monitoreo de puentes”

1.2. Autores y direcciones

Cuadro 1. Autores y direcciones

Investigador	Escuela/Centro	email	Google Scholar
Giannina Ortiz Quesada. Coordinadora	Ingeniería en Construcción / Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción	gortiz@tec.ac.cr	GianninaOrtiz
César Garita Rodríguez	Ingeniería en Computación / Centro de Investigaciones en Computación	cesar@tec.ac.cr	CesarGarita

1.3. Resumen

El objetivo general de eBridge 3.0 es diseñar un prototipo de un sistema de monitoreo de salud estructural de puentes, que incluya metodologías de evaluación principalmente no destructivas, análisis de riesgos ambientales, diagnóstico e inteligencia de negocios para estudios de confiabilidad en puentes.

Además se plantearon objetivos específicos claros, mediante los cuales se alcanzó el objetivo general propuesto. Estos objetivos son:

1. Analizar los requerimientos para el establecimiento de un sistema de monitoreo de puentes.
2. Diseñar los protocolos de instrumentación para el monitoreo remoto de puentes.
3. Desarrollar metodologías para el diagnóstico de la condición estructural de puentes.
4. Desarrollar metodologías para evaluar la vulnerabilidad ambiental de los puentes.
5. Diseñar un prototipo de sistema de inteligencia de negocios para la toma de decisiones

Para alcanzar estos objetivos se establecieron 3 áreas de trabajo: sistemas de información, metodologías de evaluación estructural e instrumentación. En cada una de estas áreas de trabajo se contó con la participación de los diferentes investigadores y de estudiantes.

El informe que se presenta a continuación, se estructura por objetivos específicos y el desarrollo de cada uno contempla una introducción al tema, el marco teórico, la metodología, los resultados principales, las conclusiones y recomendaciones.

1.4. Palabras clave

Puentes, evaluación de puentes, Structural Health Monitoring, indicadores, sistemas de inteligencia de negocios, eBridge.

2. Introducción

En esta tercera etapa, el proyecto eBridge 3.0, propone el diseño un prototipo de un sistema de monitoreo de estructuras de puentes, el cual permita integrar la información de las estructuras existentes, su caracterización, sus posibles riesgos y el seguimiento, para una mejor toma de decisiones. Con la información generada por este sistema de monitoreo se podrá tener la información necesaria para la generación de planes de mantenimiento e intervención de la infraestructura de puentes y de esta manera optimizar los recursos disponibles para tal fin a nivel nacional y de esta manera incidir positivamente en la competitividad del país al colaborar directamente en un área crítica.

Este sistema de monitoreo se alimentará de los datos generados en las fases anteriores y los datos que se generen a través del convenio con el CONAVI, pero también podrá alimentarse de datos provenientes de las municipalidades que se interesen en integrarse al proyecto.

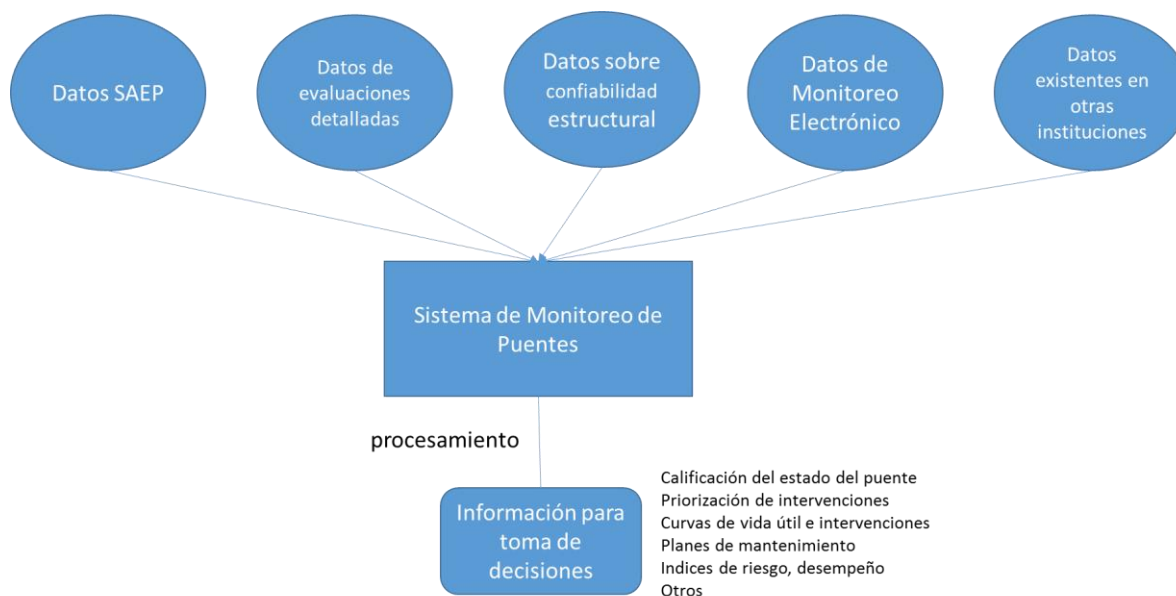


Figura 1. Esquema de integración del sistema nacional de monitoreo

En la figura 1 se muestra la propuesta inicial del sistema de monitoreo de puentes, este tomará la información existente en la base de datos del sistema de administración de

estructuras de puentes, los datos de los puentes instrumentados con sensores y datos de otras fuentes tales como el atlas digital de Costa Rica, inventarios existentes en municipalidades, inspecciones detalladas y otras con el fin de procesar los datos y generar información para la toma de decisiones, la información generada por el sistema podría ser la lista de priorización para intervenciones, generación de curvas de vida útil e intervenciones, planes de mantenimiento, índices o indicadores de riesgo, desempeño o deterioro, entre otros. El producto final será un prototipo funcional de un sistema que permitirá analizar la información disponible a la fecha.

La información generada será de gran utilidad para el CONAVI, el MOPT y Municipalidades, ya que colabora con el mayor problema que presenta el desarrollo de puentes y es su gestión y administración.

3. Objetivo 1. Analizar los requerimientos para el establecimiento de un sistema de monitoreo de puentes

Responsable: Ing. César Garita Rodríguez, PhD.

3.1. Introducción

Las actividades y productos asociados al Objetivo 1 se describen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Resumen de objetivo, entregables y actividades.

Objetivo específico	Actividades	Productos
1. Analizar los requerimientos para el establecimiento de un sistema de monitoreo de puentes.	1. Definir los procesos, información y actores necesarios para el sistema de monitoreo.	Documento con el análisis de requerimientos.
	2. Realizar actividades de consulta y sensibilización en el tema con actores nacionales e internacionales.	
	3. Realizar la propuesta de la estructura del sistema de monitoreo y sus requerimientos.	

3.2. Marco teórico

En el documento entregable incluido en **Apéndice 12-1: Documento de análisis de requerimientos para el establecimiento de un sistema de monitoreo de puentes**, se provee una revisión bibliográfica detallada del estado del arte de sistemas de monitoreo de puentes en áreas relacionadas al proyecto, que constituye el marco teórico de este objetivo.

La revisión bibliográfica realizada se dividió en dos partes, es decir; primero se investigó sobre herramientas de comparación de estos sistemas, posteriormente a raíz de esta

investigación se indagó más profundamente sobre diferentes sistemas de monitoreo de puentes. Además, se investigó sobre otros que no se mencionaban en las herramientas de comparación.

Como resultado del marco teórico se desarrolló un resumen sobre la metodología de revisión o comparación, así como un resumen de la sobre los sistemas de monitoreo de puentes.

Las principales áreas de comparación identificadas fueron:

- Modelo estructural.
- Gestión de información.
- Información geográfica.
- Administración de mantenimiento.
- Monitoreo.

Los principales sistemas identificados en esta revisión bibliográfica fueron los siguientes:

- SIPUMEX
- LTBP: Long-Term Bridge Performance Program
- BRIMOS
- SMH Live
- Pontis
- SAEP
- E-Bridge 2.0
- Prototipo Chile (Sergio Andrés Valenzuela Díaz)
- Prototipo Chile (Nicolás Felipe Molina Schulz)

También se logró escribir un artículo sobre el análisis de requerimientos relacionado con el objetivo 1, este se adjunta en el Documento 02 de este informe.

3.3. Metodología

Esta sección explica el proceso que se llevó a cabo para identificar los procesos, información y actores necesarios para el sistema de monitoreo. En particular, las principales actividades realizadas para este proceso de selección incluyeron las siguientes:

1. Revisión bibliográfica sobre sistemas de monitoreo de puentes.
2. Definición de criterios de evaluación de sistemas.
3. Selección de sistemas a evaluar.
4. Comparación de sistemas de monitoreo de puente.
5. Identificación de actores, información y procesos principales.
6. Casos de Usos usando UML.
7. Consulta y validación.

Estas actividades se describen en detalle en el entregable correspondiente.

3.4. Resultados

Los principales resultados técnicos obtenidos asociados al Objetivo 1 son los siguientes:

- Análisis de herramientas y sistemas de monitoreo de estructuras de puentes. Esta tarea produjo tablas resumen de este análisis, listado de criterios de evaluación de sistemas, listado de sistemas seleccionados por evaluar, y una tabla comparativa detallada de criterios vs. Sistemas.
- Especificación de casos de uso como requerimientos principales para un futuro sistema de monitoreo de puentes, incluyendo identificación de actores, información y procesos principales. Se especificaron los siguientes casos generales:
 - Administración de Información Técnica
 - Modelo de Fiabilidad
 - Inspección
 - Inteligencia de Negocios
 - Red de Comunicación de Datos
 - Integración de Información
 - Sistema de Información Geográfica
 - Priorización
 - Gestión de Costos
 - Monitoreo de Estructuras
- Resultados de consulta y validación de requerimientos y de diseño de prototipo. Se organizó un taller de consulta y validación de estos aspectos. Los productos principales fueron un resumen de las respuestas obtenidas con respecto a la valoración de la importancia de diferentes requerimientos y características de diseño del prototipo desarrollado. Esto permitió obtener información valiosa como retroalimentación a las tareas realizadas.
- Artículo sobre análisis de requerimientos.
- Documento con informe detallado sobre objetivo de análisis de requerimiento.

Estos resultados se encuentran desglosados en detalle en los apéndices que incluyen los documentos respectivos a cada tarea de este objetivo.

Las acciones de difusión y participación estudiantil se adjuntan en el documento 02.

3.5. Discusión y conclusiones

A continuación, se resumen y discuten las principales conclusiones derivadas del análisis de requerimientos:

- Existen a nivel mundial sistemas de monitoreo de puentes que tienen algunas funcionalidades en común, sin embargo, la mayor parte de los sistemas investigados no poseen funcionalidades importantes como lo es la inteligencia de negocios o integración de información mediante flujos de trabajo científico, las cuales permiten realizar consultas básicas y estratégicas sobre desempeño o información de

puentes. Estas funcionalidades son propias del proyecto de e-Bridge y proporcionan un valor agregado en comparación a otros sistemas de monitoreo de puentes.

- El método de taller guiado por cuestionarios con preguntas abiertas y cerradas permitió obtener información valiosa y realista con respecto a las verdaderas expectativas o requerimientos de usuarios potenciales de e-Bridge 3.0.
- En cuanto a la evaluación de la importancia de los procesos y funciones identificados obtenida por medio del taller de consulta, se puede decir que en general la calificación obtenida para todos los procesos es alta. Particularmente se puede destacar la importancia atribuida a los procesos de: modelo de fiabilidad, priorización, inteligencia de negocios y administración de información técnica.
- En el caso de los indicadores estratégicos, los mejor evaluados en cada categoría fueron:
 - Condición estructural: viga principal, pilas y bastiones.
 - Inventario: tipo de ruta, tipo de estructura, tipo de material y zona administrativa.
 - Ambientales: vulnerabilidad sísmica.
 - Comportamiento: deformación.
- En cuanto a la evaluación del prototipo desarrollado, destacan importancia e impacto como los factores más altos. El más bajo, aunque arriba de 4 en la escala 1-5 corresponde a claridad.
- El desarrollo de un sistema de monitoreo de puentes con todos los procesos identificados es una tarea inmensa y que posiblemente sobrepasa el alcance de un proyecto de investigación universitario. Es necesario enfocarse en funcionalidades específicas, diferenciadas y factibles que permitan de alguna forma “mercadear” la idea con una proposición de valor clara para el gobierno o empresas contratistas que podrían convertirse en eventuales socios de desarrollo.
- A través del taller, se identificaron ciertas funciones o indicadores interesantes algunos de los cuales que pueden incorporarse en un futuro cercano tales como tráfico promedio diario.

Finalmente, se concluye que se cumplieron satisfactoriamente todas las tareas y entregables asociados al Objetivo 1 del plan de acción del proyecto.

3.6. Recomendaciones

Las recomendaciones principales relacionadas con el objetivo 1 se incluyen en los siguientes puntos:

- Tomar en cuenta la evaluación obtenida de los indicadores y diseñar indicadores para perfiles de usuario más específicos tales como: tomador de decisiones (político), ingeniero, ciudadano en general.
- Enfocarse en desarrollos a corto y mediano plazo en aspectos de inteligencia de negocios, particularmente al manejo de indicadores estratégicos asociados al monitoreo de puentes.

- Continuar con el proceso de diseminación tanto mediante la realización de talleres o presentaciones con municipalidades o instituciones gubernamentales, como mediante las publicaciones científicas.
- Trabajar con alguna municipalidad cercana al TEC para seguir validando y aplicando el enfoque de inteligencia de negocios a la gestión de información de evaluación y monitoreo de puentes. Esto se hará mediante el proyecto de extensión aprobado por la VIE en colaboración con la Municipalidad del Guarco.

4. Objetivo 2. Diseñar los protocolos de instrumentación para el monitoreo remoto de puentes

Responsable: Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc.

4.1. Introducción

Las actividades y productos asociados al Objetivo 2 se describen en el cuadro 3.

Cuadro 3. Resumen de objetivo, entregables y actividades.

Objetivo específico	Actividades	Productos
1. Diseñar los protocolos de instrumentación para el monitoreo remoto de puentes.	1. Clasificar por tipo de evaluación y puente, la tecnología más apropiada para las diferentes mediciones.	Documento con los protocolos para la instrumentación de puentes, de acuerdo a la tecnología y tipo de puente.
	2. Especificar los protocolos de instrumentación para las tecnologías seleccionadas.	Informe sobre la instrumentación de al menos dos puentes.
	3. Aplicar los protocolos en dos puentes.	
	4. Identificar los indicadores requeridos para el sistema.	
	5. Generar los indicadores para el sistema de monitoreo.	

4.2. Marco teórico

En esta etapa se trabajó en desarrollar más herramientas para el análisis de vibraciones dentro de un sistemas de monitoreo en estructuras, para ello es importante el análisis de los siguientes conceptos.

Intensidad de vibración

Uno de los valores más importantes en la evaluación de las estructuras es la intensidad de vibración en sus diferentes modos. La clasificación de esa vibración se da en valores críticos o no críticos que pueden indicar si la estructura puede estar sujeta a sufrir un daño de manera local o global debido a la fatiga o a problemas relacionados con los materiales de la construcción.

En la realidad, la estructura con altas intensidades de vibración se debe a que tienen un historial de problemas locales con su construcción. Las juntas de expansión y los soportes están sujetos a intercambios más frecuentes que en condiciones normales.

El uso de equipos computacionales para determinar las intensidades de vibración permite evaluar el impacto de eventos simples en la estructura que pueden dar a restricciones o condiciones especiales de uso. (*Wenzel, 2009*)

Teoría de vibración basada en el monitoreo de la salud de la estructura

Cada estructura tiene un comportamiento dinámico típico propio. Los cambios en la estructura tales como todo tipo de daños que conducen a una disminución de la capacidad de carga, tienen efectos en la respuesta dinámica. Esto sugiere que la medición y el monitoreo de las características de respuesta dinámica se pueden usar para evaluar la integridad estructural.

Los diferentes tipos de pruebas de vibración en puentes que existen son: excitar el puente con un fuerte golpe o peso (vibración forzada) o por una excitación ambiental como el viento, el tránsito; siendo esto último una ventaja ya que no se utiliza un equipo tan costoso y no se necesita detener el flujo vehicular.

El sistema de identificación consiste en extraer las características dinámicas de los puentes y de otras obras estructurales a partir de los datos de vibración. Esas características sirven como insumo para la identificación de daños y la actualización de modelos. (*Wenzel, 2009*)

Frecuencias y formas de modos

Las frecuencias naturales de la estructura son únicamente dadas por los parámetros estructurales y se denominan las frecuencias propias. Estos parámetros estructurales son la geometría (dimensión, forma, momento de inercia entre otras), propiedades de los materiales (peso específico, coeficientes de amortiguamiento, entre otras) y condiciones de entorno (condiciones de los soportes, carga, entre otras). Sin embargo esa magnitud también depende de la forma en la estructura vibra, lo que se llama modo de vibración.

