

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 17 DE NOVIEMBRE DE 2023 **HORA:** 04:00 p.m.

LUGAR: LABORATORIO DE ESTRUCTURAS – UFPS

PLAN DE ESTUDIOS: ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS ✓

TÍTULO DE LA TESIS: “ELABORACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL EN PUENTES COLGANTES DE USO PEATONAL”.

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

JURADOS: ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ PEÑARANDA
ING. JOSÉ DANIEL PALACIOS PABÓN
ING. NESTOR ORLANDO ROJAS RIBÓN

DIRECTOR: INGENIERO NESTOR ORLANDO ROJAS RIBÓN.

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO:	CALIFICACIÓN:
		NÚMERO: LETRA:
WILMER YESITH CACERES PARADA	1010136	4.1 CUATRO, UNO

APROBADA



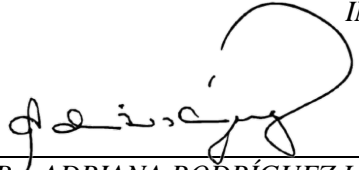
ING. JORGE FERNANDO MÁRQUEZ
PEÑARANDA



ING. JOSÉ DANIEL PALACIOS PABÓN




ING. NESTOR ORLANDO ROJAS RIBÓN



Vo. Bg. ADRIANA RODRÍGUEZ LIZCANO
Directora Plan de Estudio Especialización en Estructuras

Elaborador por: Adriana R.

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15	
			VERSIÓN	02	
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN			FECHA	03/04/2017
				PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ		APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad		Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): ZURISADAY APELLIDOS: PRADILLA ATUESTA

NOMBRE(S): WILMER YESITH APELLIDOS: CÁCERES PARADA

NOMBRE(S): _____ APELLIDOS: _____

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

DIRECTOR:

NOMBRE(S): NESTOR ORLANDO APELLIDOS: ROJAS RIBÓN

NOMBRE(S): _____ APELLIDOS: _____

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): ELABORACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL EN PUENTES COLGANTES DE USO PEATONAL

El proyecto consiste en la elaboración de una guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes en la región. El objetivo principal es identificar las patologías más comunes en este tipo de infraestructuras y proponer medidas preventivas y correctivas que permitan garantizar su adecuado funcionamiento y prolongar su vida útil. El proyecto se llevará a cabo en seis fases: la revisión bibliográfica, la identificación de los puentes a estudiar, la caracterización de las patologías estructurales, la evaluación de la vulnerabilidad, la elaboración de una guía metodológica y por último la difusión y socialización de la guía. Para lo cual se implementarán principalmente como métodos de recolección de información el análisis de datos e inspecciones visuales de algunos puentes correspondientes al municipio de Toledo, específicamente ubicados en las veredas “Tapata”, “San José del pedregal”, “La Carbonera”, “San Carlos”, “Alto El Oro”. La guía metodológica resultante será un recurso valioso para la formación académica en ingeniería civil y la gestión de la infraestructura vial a nivel municipal.

PALABRAS CLAVES: Vulnerabilidad, Patologías, Puentes colgantes, Guía metodológica, Zona rural.

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 79 PLANOS: ____ ILUSTRACIONES: ____ CD ROOM: ____

ELABORACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE
VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL EN PUENTES COLGANTES DE USO PEATONAL

ZURISADAY PRADILLA ATUESTA
WILMER YESITH CÁCERES PARADA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA
PLAN DE ESTUDIOS DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

ELABORACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE
VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL EN PUENTES COLGANTES DE USO PEATONAL

ZURISADAY PRADILLA ATUESTA

WILMER YESITH CÁCERES PARADA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Especialista en Estructuras

Director

NESTOR ORLANDO ROJAS RIBÓN

Especialista en Ingeniería Estructural

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2023

Acta de sustentación

Contenido

	pág.
Introducción	11
1. El Problema	13
1.1 Planteamiento del Problema	13
1.2 Formulación del Problema	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 Justificación	15
1.5 Alcance y Limitaciones	16
1.5.1 Alcance	16
1.5.2 Limitaciones	17
2. Marco Referencial	20
2.1 Antecedentes y Estado del Arte	20
2.2 Marco Teórico	26
2.2.1 Puentes colgantes	26
2.2.2 Factores que afectan estructura	28
2.2.3 Métodos de evaluación de la vulnerabilidad estructural	28
2.2.4 Patologías estructurales en pasarelas colgantes	30
2.2.4.1 Procesos mecánicos	30
2.2.4.2 Procesos físicos	33
2.2.4.3 Procesos químicos	34

2.2.5 Patologías debidas al proyecto	37
2.3 Marco Conceptual	39
2.4 Marco Legal	41
3. Metodología	43
3.1 Tipo de Investigación	43
3.2 Instrumentos para la Recolección de la Información	43
3.2.1 Instrumentación simple	43
3.2.2 Instrumentación avanzada	45
3.3 Fases y Actividades Específicas del Proyecto	49
3.3.1 Fase 1: revisión bibliográfica	49
3.3.2 Fase 2: identificación de puentes a estudiar	51
3.3.3 Fase 3: Caracterización de las patologías estructurales	58
3.3.4 Fase 4: evaluación de la vulnerabilidad estructural	62
3.3.4.1 Fase 1: identificación de puentes	64
3.3.4.2 Fase 2: recolección de información existente	64
3.3.4.3 Fase 3: programación de la inspección	65
3.3.4.4 Fase 4: inspección de vulnerabilidades	66
3.3.4.5 Fase 5: determinación de intervención	69
3.3.5 Fase 5: elaboración de la guía metodológica	70
3.3.6 Fase 6: difusión y socialización de la guía metodológica	71
3.3.6.1 Pasos y estrategias clave	72
4. Conclusiones	73
5. Recomendaciones	76

Referencias Bibliográficas

77

Anexos

80

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Elementos básicos en un puente colgante	28
Figura 2. Ejemplo de mapeo de fisuras	30
Figura 3. Grietas y fisuras debidas a asientos	32
Figura 4. Grietas y fisuras debidas a empujes	33
Figura 5. Grietas y fisuras debidas a acciones térmicas	33
Figura 6. Ejemplo de patologías físicas	34
Figura 7. Ejemplo de corrosión en elementos metálicos	35
Figura 8. Ejemplo de corrosión en elementos metálicos	36
Figura 9. Ejemplo de erosión biológica	37
Figura 10. Ejemplo de patologías debidas al proyecto	38
Figura 11. Diagrama de flujo de una inspección principal	50
Figura 12. Diagrama de flujo para la inspección de vulnerabilidades	63
Figura 13. Esquema de inspección inferior	66
Figura 14. Esquema de inspección superior	67
Figura 15. Resultado del documento "guía de evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes en zonas rurales"	71

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Formato 1. Identificación del puente 01	51
Tabla 2. Formato 2. Identificación del puente 02	52
Tabla 3. Formato 3. Identificación del puente 03	53
Tabla 4. Formato 4. Identificación del puente 0	55
Tabla 5. Formato 5. Identificación del puente 0	56
Tabla 6. Resumen de patologías típicas en estructuras de pasarelas colgantes	59
Tabla 7. Formato de identificación de puentes	64
Tabla 8. Matriz de identificación de daños	67
Tabla 9. Matriz niveles de daños	68

Lista de Anexos

	pág.
Anexo 1. Guía de evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes en zonas rurales	81
Anexo 2. Registro de información de inspección	82

Introducción

Los puentes colgantes son una de las estructuras más utilizadas en la construcción de carreteras, pasarelas y otros tipos de infraestructuras a lo largo del mundo. Sin embargo, como cualquier estructura, estos puentes están sujetos a una variedad de factores que pueden comprometer su seguridad y estabilidad a lo largo del tiempo. En particular, los puentes colgantes son susceptibles a la vibración y los movimientos debido a cargas dinámicas, lo que puede conducir a daños y fallas estructurales.

La evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes es, por lo tanto, una tarea crítica para garantizar la seguridad de estas infraestructuras y prevenir accidentes. En este sentido, esta investigación se propone desarrollar una guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, con el fin de proporcionar una herramienta útil y práctica para ingenieros, arquitectos y otros profesionales involucrados en la construcción y mantenimiento de estas estructuras.

En particular, esta guía metodológica se enfocará en la identificación de los principales factores que contribuyen a la vulnerabilidad estructural de los puentes colgantes, como la resistencia de los materiales, la carga dinámica y la exposición a eventos naturales extremos. Además, se propondrán técnicas y métodos de evaluación para cada uno de estos factores, con el objetivo de permitir una evaluación integral de la vulnerabilidad estructural de un puente colgante dado.

Esta guía metodológica también se enfocará en su aplicación académica en instituciones de educación superior y en secretarías de planeación municipal, con el fin de proporcionar una herramienta útil y práctica para la formación y capacitación de estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería civil y arquitectura.

En resumen, esta investigación tiene como objetivo proporcionar una guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, con el fin de mejorar la seguridad de estas infraestructuras y proporcionar una herramienta útil para estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería civil y arquitectura.

1. El Problema

1.1 Planteamiento del Problema

El mantenimiento adecuado de las infraestructuras de transporte, particularmente los puentes colgantes, es fundamental para garantizar la seguridad de las comunidades rurales que dependen de estos elementos para acceder a servicios esenciales y actividades económicas. Sin embargo, en muchas zonas rurales, estos puentes a menudo carecen de la atención y los recursos necesarios para mantener su integridad estructural de manera efectiva. Esta falta de mantenimiento adecuado puede llevar a la degradación gradual de la infraestructura y, en última instancia, a la pérdida de vidas humanas y propiedades en caso de colapsos.