Las frecuencias naturales son usualmente evaluadas bajo los estándares de las condiciones de diseño, en cual la estructura es libre de cargas y de efectos de las temperaturas extremas. (*Wenzel, 2009*)

Amortiguamiento

El amortiguamiento es la capacidad de las estructuras de disipar la energía impartida por las fuerzas externas. La disipación de energía dinámica durante los resultados de las vibraciones provenientes de diferentes fuentes, tales como la elasticidad imperfecta, la fricción interna estructural de los materiales, la fricción de elementos estructurales en las juntas y los soportes mecánicos, amortiguamiento aerodinámico y hidrodinámico debido al entorno, las características estructurales no lineales, la energía de disipación a través de las cimentaciones y subestructuras, daños sufridos y así sucesivamente.

A pesar de que el mecanismo de amortiguamiento es bastante diverso, el efecto general sobre vibración es caracterizado usualmente considerando un amortiguamiento viscoso equivalente, cristalizado en un solo número de relación de amortiguación (ξ) como una fracción. Si el amortiguamiento general del sistema es 1% crítico, por ejemplo, la amplitud de vibración libre se reducirá a la mitad después de 11 ciclos, mientras el 10% de amortiguamiento reducirá la amplitud a la mitad de cada ciclo. (Wenzel, 2009)

Vibración

La vibración a la cual puede ser sometida una estructura se considera con respecto a su efecto sobre la misma estructura. Las consideraciones de los límites de vibración son cada vez más importantes para el mantenimiento de la integridad estructural. Es importante tener en cuenta que incluso cuando el nivel de vibración estructural es considerado intolerable por el usuario, el riesgo de daño de forma estructural por la vibración sostenida es por lo general muy pequeño. Los límites de vibración estructural por riesgos particulares de daños pueden ser clasificados de acuerdo con el nivel de la intensidad de vibración.

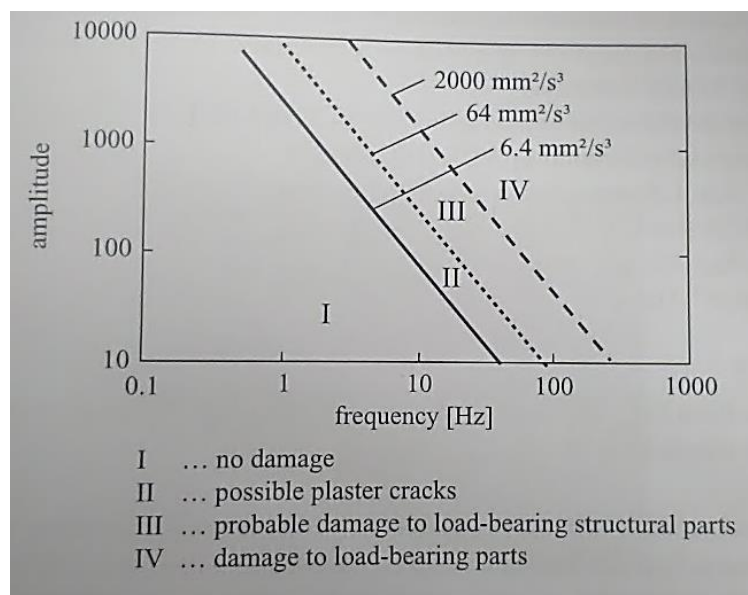


Figura 2. Niveles de riesgo según la intensidad de vibración. (Wenzel, 2009)

Sistemas de monitoreo en estructuras

Los sistemas de monitoreo que se utilizan para el análisis de las características constructivas de las estructuras, consisten en los siguientes componentes:

1. Transductores que convierte los cambios en la variable de campo de interés.
2. Actuadores que pueden ser utilizados para aplicar una entrada prescrita en el sistema
3. Convertidores A/D que transforman la señal analógica eléctrica a una señal digital que puede ser procesada posteriormente en algún hardware digital.
4. Acondicionamiento de señal.
5. Potencia.
6. Telemetría.
7. Procesamiento
8. Memoria y almacenamiento de datos.

Paradigmas de red de sensores

Se pueden señalar tres paradigmas de red de sensores que se utilizan para el monitoreo de la salud de las estructuras.

- **Cadenas de sensores conectados al hardware de procesamiento central**

La ventaja es que existen muchas opciones en el mercado y además es muy práctico ya que poseen una amplia variedad de transductores que pueden ser conectados al sistema., donde se pueden usar sensores pasivos o activos. Las mediciones que se realizan por diferentes canales son más fácilmente sincronizadas en el tiempo, ya que es sumamente importante cuando las características sensibles al daño se basan en información relativa entre sensores.

Una limitación importante es que estos sistemas normalmente necesitan alimentación de corriente alterna, y no en todo lugar está disponible. Otro problema es el tiempo de instalación que aumenta por el tipo de estructura, y los cables son difíciles de mantener debido a la degradación ambiental general y daños causados por agentes externos al sistema como roedores y vándalos. (*Farrar & Worden, 2013*)

- **Procesamiento descentralizado con conexión de salto**

Las integraciones de sistemas inalámbricos de comunicación han logrado eliminar los problemas de cableado de los sistemas tradicionales de monitoreo y bajado considerablemente los costos de mantenimiento.

Uno de los problemas es que entre las redes se produce una colisión de datos, que es cuando un dispositivo de la red recibe varias solicitudes simultáneas para almacenar o recuperar datos de otros dispositivos de la red. Cuando se incrementa el número de sensores, un nodo de sensor situado cerca de la estación base experimentará más transmisión de datos, lo que podría resultar en un atascamiento. La carga de trabajo de cada sensor no se puede distribuir uniformemente por lo que existen posibilidades de aumento de la colisión de los datos a razón que se aumenten las redes de sensores.

Otro problema es que el tiempo de sincronización de los sensores en diferentes nodos es más difícil en lugar de un sistema cableado. La descentralización de la red de detección inalámbrica varía escasamente en un despliegue del sistema de detección activa, porque los sensores activos pueden actuar tanto como actuadores como sensores, la sincronización de tiempo entre múltiples unidades sensores / actuadores es de nuevo una tarea difícil. El uso de múltiples canales en un nodo de sensor con un único convertidor A / D reducirá la velocidad de muestreo, lo que no proporciona una solución práctica ni equitativa para las técnicas de detección activa que normalmente interrogan intervalos de frecuencias más altas. (*Farrar & Worden, 2013*)

- **Proceso descentralizado con conexión híbrida**

La conexión híbrida de red combina las características deseables de los dos tipos de redes anteriores, como primera forma es conectado a una pieza de hardware basada en relés, que puede servir tanto de multiplexor como de enrutador de señal de propósito general. Este dispositivo gestionará la red de detección distribuida, controlará los modos de detección y accionamiento y multiplexará las señales medidas. En el siguiente nivel, las réplicas de este hardware están vinculadas a una estación descentralizada de control y procesamiento de datos. Esta estación de control está equipada con tarjetas de adquisición de datos, procesadores informáticos a bordo y telemetría inalámbrica, que es similar a la arquitectura de los actuales sensores inalámbricos descentralizados. Este dispositivo realizará los deberes de un control de hardware basado en relés, adquisición de datos, computación local y transmisión de los resultados calculados necesarios a la estación base central. En el nivel más alto, múltiples estaciones de procesamiento de datos son vinculados a una estación base central que entrega un informe de daños al usuario. (*Farrar & Worden, 2013*)

4.3. Metodología

La metodología utilizada para alcanzar este objetivo fue la siguiente:

- a. Identificación del tipo de monitoreo a aplicar
- b. Seleccionar las variables a medir
- c. Seleccionar el tipo de instrumentación a aplicar

- d. Identificar los elementos estructurales a analizar
- e. Definir el ensayo o experimento
- f. Aplicar el ensayo o experimento
- g. Analizar los resultados

El producto resultado de esta metodología es el protocolo para instrumentación de puentes, el cual se puede consultar en el **Apéndice 12-2: Protocolo para instrumentación de puentes**.

4.4. Resultados

Esta metodología se aplicó en tres puentes como parte de la prestación de servicios del CIVCO en el año 2017.

A continuación se presentan los principales resultados en dos de estos puentes.

4.4.1. Prueba de carga en Río Peje, Siquirres.

La instrumentación de este puente se realizó para aplicar una Prueba de Carga sobre el puente Río Peje en la Florida de Siquirres. Se instrumentó la estructura con strain gages, lvdts y acelerómetros con el fin de determinar su comportamiento ante condiciones de carga estáticas y dinámicas y comparar los resultados de la instrumentación con la respuesta esperada según un modelo estructural del puente. La estructura analizada se ubica sobre Río Peje en Siquirres y es un puente de 20m compuesto por 7 vigas de concreto postensado simplemente apoyadas. Este trabajo se realizó para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).



Figura 3. Vista aérea del puente sobre el Río Peje.

El objetivo de la prueba fue comparar el comportamiento estructural del puente sobre el Río Peje en la Florida de Siquirres, entre el modelo teórico y los resultados reales al aplicar carga, obtenidos utilizando instrumentación electrónica.

Los objetivos específicos fueron:

- Verificar el comportamiento de la estructura ante 2 configuraciones de carga estática
- Verificar el comportamiento de la estructura ante 2 configuraciones de carga dinámicas controladas, y 3 condiciones dinámicas adicionales con tránsito normal y/o especial ubicado en el sitio.
- Determinar la capacidad de carga de la estructura a partir de un modelo estructural.

Para la realización de la prueba de carga no se realizó una Inspección detallada de daños en la estructura debido a que el puente es una estructura nueva construida en el 2016.

La modelación de la estructura se realizó a partir de dimensiones y características definidas en planos y la información proporcionada en la memoria de cálculo, no se realizó un levantamiento dimensional de los elementos, ni ensayos en los materiales para determinar sus características.

El estudio se enfocó en la superestructura, dado que se verifica el comportamiento del puente ante carga viva. No se realizaron verificaciones en la subestructura ni en los apoyos. El estudio tampoco evalúa condiciones geotécnicas, hidrológicas ni de socavación.

Características de la estructura

La estructura analizada fue construida por el ICE en el año 2016, como uno de los accesos al Proyecto Hidroeléctrico Reventazón cercana al pueblo de la Florida de Siquirres en la provincia de Limón, las coordenadas son N 10°5'55" y W 83°34'40".

Cuadro 1. Características de la estructura

Generalidades	Año de diseño	2015
	Año de construcción	2016
	Especificación de diseño	Sin detalle
	Carga de diseño	Sin detalle
Características geométricas	Tipo estructura	Puente
	Longitud	20.50 m
	Ancho total	8.80 m
	Ancho de calzada	7.13 m
	Número de tramos	1
	Alineación en planta	recta
	Número de carriles	2
Características de la superestructura	Tipo de superestructura	Viga simple
	Número de superestructuras	1
	Tipo de losa	Losa de concreto
	Tipo de vigas	Vigas I de acero
	Número de vigas	7
Características de la subestructura	Número de subestructuras	2 bastiones
	Tipo de bastiones	Voladizo
	Tipo de apoyo en bastiones	Simple
	Tipo de fundaciones	Placa
Accesorios	Juntas	Selladas
	Barandas	Tipo flex-beam
	Otros	El puente cuenta con acera aguas abajo y no tiene superficie de rodamiento. Pasa cableado eléctrico sobre la estructura y hay una cercha cercana que soporta una tubería de agua.

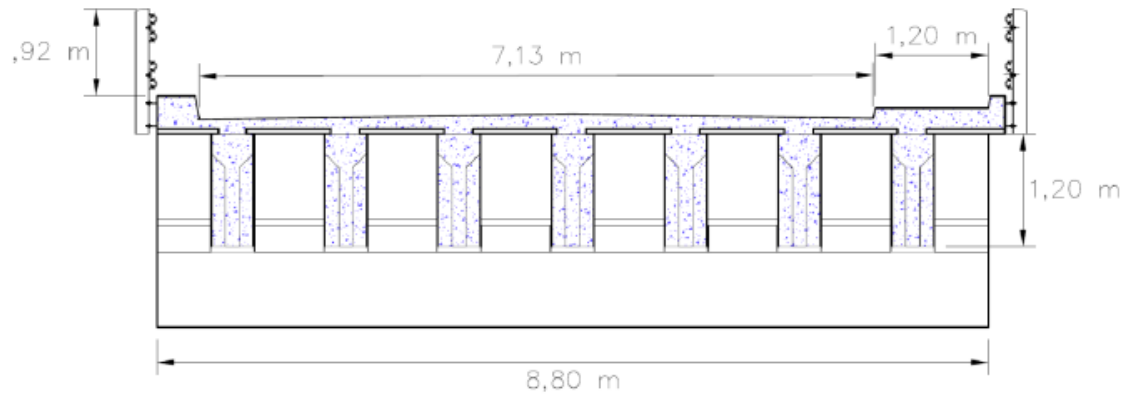


Figura 4. Corte transversal del puente sobre el Río Peje.



Figura 5. Fotografía de superestructura del puente sobre el Río Peje.

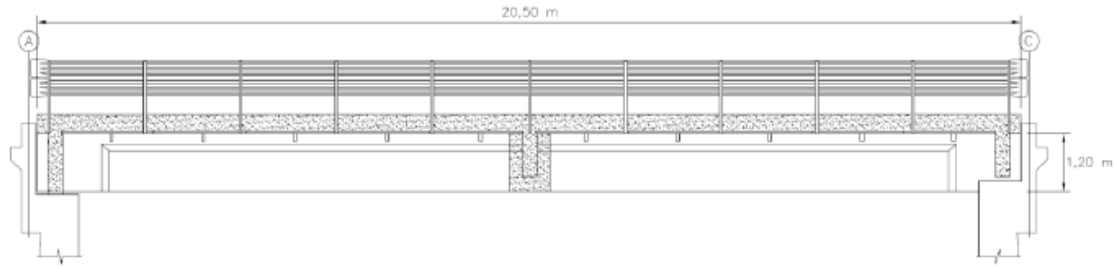


Figura 6. Vista lateral del puente sobre el Río Peje.



Figura 7. Fotografía lateral del puente sobre el Río Peje.

Aplicación de la metodología (actividades)

- Pre-inspección

Se verificaron las condiciones del sitio con el fin de determinar que equipos se requerían para el montaje de sensores en las vigas, y para determinar la posible ubicación de un espacio para observación y para localizar las vagonetas.

- Instrumentación

Los equipos utilizados se muestran el cuadro 4. Los equipos fueron previamente comprobados en laboratorio para determinar su buen funcionamiento y planificar el procedimiento de conexión de los sensores y de adquisición de datos.

Cuadro 4. Equipos utilizados en la instrumentación del puente sobre el río Peje.

Variable a medir	Sensor a utilizar	Otros
Deformación	Se utilizaron sensores eléctricos, de fibra óptica o cuerda vibrante, capaces de medir deformaciones en el rango de los microstrain. Se utilizarán los ST-350 de Bridge Diagnostic.	El equipo de adquisición de datos es el CR-3000 de CampbellScientific.
Desplazamiento	Se utilizaron transductores de desplazamiento conocidos como LVDT. Se utilizarán LVDT inalámbricos de Bridge Diagnostic.	El equipo de adquisición de datos es el STS de Bridge Diagnostic.
Aceleración	Se utilizaron acelerómetros de Bridge Diagnostic uno en cada dirección.	El equipo de adquisición de datos es el STS de Bridge Diagnostic.

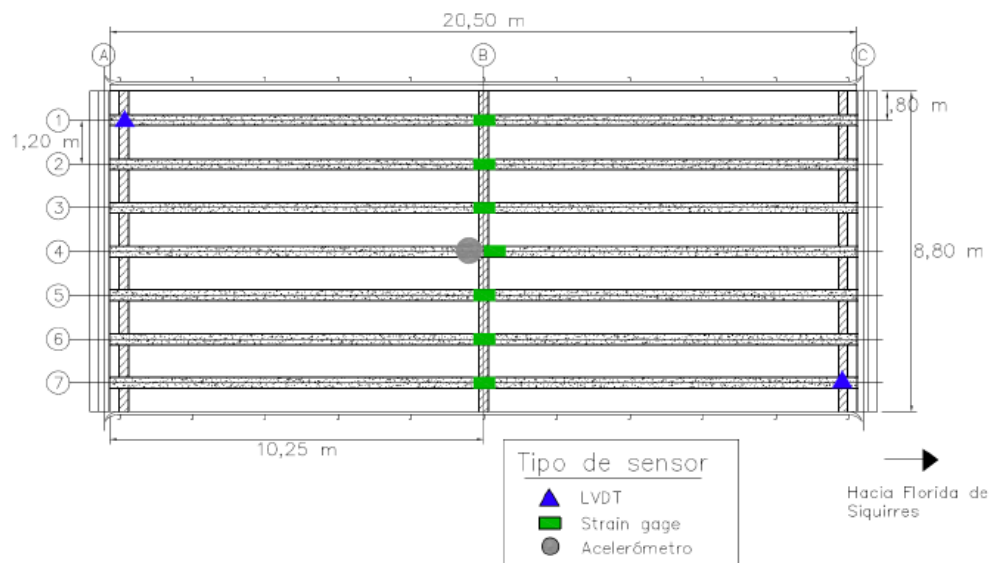


Figura 8. Configuración de la instrumentación en el puente sobre el Río Peje.