Los puentes colgantes son, en Colombia, una de las estructuras más comunes en la construcción de infraestructuras viales y peatonales. Sin embargo, estos puentes están expuestos a una serie de factores que pueden comprometer su seguridad y estabilidad estructural. En particular, los puentes colgantes son susceptibles a la vibración y los movimientos debido a cargas dinámicas, lo que puede conducir a daños y fallas estructurales.

A pesar de la importancia crítica de la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, aún no existe una guía metodológica clara y completa para evaluar y prevenir estos riesgos. Como resultado, los profesionales que trabajan en la construcción y mantenimiento de estos puentes se enfrentan a desafíos importantes para garantizar la seguridad y estabilidad de estas estructuras.

Además, la formación académica en el campo de la ingeniería civil y arquitectura no siempre incluye una capacitación adecuada en la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes. Esto significa que muchos profesionales pueden carecer de las habilidades necesarias para identificar y prevenir los riesgos asociados con estas estructuras.

Por lo tanto, en la actualidad se requiere una guía metodológica clara y completa para evaluar la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes. Esta guía debe proporcionar una herramienta útil y práctica para ingenieros, arquitectos y otros profesionales involucrados en la construcción y mantenimiento de puentes colgantes, así como para estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería civil y arquitectura. El desarrollo de esta guía puede ayudar a mejorar la seguridad y estabilidad de los puentes colgantes y prevenir accidentes y fallas estructurales.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo identificar, prevenir y advertir los riesgos asociados a estructuras de puentes colgantes a través de la elaboración una guía metodológica efectiva que sea una herramienta útil y práctica para ingenieros, arquitectos, estudiantes, docentes y otros profesionales involucrados en la construcción y mantenimiento de puentes colgantes?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general. Elaborar una guía metodológica para la evaluación y análisis de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, que cumpla con los criterios técnicos y científicos vigentes dentro de la normativa colombiana y permita la identificación y prevención de los riesgos asociados a estas estructuras.

1.3.2 Objetivos específicos. Realizar una revisión exhaustiva de la normativa vigente, investigaciones previas y guías metodológicas relacionadas con la evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes peatonales, a fin de identificar los enfoques y mejores prácticas existentes.

Determinar los parámetros críticos que deben ser considerados al evaluar la vulnerabilidad estructural de los puentes colgantes peatonales, tales como el estado de la infraestructura, la carga máxima admisible, la resistencia sísmica y otros factores relevantes.

Establecer una metodología clara y precisa para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad estructural de los puentes colgantes peatonales. Esto debe incluir los procedimientos de inspección, pruebas y análisis estructurales necesarios para identificar posibles problemas y debilidades.

Definir umbrales de tolerancia para diferentes tipos de daños o defectos estructurales, y establecer niveles de riesgo basados en la capacidad estructural y la seguridad de los usuarios.

Proporcionar recomendaciones específicas y prácticas para abordar las deficiencias y debilidades identificadas en los puentes colgantes peatonales. Estas recomendaciones deben tener en cuenta factores como la viabilidad técnica, la seguridad de los usuarios y la sostenibilidad económica.

Realizar pruebas piloto de la guía metodológica desarrollada en puentes colgantes peatonales reales, con el objetivo de verificar su efectividad, identificar posibles mejoras y asegurar su aplicabilidad en diferentes contextos.

1.4 Justificación

La construcción de puentes colgantes es un proceso complejo que requiere un alto nivel de conocimiento técnico y habilidades especializadas en ingeniería civil y arquitectura. Sin embargo, incluso las estructuras más sólidas y bien diseñadas pueden ser vulnerables a factores como la carga dinámica, la exposición a eventos naturales extremos y la fatiga por uso prolongado. La evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes es esencial para garantizar su seguridad y prevenir accidentes graves.

A pesar de esto existen pocas guías que permitan el propósito de analizar las vulnerabilidades que se puedan presentar en estas estructuras, además la mayoría de los métodos utilizados en la práctica son subjetivos, incompletos o basados en la experiencia adquirida en

proyectos anteriores. Esto puede llevar a errores de evaluación y a una falta de comprensión de las debilidades estructurales de un puente colgante. Además, las guías metodológicas disponibles suelen estar dirigidas a un público muy técnico y no son fáciles de entender para personas sin conocimientos especializados en ingeniería civil y arquitectura.