Pruebas estáticas aplicadas

En estas pruebas la carga permanece estática en algún punto determinado de la estructura durante un periodo de tiempo para revisar la respuesta de la estructura mediante la medición de deformaciones. En este caso la carga aplicada fueron 2 vagonetas cargadas con material con un peso promedio de 25 Ton cada una.

Se hizo una revisión rápida de deformaciones con un solo camión para verificar si las solicitaciones de carga no estaban afectando a la estructura más de lo esperado, ya que para la modelación se utilizó únicamente información de planos. Con esta información se identificaron 2 casos de carga.

Caso I-E

En este caso se colocaron dos vagonetas ubicadas en el centro del claro de manera que se alcancen esfuerzos de flexión significativos en las vigas instrumentadas, de acuerdo a lo mostrado en la figura 9. Para este caso se requirió un cierre temporal de la vía.

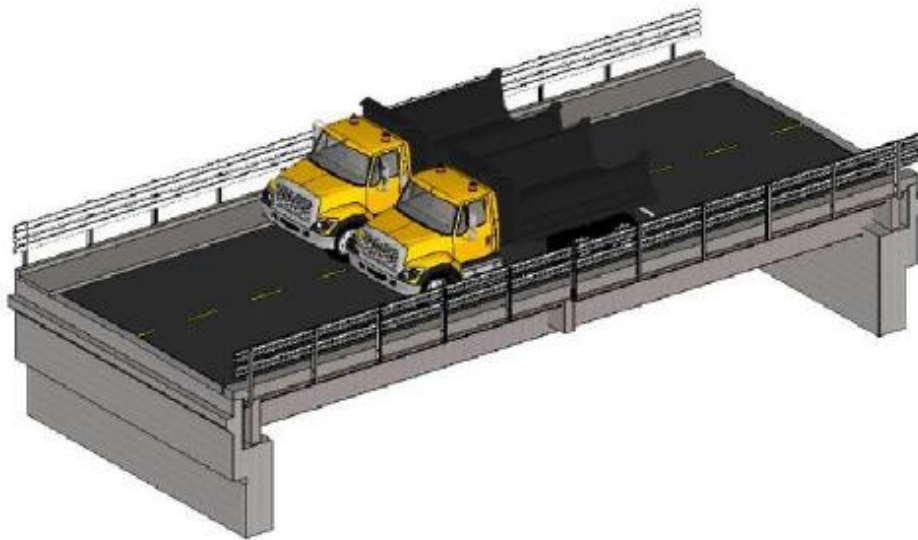


Figura 9. Caso de carga I-E.

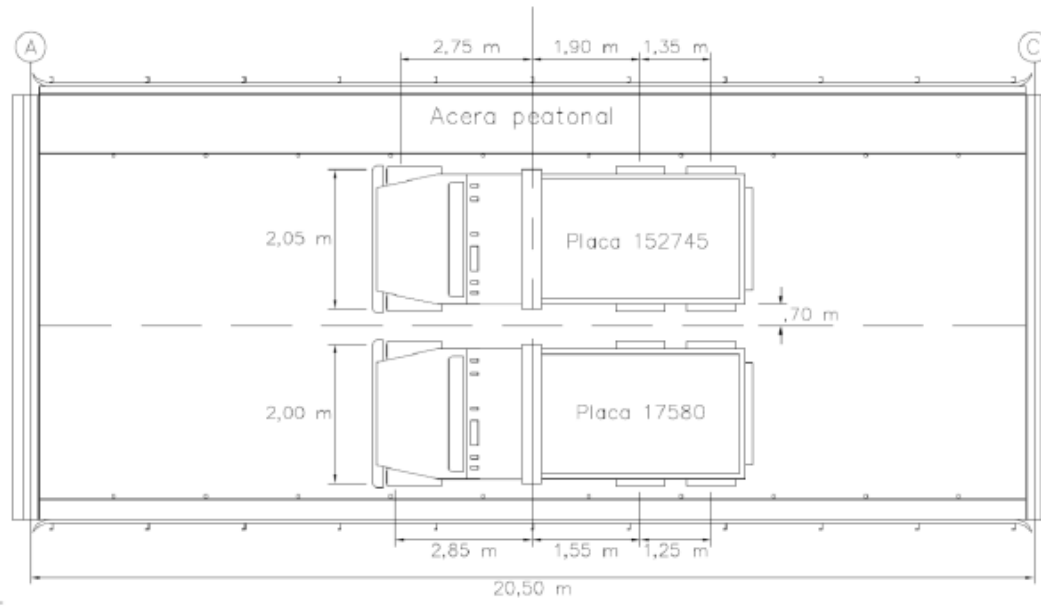


Figura 10. Ubicación de cargas caso I-E.

Caso II-E

En este caso se colocaron dos vagonetas en uno de los carriles del puente, de acuerdo a lo mostrado en la figura 10.

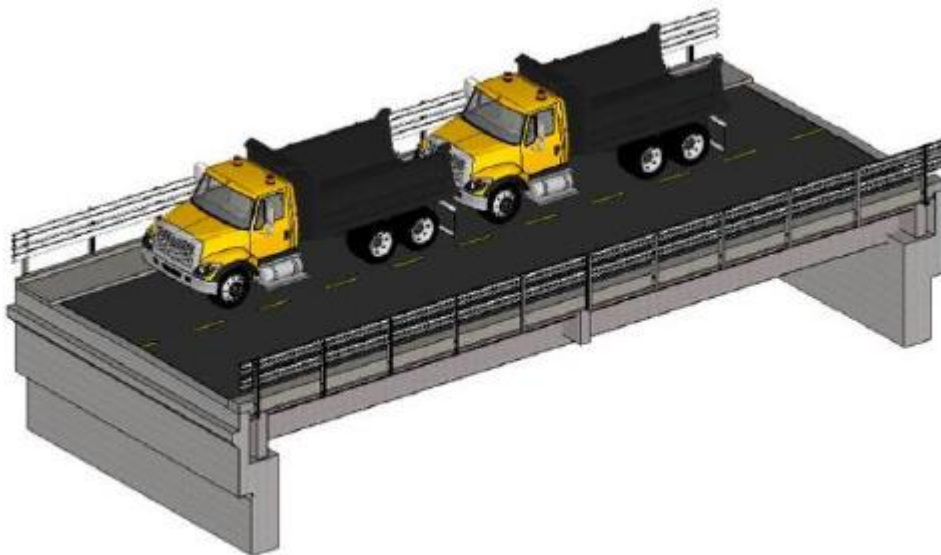


Figura 11. Caso de carga II-E.

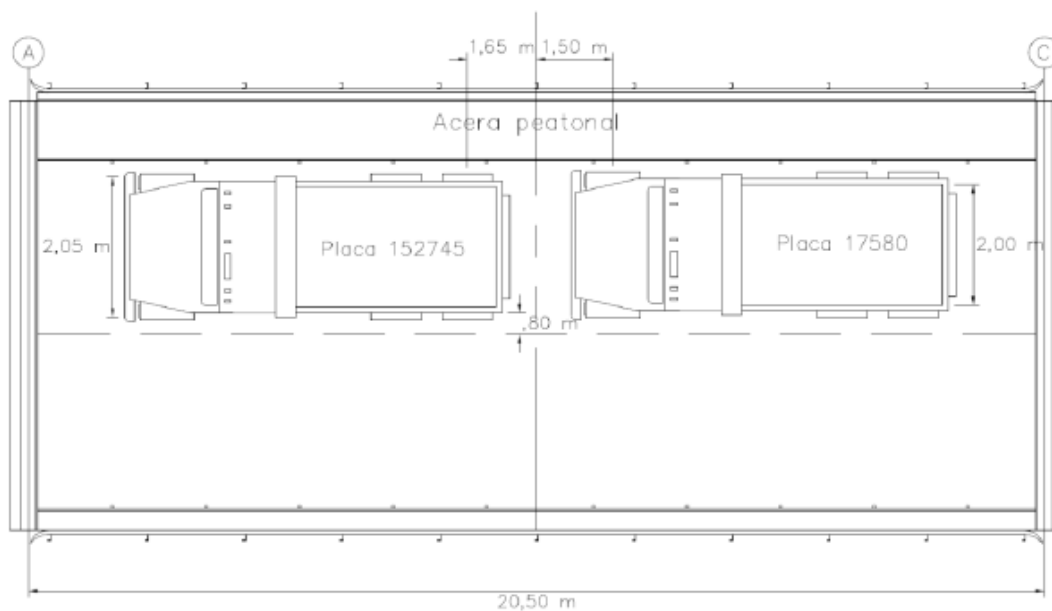


Figura 12. Ubicación de cargas caso II-E.

Pruebas dinámicas aplicadas

En estas pruebas las cargas se mueven a través del puente mientras se registra la aceleración generada en el punto central del puente. Se registra la respuesta desde poco antes del paso de las cargas hasta un intervalo después de que el vehículo salga del puente, con el objetivo de obtener las aceleraciones del puente vibrando sin el efecto de las masas de las cargas sobre éste.

En el sitio se aprovechó la presencia de tránsito normal sobre el puente para registrar el comportamiento de la estructura ante dichas condiciones. Los casos I, II y III corresponden a condiciones de sitio, mientras que los casos IV y V, corresponden a casos propuestos y debidamente caracterizados.

Para ambas pruebas se requirió cerrar el temporalmente la vía.

Caso I-D (TN)

Se registraron aceleraciones generadas por el tránsito normal, dentro de este caso se considera el efecto de algunos automóviles y motocicletas.

Caso II-D (TD)

Se registraron aceleraciones generadas por un tráiler de la empresa Dole que pasó por el lugar.

Caso III-D (P)

Se aprovechó el paso de algunos peatones para registrar las aceleraciones generadas por el paso de éstos.

Caso IV-D (2VC)

En este caso transitó una vagoneta en cada sentido de manera que ambos pasaron sobre la estructura en un mismo momento. Se tuvo dificultad en realizar este caso debido a que

uno de los camiones debía reducir su velocidad antes de ingresar a la estructura, ya que aunque el puente era recto, había una curva tanto vertical como horizontal en la carretera en uno de los accesos.

Caso V-D (2VS)

Se coordinó el paso de dos camiones simultáneamente y en el mismo sentido a través del puente.



Figura 13. Ejemplo caso de carga dinámica, caso de carga IV.

Modelo de análisis estructural

Para el análisis de los elementos del puente se realizaron: un modelo tridimensional y un análisis dinámico. Lo anterior con el fin de conocer las solicitaciones, las combinaciones analizadas y determinar la capacidad de carga del puente.

Las condiciones de deterioro como pandeo y cualquier otra condición existente que afecte la capacidad de los elementos y uniones se corregirán con los factores de condición (ϕ_c), de sistema (ϕ_s) y de resistencia (ϕ).

Para la elaboración del modelo se consideraran los elementos existentes según los planos y el levantamiento realizado y se toman con las dimensiones originales sin realizar ninguna disminución de espesores debido al deterioro del puente, que en términos generales es poco.

El análisis se realizó haciendo uso del software CSI Bridge 2015.

Resultados prueba de carga estática

Para ambos casos de carga, la distribución obtenida de los datos es una distribución normal. Para su determinación se realizó un test de verificación utilizando el programa Minitab.

Cuadro 5. Determinación de esfuerzos en las vigas para el caso I-E.

Viga	Deformación $\mu\epsilon$		Esfuerzo de campo (kg/cm ²)	Esfuerzo teórico (kg/cm ²)
	Promedio	Percentil 95		
Viga 1	-31,00834857	-30,6595	11,34	11,98
Viga 2	---	---	---	11,745
Viga 3	-19,79440587	-19,583395	7,24	11,06
Viga 4	-18,96022222	-18,622804	6,89	9,955
Viga 5	-24,04613508	-23,179063	8,57	11,97
Viga 6	-13,15037063	-12,618204	4,67	13,225
Viga 7	-10,15315795	-9,1719243	3,39	14,12

Módulo concreto 369.873,00 kg/cm²

Gráfico 1. Comparación de esfuerzos Caso I

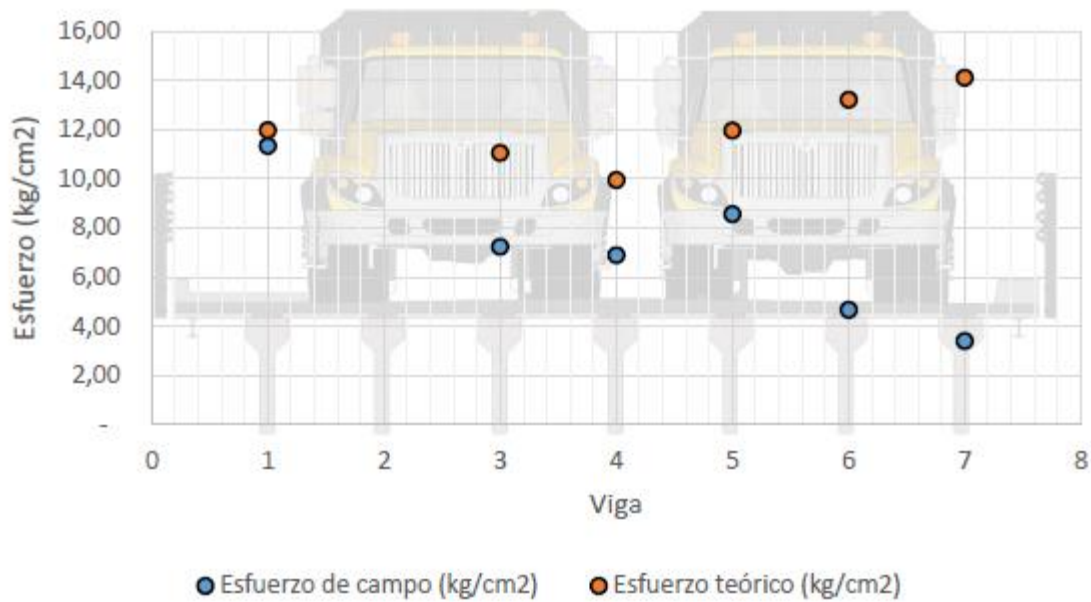


Figura 14. Comparación de esfuerzos para el caso de carga I-E.

Cuadro 6. Determinación de esfuerzos en las vigas para el caso II-E.

Viga	Deformación $\mu\epsilon$		Esfuerzo de campo (kg/cm ²)	Esfuerzo teórico (kg/cm ²)
	Promedio	Percentil 95		
Viga 1	-45,75687837	-45,53184	16,84	17,305
Viga 2				12,555
Viga 3	-28,42487291	-27,7229275	10,25	9,28
Viga 4	-28,75188919	-27,98677	10,35	7,635
Viga 5	-33,33295488	-32,0932975	11,87	7,59
Viga 6	-20,11214593	-19,46429	7,20	5,975
Viga 7	-14,77588035	-13,640785	5,05	2,54

Módulo concreto 369.873,00 kg/cm²

Gráfico 2. Comparación de esfuerzos Caso II

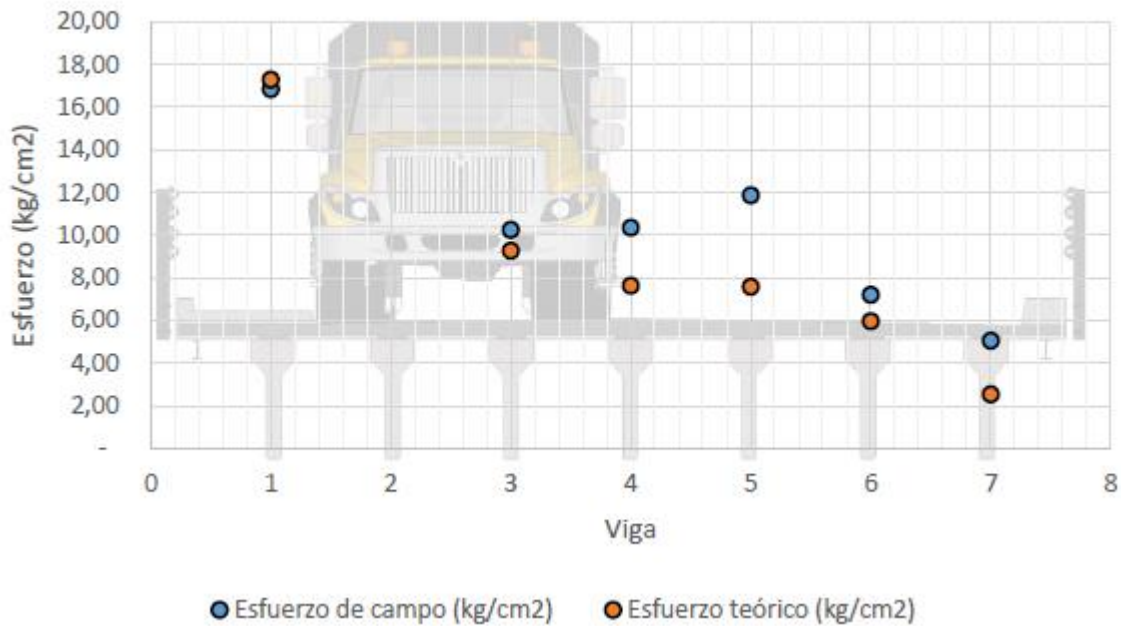


Figura 15. Comparación de esfuerzos para el caso de carga II-E.

Resultados pruebas dinámicas¹

Para el análisis dinámico se recopilaron las aceleraciones (g) “in situ” vs tiempo (s) en las direcciones X, Y, Z. Como ejemplo en figura X se muestran las aceleraciones obtenidas en el eje Z.

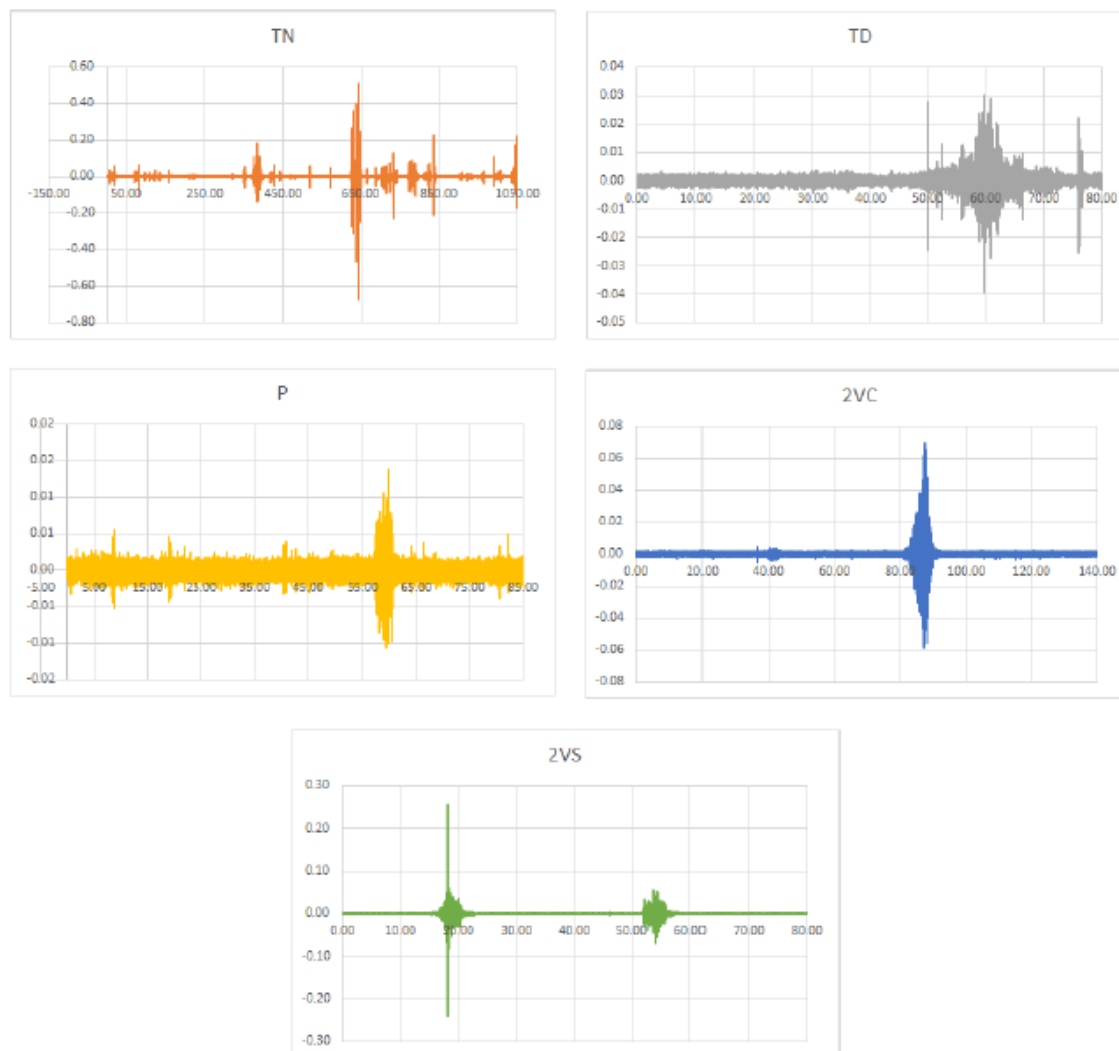


Figura 16. Aceleración (g) “in situ” para el eje Z.

A la señal de aceleraciones registrada en cada dirección se realizó una ventana de tiempo para utilizar las vibraciones que no incluyen la masa de las cargas que exitaron el puente. Posteriormente a esta señal se le aplicó un filtro butterworth con el objetivo de mantener únicamente las frecuencias bajo los 50Hz, las cuales se consideran las más representativas en el modelo estructural del puente.

¹ El análisis dinámico fue realizado por el Ing. Angel Navarro, profesor de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica.

Debido a que las aceleraciones se midieron en el centro geométrico del puente, se identificó en el modelo que el nodo correspondiente es el 110, por lo que para comparar se utilizan los desplazamientos modales de dicho nodo.

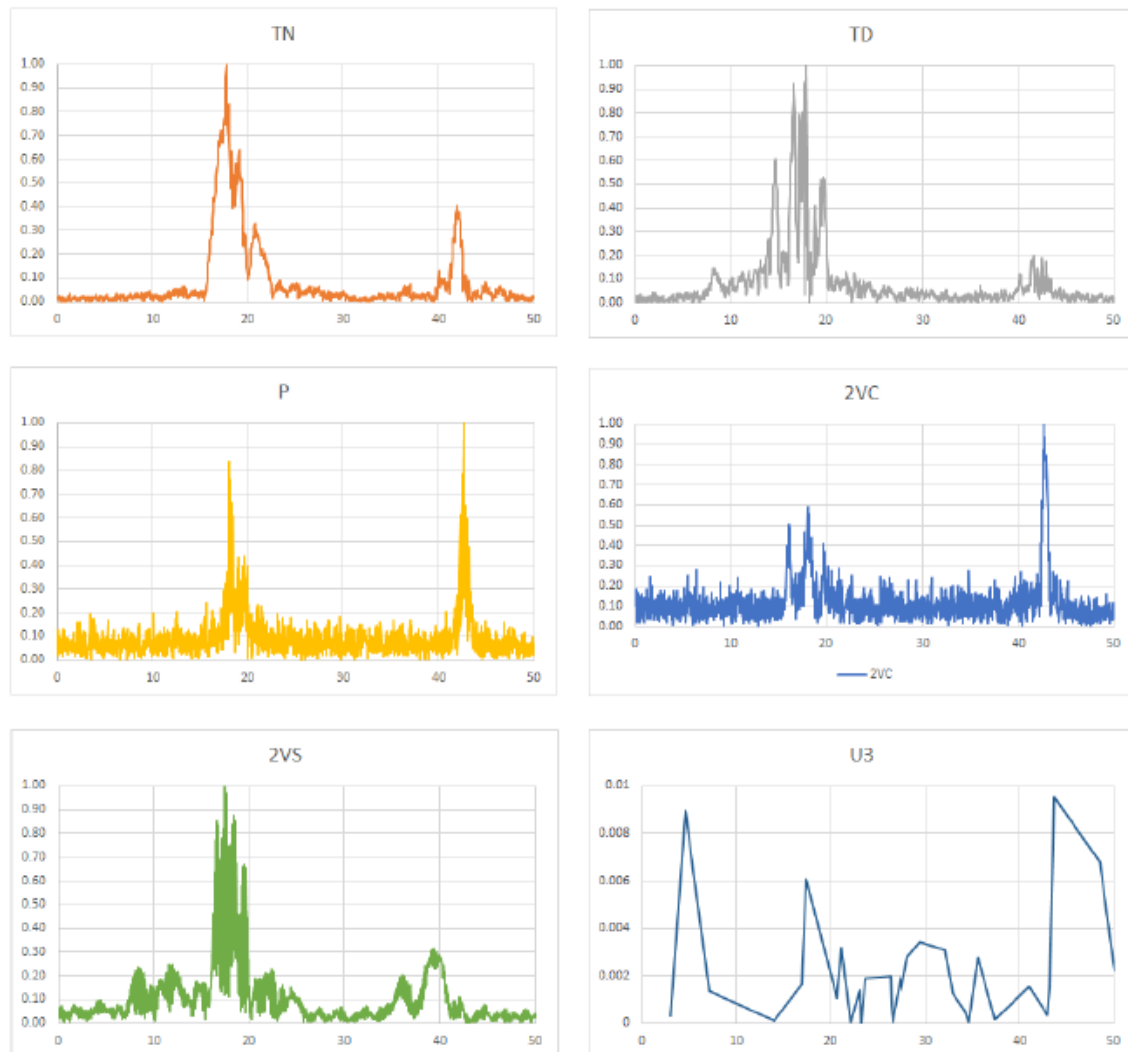


Figura 17. Frecuencias “in situ” y del modelo estructural en la dirección Z.

Para realizar una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y los datos teóricos se decide utilizar una envolvente de las frecuencias in situ y los desplazamientos modales.

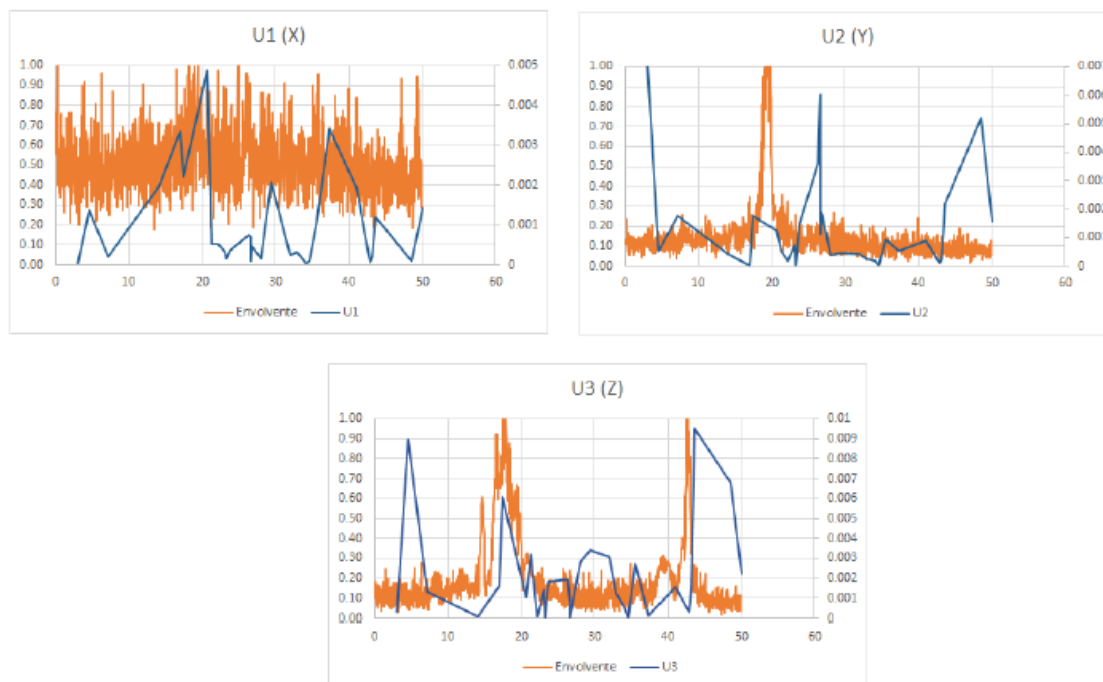


Figura 18. Comparación de la envolvente de las Frecuencias “in situ” y del modelo estructural.

En la figura 18 es posible evidenciar que en el caso de frecuencias fundamentales “in situ” en la dirección “X”, no fue posible obtenerlas a través de los datos experimentales registrados, esto se debe a que se obtuvo un denso rango de frecuencias con una participación semejante al hacer el análisis de Fourier. Es necesario excitar de otra manera el puente para lograr obtener el contenido de frecuencias de manera experimental.

El puente tiene frecuencias fundamentales en las direcciones “Y” y “Z” que no fueron identificadas a través de la prueba de carga, esto es debido a que las condiciones utilizadas no permitieron excitar esos modos de vibración. Sin embargo, en el caso de estas direcciones (ver figura 18), se pueden evidenciar las frecuencias mostradas en el cuadro 7. Si se comparan las frecuencias de vibración identificadas de las mediciones “in situ” para la dirección “Y”, el puente presenta menor rigidez que el modelo teórico, mostrando una frecuencia 26.92% menor, mientras que en la dirección “Z” las frecuencias de vibración del modelo y las experimentales difieren en menos del 0.74% y 2.29%. En la figura 19 se muestra una comparación de las frecuencias identificadas vs las frecuencias obtenidas con el modelo, dejando en evidencia que las diferencias son mínimas y por lo tanto el modelo teórico utilizado es representativo, desde la perspectiva dinámica, del puente construido.

Cuadro 7. Frecuencias fundamentales identificadas.

	Y	Z	
Modelo	26.6	17.51	43.7
Experimental	19.44	17.64	42.7
% Dif.	26.92%	0.74%	2.29%

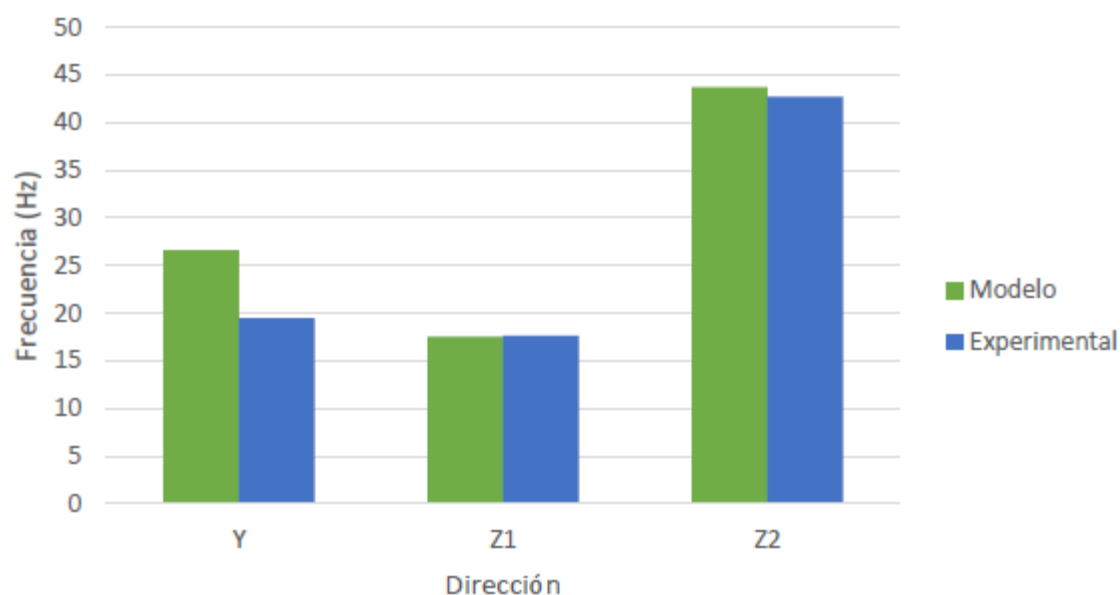


Figura 19. Comparación de frecuencias identificadas.

4.4.2. Prueba de carga en puente sobre toma de aguas, PH Reventazón.

Esta prueba se realizó sobre el puente de la toma de aguas del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón, por lo tanto no es puente sometido al tránsito de vehículos pero sí a cargas altas (vehículos de gran peso como grúas). La estructura se instrumentó con galgas extensiométricas (strain gages) y acelerómetros, con el fin de determinar su comportamiento ante condiciones de carga estática y dinámica y comparar los resultados con la respuesta teórica esperada. La estructura analizada es un puente de 17.15m de longitud, cuya superestructura está compuesta por 3 vigas de concreto postensado simplemente apoyadas.

Los objetivos y limitaciones de la prueba son los mismo expuestos en el caso del puente sobre el río Peje.

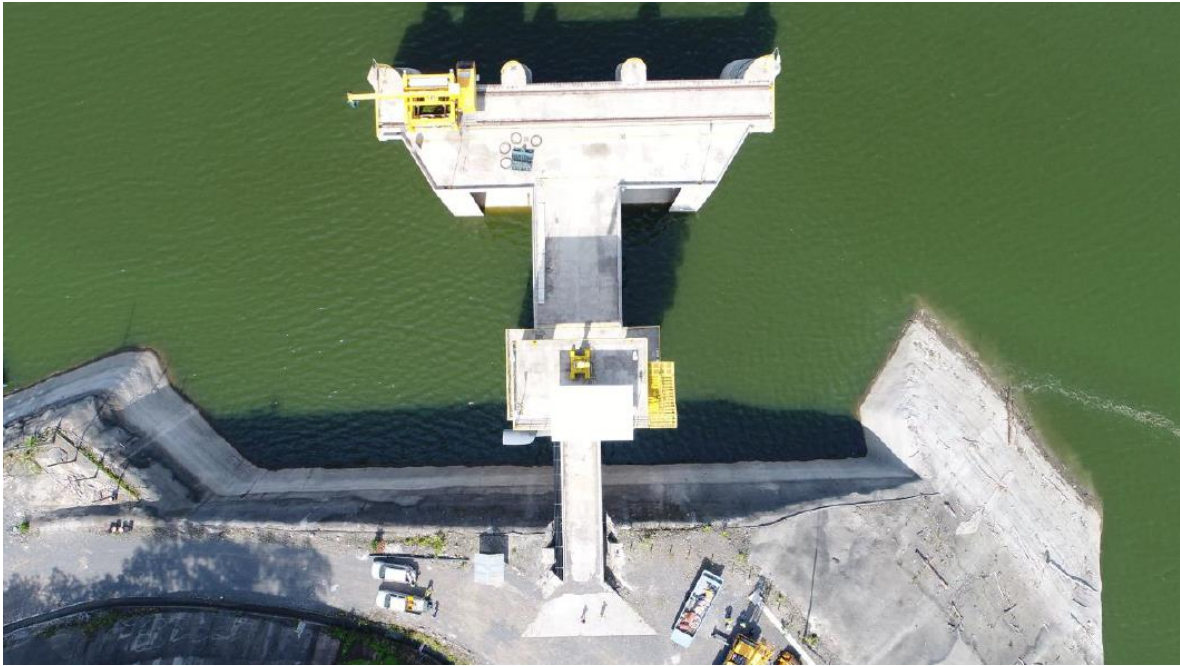


Figura 20. Vista aérea del puente sobre toma de aguas, PH Reventazón.

Características de la estructura

Generalidades	Año de diseño	2015
	Año de construcción	2016
	Especificación de diseño	Sin detalle
	Carga de diseño	Sin detalle
Características geométricas	Tipo estructura	Puente
	Longitud	13.15 m
	Ancho total	6.11 m
	Número de tramos	1
	Alineación en planta	recta
	Número de carriles	1
Características de la superestructura	Tipo de superestructura	Viga simple
	Número de superestructuras	1
	Tipo de losa	Losa de concreto
	Tipo de vigas	Vigas I de concreto
	Número de vigas	3
Características de la subestructura	Número de subestructuras	2 bastiones
	Tipo de bastiones	Uno de los extremos de la superestructura estaba apoyado sobre la estructura de toma de aguas, mientras que el otro extremo en una viga cabezal.
	Tipo de apoyo en bastiones	Simple
	Tipo de fundaciones	Desconocido
Accesorios	Juntas	Selladas
	Barandas	Tipo jersey
	Otros	El puente es de un carril, sin aceras, y no tiene superficie de rodamiento. Pasa cableado eléctrico adosado la estructura.



Figura 21. Fotografía en línea de centro de la estructura.



Figura 22. Fotografía de la superestructura.



Figura 23. Fotografía lateral de la estructura.

Las actividades previas fueron similares a las ejecutadas para el puente sobre el río Peje, solamente que en este caso se requirió llevar un capacitación en seguridad laboral impartida por el ICE, el cual también construyó las plataformas de acceso necesarias para esta estructura.

La **instrumentación** utilizada en este caso fue la siguiente:

Variable a medir	Sensor a utilizar	Otros
Deformación	Se utilizaron sensores eléctricos, de fibra óptica o cuerda vibrante, capaces de medir deformaciones en el rango de los microstrain. Se utilizarán los ST-350 de Bridge Diagnostic.	El equipo de adquisición de datos es el CR-3000 de Campbell Scientific.
Aceleración	Se utilizaron acelerómetros de Bridge Diagnostic uno en cada dirección.	El equipo de adquisición de datos es el STS de Bridge Diagnostic.

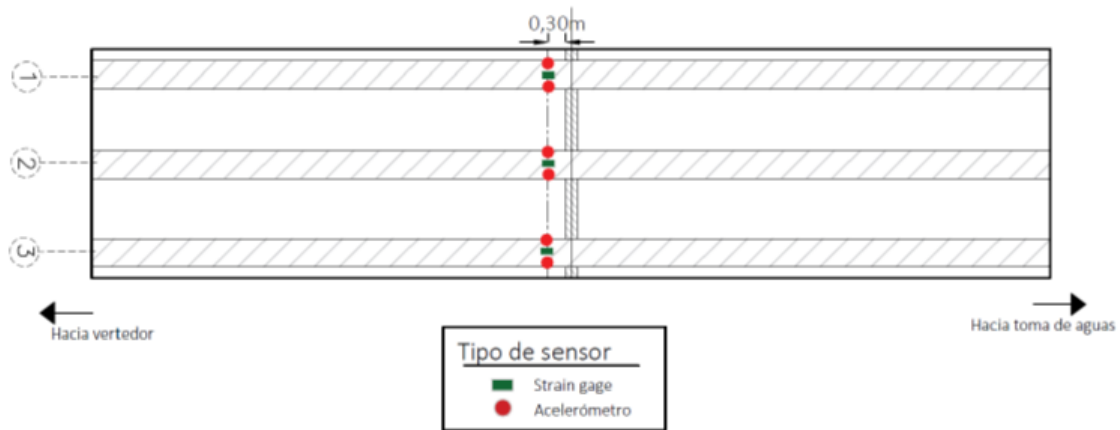


Figura 24. Configuración de la instrumentación utilizada en el puente.

Pruebas estáticas

Para estas pruebas se realizaron 4 diferentes casos de carga utilizando pesas de 12,5 toneladas aportadas por el ICE. En sitio se dio el inconveniente de que la grúa utilizada para montar las pesas sobre la estructura no podía extenderse completamente para colocar las mismas en el centro del claro, por lo cual se ubicaron en la posición más alejada de los apoyos que permitió la grúa.

Una vez colocadas, las pesas permanecieron estáticas en un punto determinado de la estructura durante un periodo de tiempo para revisar la respuesta de la misma mediante la medición de deformaciones. Se hizo una revisión rápida de deformaciones con una sola pesa para verificar si las solicitaciones de carga no estaban afectando a la estructura más de lo esperado, ya que para la modelación se utilizó únicamente información de planos.

Cuadro 8. Casos de carga estática utilizados.

Caso	Descripción	Duración de la prueba
I-E	Se colocó en la estructura una pesa de 12,5 ton y se registraron los valores una vez que se estabilizaron las lecturas instrumentales.	10 min
II-E	Se adicionó a la estructura una pesa más de 12,5 ton y se registraron los valores una vez que se estabilizaron las lecturas instrumentales.	10 min
III-E	Se adicionó a la estructura una pesa más de 12,5 ton (teniendo un total de 3 pesas) y se registraron los valores una vez que se estabilizaron las lecturas instrumentales.	10 min
IV-E	Se adicionó a la estructura una pesa más de 12,5 ton (teniendo un total de 4 pesas) y se registraron los valores una vez que se estabilizaron las lecturas instrumentales.	10 min

Pruebas dinámicas²

Para realizar la prueba de carga dinámica se utilizó un vehículo liviano, acelerándolo desde uno de los extremos del puente y haciéndolo salir por el otro. No se planteó una condición más compleja debido a que el acceso estaba restringido hacia la toma de aguas y que por la longitud corta de la estructura y su ancho no era práctico utilizar carga más pesada.

El vehículo se movió a través del puente mientras se registró la aceleración generada en el punto central del puente. Se registró la respuesta desde poco antes del paso de las cargas hasta un intervalo después de que el vehículo saliera del puente, con el objetivo de obtener las aceleraciones del puente vibrando sin el efecto de las masas de las cargas sobre éste.

Cuadro 9. Casos de carga dinámica utilizados.

Caso	Descripción	Duración de la prueba
I-D	Vehículo saliendo del puente en dirección oeste-este. Se utilizó un vehículo RAV-4.	5 min cada una
II-D		
III-D		
IV-D		

² El análisis dinámico fue realizado por Ing. Angel Navarro, profesor de la Escuela de Ingeniería en Construcción.

Modelo de análisis estructural

Para el análisis de los elementos del puente se realizaron: un modelo tridimensional y un análisis modal.

Para la elaboración del modelo se consideraron los elementos existentes según lo especificado en planos y se toman las dimensiones de éstos sin realizar ningún cambio geométrico debido al deterioro del puente o al proceso constructivo.

El modelo de análisis se realizó haciendo uso del SAP 2000 V19.

Resultados prueba estática

Para ambos casos de carga, la distribución obtenida de los datos es una distribución normal. Para su determinación se realizó un test de verificación utilizando el programa Minitab.

Como ejemplo se muestra a continuación el resultado de la prueba en su caso más crítico IV-E.

Cuadro 10. Determinación de esfuerzos para el caso IV-E.

Viga	Deformación promedio (uE)	Esfuerzo de campo (kg/cm ²)	Esfuerzo teórico (kg/cm ²)	% Diferencia
Viga 1a	-22.56	6.37	9.73	34%
Viga 1b	-15.75	4.45		54%
Viga 2a	-9.26	2.62	10.50	75%
Viga 2b	-5.58	1.58		85%
Viga 3a	-14.32	4.04	9.73	58%
Viga 3b	-26.83	7.58		22%

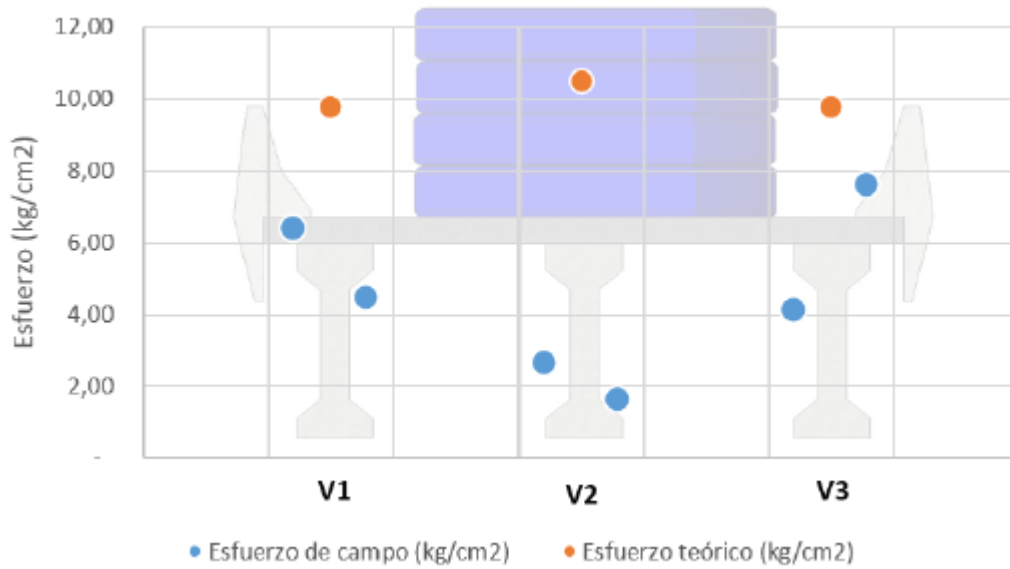


Figura 25. Comparación de esfuerzos caso IV-E.

Pruebas dinámicas

Para las pruebas dinámicas se utilizó un vehículo Toyota RAV-4, con el objetivo de obtener algunas frecuencias fundamentales del puente.

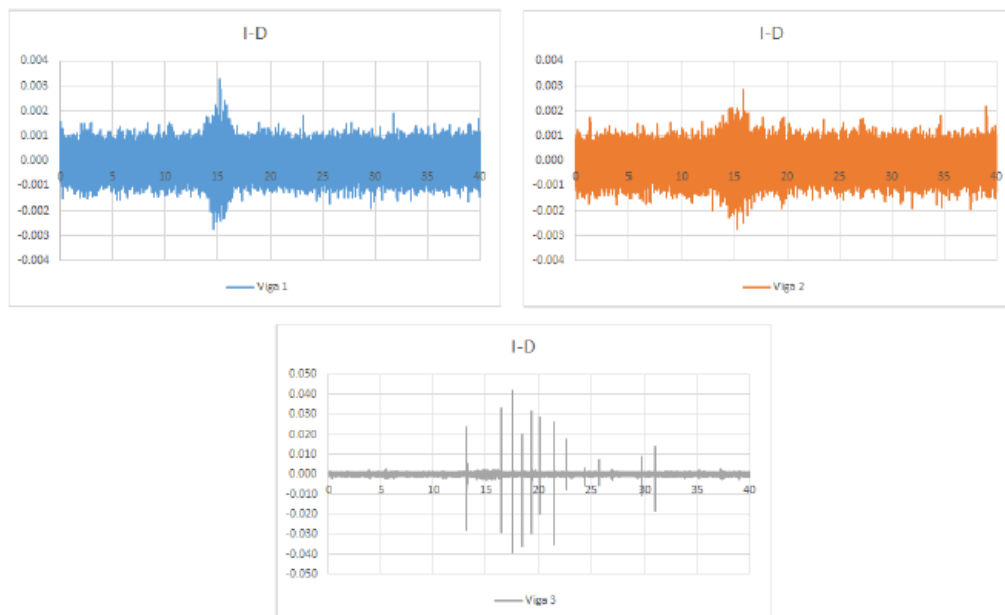


Figura 26. Aceleraciones (g) "in situ" vs tiempo (s) en la dirección z - Caso I-D.

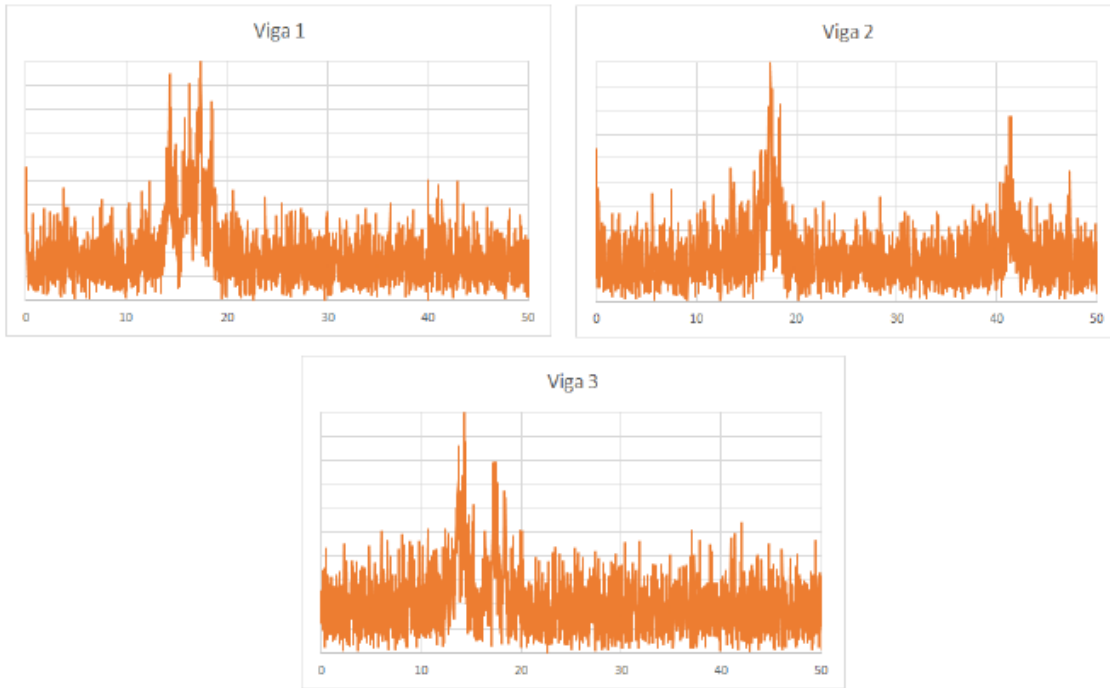


Figura 27. Contenido frecuencial obtenido de datos in situ para el Caso I-D.



Figura 28. Contenido frecuencial obtenido de datos in situ versus modelo estructural.

Cuadro 11. Frecuencias fundamentales identificadas.

Modo	4	10
Modelo	19.3	39.17
Experimental	17.7	40.3
% Dif.	-8.29%	2.88%

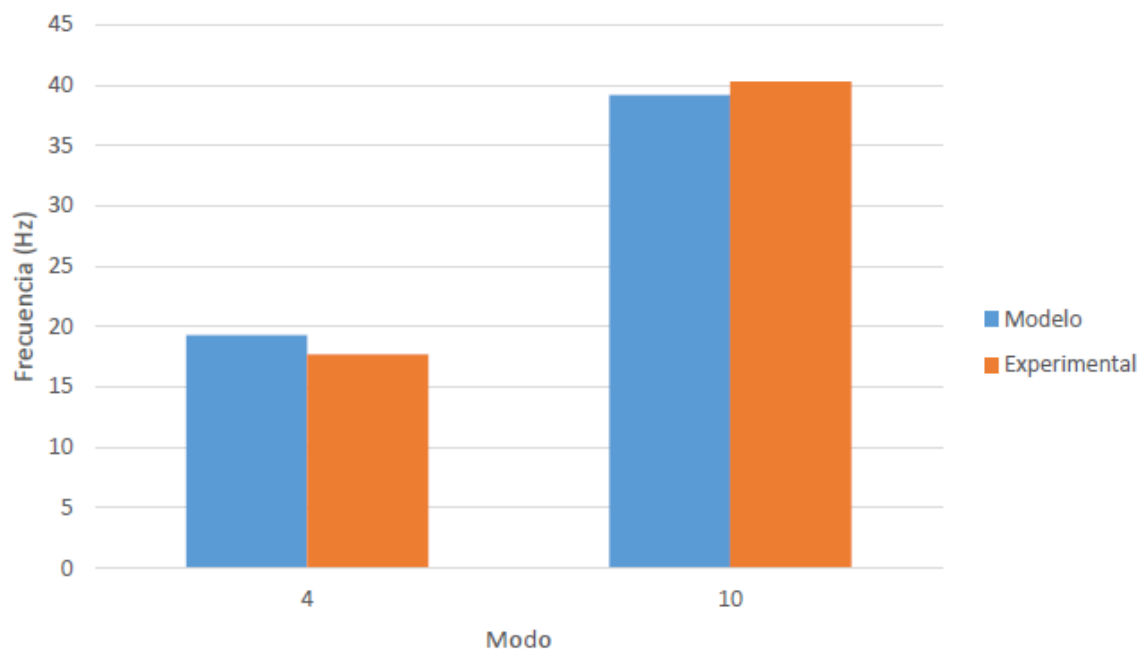


Figura 29. Comparación de frecuencias encontradas.

4.5. Discusión y conclusiones

La metodología planteada se ajustó a los dos casos de aplicación de manera satisfactoria, resultando ser una buena guía para la instrumentación de estos puentes, los cuales poseen características muy diferentes.

En cuanto a los resultados específicos de las pruebas se tiene lo siguiente:

Pruebas en puente sobre el río Peje:

- Los valores de las deformaciones alcanzadas (medidas con el sensor ultrasónico) en las pruebas estáticas han sido en todos los casos admisibles. Las recuperaciones fueron del 100 %.
- Las recuperaciones obtenidas tanto a nivel de deflexiones como de deformaciones, se han realizado de forma prácticamente instantánea. El comportamiento de la estructura puede considerarse, por ello, elástico.

- Los esfuerzos determinados durante la prueba de carga se mantuvieron en órdenes de magnitud similares a los previstos en el modelo teórico, esto permite concluir que el modelo planteado es concordante con el comportamiento registrado y de acuerdo a lo previsto en los planos.
- Las frecuencias fundamentales identificadas permiten concluir que el modelo teórico es representativo de la estructura construida in situ.

Pruebas en puente sobre toma de aguas

- Las recuperaciones obtenidas tanto a nivel de deflexiones como de deformaciones, se han realizado de forma prácticamente instantánea. El comportamiento de la estructura puede considerarse, por ello, elástico.
- Los esfuerzos determinados durante la prueba de carga se mantuvieron en órdenes de magnitud similares a los previstos en el modelo teórico, esto permite concluir que el modelo planteado es concordante con el comportamiento registrado y de acuerdo a lo previsto en los planos. Sin embargo, la losa construida tiene una menor rigidez a la considerada en el modelo, lo que se evidencia al observar que las mediciones difieren hasta en un 86% para la viga central.
- Se encontró coincidencia entre dos de los modos de vibración obtenidos según la modelación y dos modos obtenidos mediante las pruebas de carga dinámicas, lo cual es un indicador de que efectivamente el puente sigue el comportamiento esperado para los niveles de carga aplicados.
- La totalidad de los esfuerzos obtenidos a partir de la instrumentación en campo fueron menores a los esperados de acuerdo a la modelación estructural, por lo tanto, la estructura presenta mayor rigidez a la considerada de forma teórica.
- Se consideran los criterios anteriores suficientes para dar aceptación a la estructura sobre toma de aguas.

4.6. Recomendaciones

- Es necesario aplicar esta metodología a otros casos de interés, como lo son mediciones con carga normales sobre los puentes y mediciones a largo plazo.
- Debe continuarse con las investigaciones de sensores de bajo costo, con el fin de ampliar la cobertura de estas pruebas, ya que una limitante para su aplicación es el costo de los equipos.
- Los datos experimentales obtenidos en estas pruebas pueden realimentar los procesos de diseño de estructuras de puentes y servir de base para la determinación de su vida útil.

Este objetivo incluye la determinación de indicadores para el monitoreo estructural, estos indicadores se detallan en el **Apéndice 12-4: Especificación técnica de indicadores para evaluación de puentes**.

5. Objetivo 3. Desarrollar metodologías para el diagnóstico de la condición estructural de puentes

Responsable: Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc.

5.1. Introducción

Las actividades y productos asociados al Objetivo 3 se describen en el cuadro 11.

Cuadro 11. Resumen de objetivo, entregables y actividades.

Objetivo específico	Actividades	Productos
1. Desarrollar metodologías para el diagnóstico de la condición estructural de puentes.	1. Revisión de la metodología propuesta en la fase 2 de eBridge, adaptarla hacia los estándares de SHM.	Documento con la metodología de evaluación de puentes basada en indicadores de SHM.
	2. Identificar los indicadores requeridos para el diagnóstico de la condición estructural de puentes.	
	3. Aplicar la metodología en dos puentes.	
	4. Generar los indicadores para el sistema de monitoreo.	

5.2. Marco teórico

En el ciclo de vida de un puente, la evaluación sobre su condición es una labor muy importante, no sólo para conocer su nivel de daño, sino que es una herramienta para definir las intervenciones necesarias.

En Costa Rica no se tiene normativa específica de carácter obligatorio para la evaluación de los puentes, pero si se cuenta con un Manual de Inspección de Puentes publicado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes en el año 2007. (*Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007*) y los Lineamientos para el mantenimiento de puentes (*Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007*).

El proyecto eBridge con base en la experiencia generada en la inspección y evaluación presenta en este documento una metodología para la evaluación de estas estructuras.

Conceptos básicos sobre la evaluación de puentes

Evaluación: La evaluación de una estructura de puente es la valoración del desempeño del mismo en un momento determinado y la identificación de daños y fallas en la estructura.

Daño: El daño en una estructura se define como cambios en los materiales, en sus propiedades geométricas, en las propiedades de los sistemas, sus condiciones de frontera o conectividad. Los daños pueden afectar el desempeño actual o futuro de las estructuras.

Falla: Una falla es la condición de un puente cuando un estado límite es alcanzado o excedido.

Monitoreo de salud estructural: Actualmente se utiliza el término de monitoreo de la salud estructural o SHM por sus siglas en inglés, para describir las técnicas que permiten la evaluación y diagnóstico preventivo de las estructuras

Identificación de daños en una estructura

La identificación de daños en una estructura de puente de acuerdo a las técnicas de SHM, se describe en 4 niveles (*Wenzel, 2009*), a saber:

- **Detección del daño:** es cuando se identifica la presencia de un daño.
- **Localización del daño:** es cuando se localiza el daño.
- **Tipificación del daño:** es cuando se determina el tipo de daño.
- **Extensión del daño:** es cuando se evalúa la severidad del daño.

5.3. Metodología

Para la obtención del objetivo planteado en este capítulo, se utilizó la metodología expuesta en la siguiente figura.

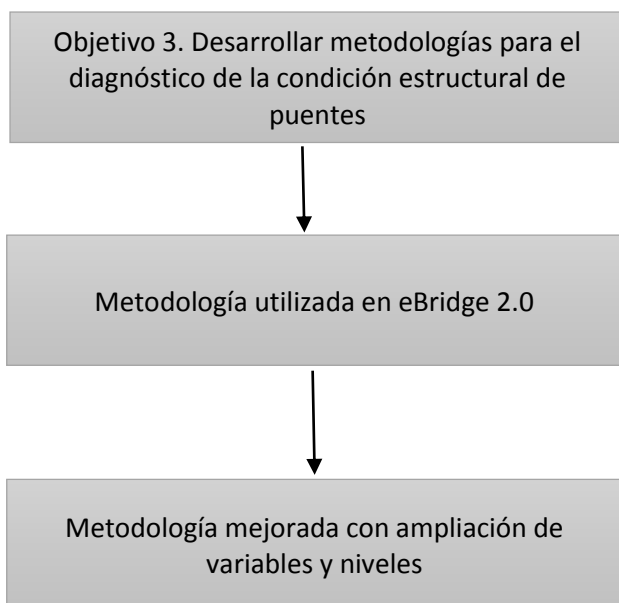


Figura 30. Metodología para obtener objetivo 3 (esquema).

En este caso se tomó la metodología utilizada en la fase anterior y se incluyó en análisis de otras variables que proporcionarían la información requerida por un sistema de monitoreo de salud estructural, se mejoraron formularios y se identificaron otras variables que deben incluir como lo son la ambiental y el tránsito.

El primer paso de la metodología que es el inventario de la infraestructura, se aplicó a más de 300 puentes de rutas nacionales por medio del contrato interadministrativo MOPT-CONAVI.

El cambio más importante en esta metodología es la generación de indicadores que permitan posteriormente priorizar las acciones a realizar en los puentes ya sea que implique una acción inmediata o bien estudios posteriores para caracterizar las patologías.

Las referencias para esta metodología fue el Manual de Inspección de la FHWA y lo solicitado en el Manual de Inspección de Puentes del MOPT, dado que el MOPT es el ente rector en Costa Rica, de este se tomó la totalidad de requerimientos.

Uno de los cambios más importantes fue que se trabajó bajo la norma INTE/ISO/IEC:17020:2012, logrando la acreditación de los procedimientos para la inspección y evaluación visual de puentes.

5.4. Resultados

El resultado de este objetivo es la metodología para evaluación de puentes, basada en indicadores. (Ver **Apéndice 12-3. Metodología de evaluación de puentes** y **Apéndice 12-4. Especificación técnica de indicadores para evaluación de puentes**)

Esta metodología se aplicó en más de 300 puentes de rutas nacionales durante el año 2017 en los pasos 1 y 2; se desarrollaron 7 inspecciones detalladas y tres monitoreos.

El cálculo de los indicadores para estas inspecciones se observa en el prototipo desarrollado bajo el objetivo 5.

5.5. Discusión y conclusiones

Una vez aplicada la metodología se concluyó lo siguiente:

- La metodología se adapta a las condiciones y necesidades identificadas por los usuarios posteriores de la información.
- Los pasos de inventario y evaluación visual de daños corresponden a los requerimientos nacionales y se adecúan a la infraestructura encontrada.
- Las inspecciones detalladas requieren de mayores recursos y es necesario identificar procesos para su estandarización.
- La utilización de indicadores facilita la comparación de datos y la toma de decisiones.

5.6. Recomendaciones

- Es necesario continuar con la validación de la metodología y la estandarización de los procesos para que los resultados sean comparable.
- Es necesario identificar el nivel de importancia de cada uno de los indicadores, con el fin de reducir su número a aquellos que realmente incidan en la decisión final sobre una estructura de puente.
- Se requiere desarrollar protocolos específicos para análisis que involucre la vulnerabilidad de las estructuras.

6. Objetivo 4. Desarrollar metodologías para evaluar la vulnerabilidad ambiental de los puentes

Responsable: Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc.

Las actividades y productos asociados al Objetivo 4 se describen en el cuadro 12.

Cuadro 12. Resumen de objetivo, entregables y actividades.

Objetivo específico	Actividades	Productos
1. Desarrollar metodologías para evaluar la vulnerabilidad ambiental de los puentes.	1. Revisar las metodologías existentes a nivel mundial para evaluar la vulnerabilidad ambiental de los puentes.	Documento con la metodología de evaluación de puentes basada en indicadores de SHM.
	2. Identificar los indicadores requeridos.	
	3. Aplicar la metodología en puentes seleccionados.	
	4. Generar los indicadores para el sistema de monitoreo.	

6.1. Marco teórico

El impacto que tiene el ambiente que rodea a un puente sobre su comportamiento es muy importante, ya que sucede que la gran mayoría de colapsos de estructuras de puentes, no son provocados por daños en su estructura sino por otros factores como: sismos, vientos fuertes, características geotécnicas, condiciones hidrológicas e hidráulicas. De allí que sea necesario adicionalmente a la caracterización de la estructura y las cargas que se aplican, otros factores.

Husdal (2005), propone un enfoque a la vulnerabilidad desde tres aspectos: estructura, naturaleza y tráfico.



Figura 31. Vulnerabilidades en infraestructura de transporte. (Husdal, 2005)

Amenaza sísmica

Con respecto a la amenaza sísmica a nivel nacional se cuenta con los “Lineamientos para el diseño sismoresistente de puentes”, publicado por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA) en el año 2013. Este documento incluye los lineamientos presentados en este documento establecen los requisitos mínimos para el análisis, diseño y rehabilitación sismorresistente de puentes que se construyan en el territorio de la República de Costa Rica.

Uno de los elementos que se puede determinar utilizando estos lineamientos es la demanda sísmica en un sitio la cual se caracteriza mediante un espectro de respuesta de aceleraciones. El espectro depende de la amenaza sísmica y de las características geotécnicas donde se encuentra emplazado el sitio.

Adicionalmente se presenta una zonificación sísmica de la figura 31 la cual divide el territorio costarricense en tres zonas de amenaza sísmica ascendente denominadas zonas II, III y IV, caracterizadas por aceleración pico efectiva en roca (sitio de cimentación S1, artículo 2.3) de 0.24, 0.36 y 0.48, respectivamente y expresadas como fracción de la gravedad. El parámetro de aceleración pico efectiva, en vez de la aceleración pico, es el parámetro del movimiento del terreno utilizado para designar la sacudida sísmica. Estos valores representan una sacudida sísmica con una probabilidad de excedencia del siete por ciento en 75 años, lo que equivale a un período de retorno de aproximadamente 1000 años. Los valores anteriormente mencionados de aceleración pico efectiva en roca se modifican tomando en cuenta las características geotécnicas del sitio de cimentación donde se ubica el puente. (CFIA, 2013)

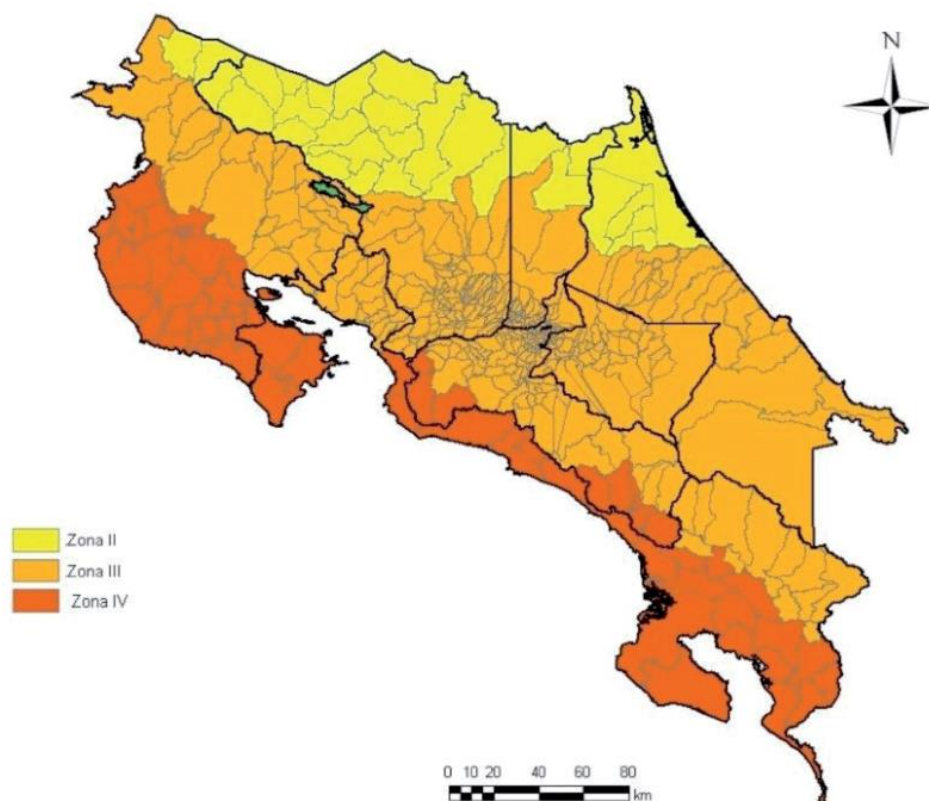


Figura 32. Zonas de amenaza sísmica (CFIA, 2013)

Adicionalmente es importante identificar características geotécnicas del sitio en el cual se encuentra el puente, ya que los diferentes tipos de suelo y los espesores de cada estrato pueden modificar la sacudida sísmica, específicamente las amplitudes y contenido de frecuencias, a partir del basamento rocoso. El comportamiento sísmico del puente está fuertemente relacionado con las características de la sacudida sísmica y por tanto, con los diferentes tipos de sitios de cimentación.

La clasificación de un sitio de cimentación debe basarse en la rigidez del medio soportante, caracterizada por el valor promedio de la velocidad de onda cortante de los 30 metros superficiales del perfil estratigráfico (v_s). El sitio debe clasificarse como uno de los cuatro tipos, S1, S2, S3 y S4 o, en su defecto, como el tipo de sitio S5 que requiere una evaluación de la respuesta dinámica. La clasificación de un sitio de cimentación debe estar basada en una investigación geotécnica que determine como mínimo la estratigrafía del perfil de suelo y los parámetros necesarios de los materiales según sea la importancia del puente y las características del sitio. (CFIA, 2013)

TABLA 2.3-1. Clasificación del sitio geotécnico de cimentación con base en la velocidad de onda cortante

Sitio geotécnico de cimentación	Perfil estratigráfico	Velocidad de onda cortante promedio ponderada en los 30 m superficiales (\bar{v}_s)
S ₁	Roca	760 m/s < (\bar{v}_s)
S ₂	Suelo muy denso y roca suave	360 m/s < (\bar{v}_s) ≤ 760 m/s
S ₃	Suelo rígido	180 m/s < (\bar{v}_s) ≤ 360 m/s
S ₄	Suelo suave	(\bar{v}_s) < 180 m/s
S ₅	Sitios que requieren de una evaluación específica de la respuesta sísmica según la investigación preliminar	
\bar{v}_s = velocidad de onda cortante promedio ponderada para los 30 m superiores del perfil de suelo como está definida en el inciso 2.3.2		

Figura 33. Clasificación del sitio de cimentación (CFIA, 2013)**TABLA 2.3-2.** Clasificación del sitio geotécnico de cimentación con base en la resistencia del medio

Sitio geotécnico de cimentación	Número de golpes de la prueba SPT, promedio ponderado de los 30 m superficiales (N)	Resistencia al corte no drenada, promedio ponderado de los 30 m superficiales (\bar{s}_u)
S ₂	50 ≤ (N)	100 kPa < (\bar{s}_u)
S ₃	15 ≤ (N) < 50	50 kPa < (\bar{s}_u) ≤ 100 kPa
S ₄	(N) < 15	(\bar{s}_u) ≤ 50 kPa
S ₅	Cualquier perfil con estratos de turba o suelo altamente orgánico con espesor mayor de 3.0 m, arcilla de plasticidad muy alta (IP>75) con espesor mayor de 7.5 m o arcilla suave o de mediana rigidez con espesor mayor de 30 m	

Figura 34. Clasificación del sitio de cimentación (CFIA, 2013)

Otro de los elementos a evaluar en el tema de amenaza sísmica son las fallas activas que tienen potencial de generar sismos de gran magnitud, en la figura 34 se presentan algunas fallas a considerar.

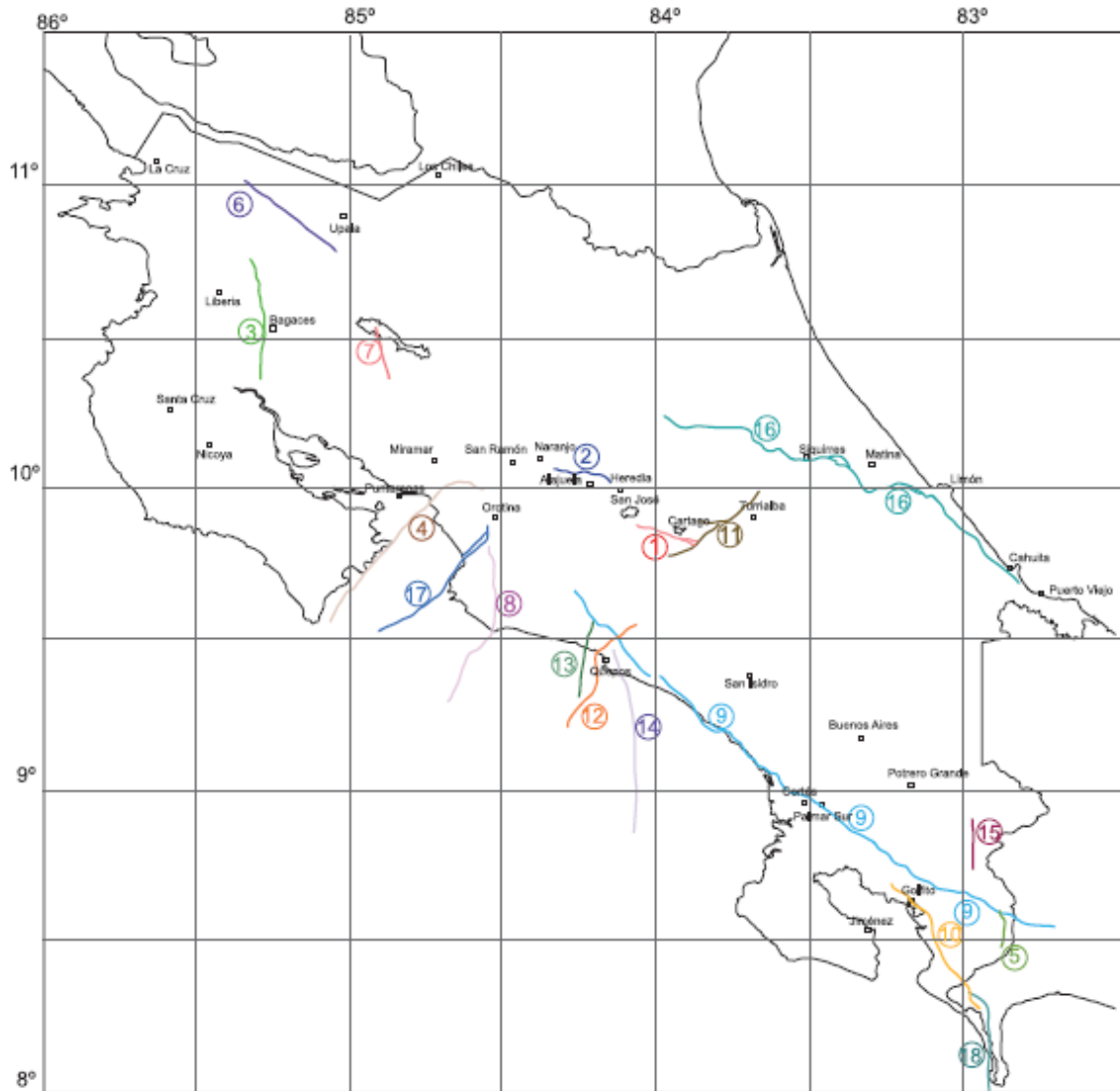


Figura 35. Fallas activas que tienen un potencial de generar un sismo de magnitud $MW = 6.5$ o mayor³ (CFIA, 2013)

Adicionalmente, el Ing. Guillermo Santana, catedrático e investigador de la Universidad de Costa Rica, realizó un estudio de Vulnerabilidad sísmica de los puentes de la red vial del gran área metropolitana, San José, en el año 2006, en este estudio se utilizó la metodología HAZUS y sistemas de información geográfica.

³ Modificado del Atlas tectónico de Costa Rica y Montero, W. y Alvarado, G.E., 1988 y la falla Parrita en Climent, A., 2007, respectivamente para las fallas Bagaces y Parrita.

Consideraciones Hidrológicas e Hidráulicas

El tema hidrológico e hidráulico en la evaluación tradicional de puentes, muchas veces se deja de lado siendo uno de los factores que más influye en el colapso de las estructuras ante eventos naturales.

El Manual Centroamericano de condiciones técnicas hidrológicas e hidráulica para la infraestructura vial en Centroamérica contempla aspectos que deben considerarse a la hora de analizar integralmente un puente. (SIECA, 2016)

En cuanto a las condiciones hidrológicas es un factor importante y constituye un elemento de los estudios hidrológicos que mayor inconveniente presenta al momento de realizar estos análisis. La obtención de los datos no suele ser fácil, ya sea por la dispersión de los datos en diferentes instituciones, por el acceso restringido, por el costo económico o por la inexistencia de la información. Esto dificulta la aplicación de los métodos más recomendados de análisis hidrológico y estimación de caudales máximos, ya que de otra forma se hace uso excesivo de métodos empíricos.

En cuanto a las consideraciones hidráulicas, existe bastante similitud en los criterios adoptados y en el tipo de obras implementadas en los proyectos. Esto puede deberse a que se utiliza mucha referencia estadounidense en los requerimientos (AASHTO, FHWA). Las variaciones se presentan en el criterio para definir un drenaje mayor o un drenaje menor, valores mínimos de tuberías y otros valores de referencia de los componentes de las estructuras.

El uso que se le da al suelo próximo a los cursos de agua debe ser considerado en la etapa de planificación, sin embargo muchas estructura ya construidas tienen cambios drásticos en este uso. En áreas urbanas, las consecuencias de incrementar las velocidades del flujo o el aumento del nivel durante una inundación son más importantes de considerar, ya que los daños en las estructuras instaladas pueden ser mayores, afectando el funcionamiento de la ciudad en incluso atentar contra la vida de las personas. Será importante en estas zonas, contar con una normativa que regule los límites sobre los cambios que pueden ser hechos en las características del flujo o en la cuenca.

Los datos más importantes a considerar para el diseño y evaluación de una estructura son:

- Información topográfica
- Características del cauce
- Datos hidrológicos
 - Características de la cuenca
 - Precipitación
 - Datos de inundaciones previas

Gestión del riesgo

Centroamérica, siendo una región en desarrollo y a la vez vulnerable ante los fenómenos naturales cada vez más recurrentes, tiene poco margen de equivocación para invertir sus

recursos destinados a la infraestructura pública. De ahí que la etapa de planificación de proyectos es de vital importancia y es donde deben evaluarse los posibles efectos de la construcción de las infraestructuras en las condiciones actuales del entorno.

Se hace necesario contar con lineamientos generales a tener en cuenta en la incorporación de una visión de reducción del riesgo de desastres ante la ocurrencia de amenazas naturales. Serán los ministerios de transporte o gobiernos locales interesados de la ejecución de las obras viales, los responsables de exigir la incorporación de dicha visión en el ciclo de vida del proyecto.

Actualmente, en la región se está utilizando e incorporando este componente en los proyectos viales; derivado de la implementación de políticas gubernamentales en los diferentes países. Sin embargo, aún carece de fortaleza, probablemente debido a una falta de financiamiento suficiente para la gestión de riesgos en los diferentes países, la falta o desconocimiento de la información necesaria y disponible para su evaluación, la deficiente comunicación entre las instituciones técnico-científicas que evalúan y producen información sobre amenazas naturales y vulnerabilidades con los ministerios de transporte, lo cual obliga a generar información nueva o procesada de otras fuentes para cumplir con este análisis. (SIECA, 2016)

Para ello, será necesaria la recopilación de información existente que esté relacionada con los siguientes tópicos:

- Historial de eventos naturales en el área donde se pretende realizar la obra o en el área de influencia.
- Informes técnicos, notas periodísticas u otro material relacionado con desastres, daños registrados en la zona o en la infraestructura existente y rehabilitaciones o reparaciones realizadas. También, los estudios de impacto socio-económico posterior a los desastres constituyen una buena referencia.
- Evaluaciones de vulnerabilidades y amenazas realizadas previamente en el entorno del proyecto, realizados por instituciones técnico-científicas, organismos internacionales u organismos no gubernamentales.
- Mapas de riesgo o evaluaciones de riesgo realizadas previamente en la zona. Se incluyen en este punto los mapas topográficos, las fotografías aéreas y/o las imágenes satelitales multitemporales, así como mapas de peligrosidad.
- Otros documentos que permitan tener una visión global de las características de la zona, como informes de lecciones aprendidas y reportes elaborados por organismos o comités de atención de emergencias, por mencionar algunos.
- Entrevistas con los habitantes próximos a la zona del proyecto u asociaciones comunales.

Cambio climático

Actualmente el análisis del riesgo de la infraestructura debe considerar la variable de cambio climático, existen herramientas que facilitan la evaluación de esta variable en la infraestructura tal como el PIEVC Engineering Protocol, este protocolo es propuesto por

Ingenieros Canada y revisa sistemáticamente la información climática histórica y proyecta la naturaleza, la gravedad y la probabilidad de futuros cambios y eventos climáticos. También establece la capacidad de adaptación de una infraestructura individual según lo determinado por su diseño, operación y mantenimiento. Incluye una estimación de la gravedad de los impactos del clima sobre los componentes de la infraestructura (es decir, deterioro, daño o destrucción) para permitir la identificación de componentes de mayor riesgo y la naturaleza de la amenaza del impacto del cambio climático. Esta información se puede usar para hacer juicios de ingeniería informados sobre qué componentes requieren adaptación y cómo adaptarlos, p. ajustes de diseño, cambios en los procedimientos operacionales o de mantenimiento.

Desde 2008, el Protocolo se ha aplicado para evaluar los riesgos climáticos y las vulnerabilidades en una amplia gama de sistemas de infraestructura en Canadá, incluyendo: edificios (residenciales, comerciales e institucionales); sistemas de aguas pluviales / aguas residuales, carreteras y estructuras asociadas (por ejemplo, puentes y alcantarillas), sistemas de suministro y gestión de agua, distribución de electricidad e infraestructura aeroportuaria. Cerca de 40 evaluaciones de riesgos de infraestructura se han completado a partir de noviembre de 2014. (*Engineers Canada, 2016*)

6.2. Metodología

Revisión del estado del arte

Se hizo una revisión de los conceptos y la información disponible en el tema.

Análisis de requerimientos

Se analizó la información necesaria para una evaluación integral de los puentes considerando las variables, el producto fue la lista de posibles indicadores ambientales.

Selección de indicadores para el prototipo

Con base en la información disponible se seleccionaron algunos indicadores para ser adjuntados al prototipo.

Propuesta de metodología de evaluación

La metodología de evaluación se realizó de forma integral, para lo cual puede revisarse el documento **Apéndice 12-3. Metodología de evaluación de puentes.**

6.3. Resultados

En este capítulo el principal resultado es la identificación de los indicadores propuestos para evaluar el tema ambiental en las estructuras de puentes, estos pueden visualizarse en el

documento **Apéndice 12-3. Metodología de evaluación de puentes** y **Apéndice 12-4. Especificación técnica de indicadores para evaluación de puentes.**

6.4. Discusión y conclusiones

La identificación de indicadores ambientales es una labor que debe realizarse integralmente en un proceso de evaluación.

- Se identificaron varios indicadores que podrían valorar el riesgo ambiental en estructuras de puentes.
- Un análisis integral requiere de no solamente el análisis del puente sino también del entorno y una de las unidades adecuadas para este análisis es la cuenca.
- La generación de información y variables ambientales es una labor no solamente de los inspectores de puentes, sino también de instituciones como el Instituto Meteorológico Nacional.
- La mejor forma de administrar la información ambiental es a través de un sistema de información geográfica, y de allí se pueden generar los indicadores para toma de decisiones.

6.5. Recomendaciones

- Para validar esta propuesta es necesario la generación de información y la creación de una capa de información geográfica.
- Se requiere la generación de indicadores para validar su utilidad con los usuarios.
- Es necesario generar políticas para el acceso a la información, especialmente a información meteorológica.
- Otra información como la de suelos podría almacenarse y generarse un convenio con laboratorios de materiales.

7. Objetivo 5. Diseñar un prototipo de sistema de inteligencia de negocios para la toma de decisiones

Responsable: Ing. César Garita Rodríguez, PhD.

7.1. Introducción

Las actividades y productos asociados al Objetivo 5 se describen en el cuadro 13.

Cuadro 13. Resumen de objetivo, entregables y actividades.

Objetivo específico	Actividades	Productos
1. Diseñar un prototipo de sistema de inteligencia de negocios para la toma de decisiones.	1. Evaluar y seleccionar la tecnología para el sistema de inteligencia de negocios.	Prototipo de Sistema de inteligencia de negocios prototipo para la administración de los indicadores.
	2. Integrar los indicadores necesarios para el sistema de monitoreo.	
	3. Desarrollar el prototipo de sistema de inteligencia de negocios para la administración de los indicadores.	

7.2. Marco Teórico

En el documento entregable incluido en: **Apéndice 12-5. Documentación de Prototipo de Inteligencia de Negocios**, se provee una revisión detallada del estado del arte de herramientas de inteligencia de negocios, que constituye el marco teórico principal de este objetivo.

Como parte de la revisión bibliográfica se seleccionaron algunos criterios que se utilizan para evaluar las herramientas de inteligencia de negocios, además se generaron diferentes criterios que pueden ser importantes para la aplicación en el programa e-Bridge. A partir de la revisión bibliográfica se identificó una serie de herramientas de inteligencia de negocios que son candidatas para cumplir con la mayoría de los criterios explicados anteriormente.

Además, en el documento entregable y en los artículos asociados a este objetivo, se incluyen y analizan diversas referencias bibliográficas que complementan y actualizan el marco teórico realizado en este objetivo. También se lograron publicar artículos específicamente sobre el prototipo de un sistema de información estratégica usando técnicas de inteligencia de negocios, como se indica en la subsección de Resultados de este objetivo.

7.3. Metodología

El documento entregable (incluido en el Apéndice Documentación de Prototipo de Inteligencia de Negocios) asociado a este objetivo contiene una descripción de las tareas y metodología seguida para realizar las tareas asociadas. A continuación, se incluye un resumen de la metodología seguida en cada tarea:

- Evaluar y seleccionar la tecnología para el sistema de inteligencia de negocios. Para esta tarea se realizaron las siguientes actividades:
 - Revisión bibliográfica.
 - Definición de criterios de evaluación.
 - Selección de herramientas a evaluar.

- Comparación de herramientas.
 - Evaluación (ranking) de herramientas.
- Integrar los indicadores necesarios para el sistema de monitoreo. Para esta tarea se trabajó en colaboración con los ingenieros en construcción para poder identificar, caracterizar y diseñar las visualizaciones específicas para indicadores que deben integrarse en el prototipo. Se realizaron estudios de indicadores considerados por los expertos en evaluación de puentes y se elaboraron fichas descriptivas por cada indicador. Se determinó la manera sugerida de visualizar cada indicador según las funciones ofrecidas por la herramienta de inteligencia de negocios utilizada. La integración final se aprecia en el prototipo finalmente desarrollado con la incorporación de todos los indicadores necesarios. Los indicadores integrados se incluyen describen en el documento entregable respectivo.
- Desarrollar el prototipo de sistema de inteligencia de negocios para la administración de los indicadores. Para desarrollar el prototipo, se realizaron básicamente las siguientes acciones:
 - Obtención y limpieza de datos.
 - Desarrollo de modelo de datos y del proceso ETL (extracción, transformación, carga).
 - Análisis de datos (desarrollo de cubo).
 - Análisis de información (desarrollo de visualizaciones)

7.4. Resultados

Los principales resultados técnicos asociados a este objetivo se resumen a continuación:

- Comparación y evaluación de herramientas de inteligencia de negocios aplicables a e-Bridge 3.0.
- Modelo de datos relacional para prototipo de inteligencia de negocios.
- Datos asociados a la inspección técnica de más de 1000 puentes de rutas nacionales, debidamente estandarizados, procesados y cargados.
- Cubo OLAP para análisis de datos de inspecciones.
- Visualizaciones de todos los indicadores estratégicos identificados en el proyecto.
- Reportes web con visualizaciones de indicadores.
- Prototipos tanto en Pentaho como en PowerBI para monitoreo de indicadores estratégicos.

7.5. Discusión y conclusiones

El uso de una herramienta de inteligencia de negocios en el escenario de e-Bridge 3.0 sirve para entregar información de manera rápida y eficaz. Las consultas que se resuelven de esta forma reducen drásticamente el tiempo que los usuarios necesitarían para realizarlas manualmente, así como el riesgo de error asociado. También se facilita el proceso de consultas detalladas de manera flexible pues se permiten diferentes filtros de información y se apoya lograr una visión más estratégica de la información que se puede consultar.

La utilización de visualizaciones interactivas ayuda al usuario a comprender mejor la naturaleza de la consulta; además, el diseño de visualizaciones más dinámicas que se pueden manipular puede potenciar la entrega y comprensión de información a los observadores.

Se aplicaron en particular las herramientas de Pentaho y Power BI en el desarrollo de diferentes versiones del prototipo. Sin embargo, el paso de integrar Pentaho con el portal web de e-Bridge, en cuanto a la generación de consultas con Saiku Analytics presentó múltiples problemas, algunos de estos debido a que el API disponible no permite extraer la información de la mejor manera ni empotrarla en las páginas web. Power BI resultó ser mucho más flexible y simple en ese sentido pues permitió incluir visualizaciones web interactivas de forma directa.

Se prevé que haya una extensión de los datos proporcionados por los ingenieros en construcción conforme se aumente el inventario de puentes que se maneja en el CIVCO. Estos nuevos datos se deben integrar fácilmente, así como la generación de nuevas consultas que se requieran.

7.6. Recomendaciones

- Proponer un proyecto de extensión para aplicar el prototipo de inteligencia de negocios para manejo de indicadores estratégicos de monitoreo de puentes, con una municipalidad real en el país. En particular se propuso un proyecto en ese sentido que se desarrollará en la Municipalidad del Guarco, 2018-2019.
- Seleccionar un subconjunto de los indicadores desarrollados que sean de interés del público en general y colocarlos en el sitio web del proyecto e-Bridge dentro del dominio web institucional del TEC.
- Revisar el cálculo de la forma en que se calcula el estado de general de las estructuras de forma que sea más “positivo” o tolerante a la condición mala o deficientes de componentes menores que actualmente puede incidir mucho en la calificación general.
- Continuar con el desarrollo de sistemas que apliquen técnicas de inteligencia de negocios, preferiblemente bajo la modalidad de “auto servicio”, es decir, que los sistemas estén disponibles como un servicio web ofrecido en la nube. Esto con el fin de evitar el costo y esfuerzo de administrar plataformas tecnológicas y de comunicaciones accesibles a través de la red local del TEC.
- Capacitar a un grupo más extenso de colaboradores del CIVCO y del Programa de Puentes del TEC para que puedan ellos mismos administrar los datos e indicadores.
- Continuar con las labores de diseminación de información referente a los resultados obtenidos en este objetivo particular, en conferencias y foros internacionales. Considerar la elaboración de un libro sobre el diseño de indicadores estratégicos para monitoreo de puentes usando inteligencia de negocios.

8. Resumen de principales resultados

Con base en las contribuciones de cada objetivo, se presenta el siguiente resumen de los principales resultados globales.

- Se analizaron de herramientas y sistemas de monitoreo de estructuras de puentes. Esta tarea produjo tablas resumen de este análisis, listado de criterios de evaluación de sistemas, listado de sistemas seleccionados por evaluar, y una tabla comparativa detallada de criterios vs. sistemas.
- Se especificaron casos de uso como requerimientos principales para un futuro sistema de monitoreo de puentes, incluyendo identificación de actores, información y procesos principales. En los casos generales se encuentran:
 - Administración de Información Técnica
 - Modelo de Fiabilidad
 - Inspección
 - Inteligencia de Negocios
 - Red de Comunicación de Datos
 - Integración de Información
 - Sistema de Información Geográfica
 - Priorización
 - Gestión de Costos
 - Monitoreo de Estructuras
- En el taller de consulta y validación, los productos principales fueron un resumen de las respuestas obtenidas con respecto a la valoración de la importancia de diferentes requerimientos y características de diseño del prototipo desarrollado. Esto permitió obtener información valiosa como retroalimentación a las tareas realizadas.
- Se establece un protocolo para la instrumentación de puentes y se realizan 2 pruebas de carga. (**Apéndice 12-2. Protocolo para instrumentación de puentes**)
- Se propone una metodología para evaluación de puentes, basada en indicadores. (Ver **Apéndice 12-3. Metodología de evaluación de puentes** y **Apéndice 12-4. Especificación técnica de indicadores para evaluación de puentes**)
- Se aplicó la metodología en más de 300 puentes de rutas nacionales durante el año 2017 en los pasos 1 y 2; se desarrollaron 7 inspecciones detalladas y tres monitoreos.
- Se identificaron indicadores para evaluar el tema ambiental en las estructuras de puentes, estos pueden visualizar se en el documento **Apéndice 12-3. Metodología de evaluación de puentes** y **Apéndice 12-4. Especificación técnica de indicadores para evaluación de puentes**.
- Se presenta un prototipo funcional del sistema de indicadores.
- Se compararon y evaluaron herramientas de inteligencia de negocios aplicables a e-Bridge 3.0.
- Se generó un modelo de datos relacional para prototipo de inteligencia de negocios.
- Se generaron datos asociados a la inspección técnica de más de 1000 puentes de rutas nacionales, debidamente estandarizados, procesados y cargados.
- Se generó un Cubo OLAP para análisis de datos de inspecciones.
- Se generaron visualizaciones de todos los indicadores estratégicos identificados en el proyecto.
- Se generaron reportes web con visualizaciones de indicadores.

- Se generaron prototipos tanto en Pentaho como en PowerBI para monitoreo de indicadores estratégicos.

9. Resumen de principales conclusiones

A continuación se resumen y discuten las principales conclusiones:

- Existen a nivel mundial sistemas de monitoreo de puentes que tienen algunas funcionalidades en común, sin embargo, la mayor parte de los sistemas investigados no poseen funcionalidades importantes como lo es la inteligencia de negocios o integración de información mediante flujos de trabajo científico, las cuales permiten realizar consultas básicas y estratégicas sobre desempeño o información de puentes. Estas funcionalidades son propias del proyecto de eBridge y proporcionan un valor agregado en comparación a otros sistemas de monitoreo de puentes.
- El método de taller guiado por cuestionarios con preguntas abiertas y cerradas permitió obtener información valiosa y realista con respecto a las verdaderas expectativas o requerimientos de usuarios potenciales de e-Bridge 3.0.
- En cuanto a la evaluación de la importancia de los procesos y funciones identificados obtenida por medio del taller de consulta, se puede decir que en general la calificación obtenida para todos los procesos es alta. Particularmente se puede destacar la importancia atribuida a los procesos de: modelo de fiabilidad, priorización, inteligencia de negocios y administración de información técnica.
- En el caso de los indicadores estratégicos, los mejor evaluados en cada categoría fueron:
 - Condición estructural: viga principal, pilas y bastiones.
 - Inventario: tipo de ruta, tipo de estructura, tipo de material y zona administrativa.
 - Ambientales: vulnerabilidad sísmica.
 - Comportamiento: deformación.
- En cuanto a la evaluación del prototipo desarrollado, destacan importancia e impacto como los factores más altos. El más bajo, aunque arriba de 4 en la escala 1-5 corresponde a claridad.
- El desarrollo de un sistema de monitoreo de puentes con todos los procesos identificados es una tarea inmensa y que posiblemente sobrepasa el alcance de un proyecto de investigación universitario. Es necesario enfocarse en funcionalidades específicas, diferenciadas y factibles que permitan de alguna forma “mercadear” la idea con una proposición de valor clara para el gobierno o empresas contratistas que podrían convertirse en eventuales socios de desarrollo.
- A través del taller, se identificaron ciertas funciones o indicadores interesantes algunos de los cuales que pueden incorporarse en un futuro cercano tales como tráfico promedio diario.
- La metodología de evaluación planteada se ajustó a los dos casos de aplicación de manera satisfactoria, resultando ser una buena guía para la instrumentación de estos puentes, los cuales poseen características muy diferentes.
- La metodología se adapta a las condiciones y necesidades identificadas por los usuarios posteriores de la información.

- Los pasos de inventario y evaluación visual de daños corresponden a los requerimientos nacionales y se adecúan a la infraestructura encontrada.
- Las inspecciones detalladas requieren de mayores recursos y es necesario identificar procesos para su estandarización.
- La utilización de indicadores facilita la comparación de datos y la toma de decisiones.
- Se identificaron varios indicadores que podrían valorar el riesgo ambiental en estructuras de puentes.
- Un análisis integral requiere de no solamente el análisis del puente sino también del entorno y una de las unidades adecuadas para este análisis es la cuenca.
- La generación de información y variables ambientales es una labor no solamente de los inspectores de puentes, sino también de instituciones como el Instituto Meteorológico Nacional.
- La mejor forma de administrar la información ambiental es a través de un sistema de información geográfica, y de allí se pueden generar los indicadores para toma de decisiones.
- Proponer un proyecto de extensión para aplicar el prototipo de inteligencia de negocios para manejo de indicadores estratégicos de monitoreo de puentes, con una municipalidad real en el país. En particular se propuso un proyecto en ese sentido que se desarrollará en la Municipalidad del Guarco, 2018-2019.
- Seleccionar un subconjunto de los indicadores desarrollados que sean de interés del público en general y colocarlos en el sitio web del proyecto e-Bridge dentro del dominio web institucional del TEC.
- Revisar el cálculo de la forma en que se calcula el estado de general de las estructuras de forma que sea más “positivo” o tolerante a la condición mala o deficientes de componentes menores que actualmente puede incidir mucho en la calificación general.
- Continuar con el desarrollo de sistemas que apliquen técnicas de inteligencia de negocios, preferiblemente bajo la modalidad de “auto servicio”, es decir, que los sistemas estén disponibles como un servicio web ofrecido en la nube. Esto con el fin de evitar el costo y esfuerzo de administrar plataformas tecnológicas y de comunicaciones accesibles a través de la red local del TEC.
- Capacitar a un grupo más extenso de colaboradores del CIVCO y del Programa de Puentes del TEC para que puedan ellos mismos administrar los datos e indicadores.
- Continuar con las labores de diseminación de información referente a los resultados obtenidos en este objetivo particular, en conferencias y foros internacionales. Considerar la elaboración de un libro sobre el diseño de indicadores estratégicos para monitoreo de puentes usando inteligencia de negocios.

Finalmente, se concluye que se cumplieron satisfactoriamente todas las tareas y entregables indicadas en el plan de acción del proyecto.

10. Resumen de recomendaciones

Las recomendaciones principales se incluyen en los siguientes puntos:

- Tomar en cuenta la evaluación obtenida de los indicadores y diseñar indicadores para perfiles de usuario más específicos tales como: tomador de decisiones (político), ingeniero, ciudadano en general.
- Enfocarse en desarrollos a corto y mediano plazo en aspectos de inteligencia de negocios, particularmente al manejo de indicadores estratégicos asociados al monitoreo de puentes.
- Continuar con el proceso de diseminación tanto mediante la realización de talleres o presentaciones con municipalidades o instituciones gubernamentales, como mediante las publicaciones científicas.
- Trabajar con alguna municipalidad cercana al TEC para seguir validando y aplicando el enfoque de inteligencia de negocios a la gestión de información de evaluación y monitoreo de puentes. Esto se hará mediante el proyecto de extensión aprobado por la VIE en colaboración con la Municipalidad del Guarco.
- Es necesario aplicar esta metodología a otros casos de interés, como lo son mediciones con carga normales sobre los puentes y mediciones a largo plazo.
- Debe continuarse con las investigaciones de sensores de bajo costo, con el fin de ampliar la cobertura de estas pruebas, ya que una limitante para su aplicación es el costo de los equipos.
- Los datos experimentales obtenidos en estas pruebas pueden realimentar los procesos de diseño de estructuras de puentes y servir de base para la determinación de su vida útil.
- Es necesario continuar con la validación de la metodología y la estandarización de los procesos para que los resultados sean comparable.
- Es necesario identificar el nivel de importancia de cada uno de los indicadores, con el fin de reducir su número a aquellos que realmente incidan en la decisión final sobre una estructura de puente.
- Se requiere desarrollar protocolos específicos para análisis que involucre la vulnerabilidad de las estructuras.
- Para validar esta propuesta es necesario la generación de información y la creación de una capa de información geográfica.
- Se requiere la generación de indicadores para validar su utilidad con los usuarios.
- Es necesario generar políticas para el acceso a la información, especialmente a información meteorológica.
- Otra información como la de suelos podría almacenarse y generarse un convenio con laboratorios de materiales.

11. Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *The Manual for Bridge Evaluation*. Washington, DC: AASHTO.
- Federal Highway Administration. (2006). *Bridge Inspector's Reference Manual*. Virginia: National Highway Institute, USA.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2007). *Manual de Inspección de Puentes*. San José: MOPT.
- Wenzel, H. (2009). *Health Monitorin of Bridges*. Austria: John Wiley & Sons, Ltda.
- Ebeling, Charles E. 2010. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. Second Edition. Waveland Press, Inc. USA.
- O'Connor, Patrick. Kleyner, Andre. 2012. Practical Reliability Engineering. Fifth Edition. Wiley. USA.
- Nowak, A.S. System Reliability Models for Bridge Structures. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. Vol. 52, No.4, 2004.
- Estes Allen C. et al. Repair Optimization of Highway Bridges Using System Reliability Approach. Journal of Structural Engineering. July 1999.
- Nowak, A.S. et al. Reliability Analysis of Prestressed Concrete Bridge Girders: Comparison of Eurocode, Spanish Norma IAP and AASHTO LRFD. 8th Annual ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability. 2000.
- Nowak, A.S. et al. System Reliability Models for Bridges. Structural Safety, 7 (1990) 247-254. 1990. Elsevier.
- Frangopol, D. M. et al. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges. Journal of Computing in Civil Engineering. January 2001.
- Estes, Allen C. 1997. A System Reliability Approach to the Lifetime Optimization of Inspection and Repair of Highway Bridges. PhD Thesis. University of Colorado, USA.
- Muñoz, Edgar. Et al. Confiabilidad Estructural apoyada en monitoreo e instrumentación: aplicación en un puente de acero. Revista Ingeniería en Construcción, Vol. 21, No.2, Agosto. 2006. Colombia.
- Ortiz Quesada, Giannina. Et al. Documento I. Informe técnico de los resultados del Proyecto. ebridge: Predicción remota de fallas en puentes. VIE-Tec. 2013.
- Carvajal, Johan. Pruebas Carga. Proyecto de investigación ebridge. Protocolo. Puente sobre el Río Purires. Tec. 2012
- Nieto, A., Fernández, A., Hernández, A., & Gurría, J. (2010). DISEÑO DE UN GEOPORTAL Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, Comisión permanente de estudio y revisión del código sísmico. Lineamientos para el diseño sismoresistente de puentes. 2013

Secretaria de Integración Centroamericana (SIECA). Consejo de Ministros de Transporte de Centroamérica. Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas para la infraestructura vial en Centroamérica. 2016.

Engineers Canada. PIEVC Engineering Protocol For Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate PRINCIPLES and GUIDELINES. 2016

C. R. . Farrar y K. . Worden, Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. 2013. pp 60-63

Husdal, Jan. The vulnerability of road networks. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC, 2005

12. Apéndices

Apéndice 12-1. Documento de análisis de requerimientos para el establecimiento de un sistema de monitoreo de puentes

Apéndice 12-2. Protocolo para instrumentación de puentes

Apéndice 12-3. Metodología de evaluación de puentes

Apéndice 12-4. Especificación técnica de indicadores para evaluación de puentes

Apéndice 12-5. Documentación de Prototipo de Inteligencia de Negocios