Es por esto que el desarrollo de una guía completa, efectiva y accesible no sólo ayudará a garantizar la seguridad de los puentes colgantes, sino que también mejorará la formación y capacitación de los estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería civil y arquitectura. Además, la implementación de esta guía metodológica en instituciones de educación superior y secretarías de planeación municipal mejorará la calidad de los proyectos de construcción y mantenimiento de puentes colgantes y ayudará a prevenir futuros accidentes. En resumen, este proyecto de tesis tiene el potencial de contribuir significativamente a la seguridad y calidad de las estructuras de puentes colgantes, así como a la formación y capacitación de los estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería civil y arquitectura.

1.5 Alcance y Limitaciones

1.5.1 Alcance. El alcance de este proyecto de tesis incluye la elaboración de una guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, así como su socialización en dos importantes instituciones de educación superior de la región, como lo son la Universidad de Pamplona y la universidad Francisco de Paula Santander. Asimismo, se entregará la guía en diversas alcaldías de la región, donde se puede hallar una significativa cantidad de puentes colgantes. La guía metodológica tendrá como objetivo principal proporcionar una herramienta práctica y completa para la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, y será desarrollada con un lenguaje claro y accesible, para que sea comprensible por personas sin conocimientos técnicos especializados. De esta manera, se

espera que esta guía pueda ser utilizada tanto por profesionales como por estudiantes en el campo de la ingeniería civil y arquitectura, y pueda mejorar la calidad de los proyectos de construcción y mantenimiento de puentes colgantes en la región, contribuyendo así a la seguridad y bienestar de las comunidades locales.

1.5.2 Limitaciones. Es importante tener en cuenta que este proyecto de tesis presenta algunas limitaciones que pueden afectar su alcance y efectividad. En primer lugar, la guía metodológica que se desarrollará se enfocará exclusivamente en la evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, lo que implica que no se abordarán otros aspectos importantes relacionados con su diseño, construcción y mantenimiento. Además, el alcance de este proyecto se limitará las alcaldías de la región y sus alrededores, por lo que se recomienda precaución en su aplicación en otros contextos diferentes. Aunque se buscará que la guía metodológica sea clara y accesible, siempre habrá cierto nivel de complejidad y técnica en los procesos de evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, por lo que se requiere que los usuarios tengan cierto nivel de conocimiento en el campo de la ingeniería civil y arquitectura.

Por último, es importante mencionar que el tiempo y los recursos disponibles para la elaboración de la guía metodológica son limitados, lo que puede afectar la profundidad y detalle de algunos aspectos importantes en su desarrollo, esto viéndose reflejado principalmente en la realización de pruebas y ensayos prácticos que permiten identificar características avanzadas de las obras. Algunas de las limitaciones clave a considerar son las siguientes:

- **Disponibilidad de datos:** La recopilación de datos confiables y completos sobre puentes colgantes en zonas rurales puede ser un desafío. La limitada documentación y registros precisos en áreas remotas pueden afectar la calidad de los datos utilizados para la evaluación de

la vulnerabilidad. Las limitaciones en la disponibilidad de datos pueden influir en la precisión de los resultados y las conclusiones de la tesis.

- Acceso a sitios remotos: La inspección in situ de los puentes colgantes rurales puede ser complicada debido a su ubicación geográfica a menudo remota y de difícil acceso. Esto puede limitar la capacidad de realizar inspecciones exhaustivas y recopilar datos directos, lo que puede afectar la calidad de la evaluación de la vulnerabilidad.

- Recursos financieros y técnicos limitados: Las zonas rurales suelen carecer de los recursos financieros y técnicos necesarios para llevar a cabo evaluaciones de ingeniería exhaustivas y trabajos de mantenimiento adecuados. Esta limitación puede influir en la capacidad de implementar las recomendaciones resultantes de la guía de evaluación.

- Diversidad de condiciones: Las zonas rurales pueden abarcar una amplia variedad de condiciones geográficas y climáticas, lo que hace que sea difícil desarrollar una guía única que se aplique de manera adecuada a todas las situaciones. La tesis puede verse limitada en su capacidad para abordar todas las condiciones posibles de manera exhaustiva.

- Evolución de normativas y tecnologías: Las normativas de ingeniería y las tecnologías relacionadas con la evaluación de puentes pueden evolucionar con el tiempo. Esto puede hacer que la guía desarrollada en la tesis se vuelva obsoleta en el futuro, lo que requerirá actualizaciones y adaptaciones continuas.

- Limitaciones de tiempo y recursos del investigador: La realización de una investigación exhaustiva en esta área puede requerir un tiempo y recursos considerables. Las limitaciones de tiempo y financiamiento del investigador pueden influir en el alcance y la profundidad de la tesis.

- Participación de las comunidades locales: La implementación efectiva de las recomendaciones de la guía puede depender en gran medida de la participación y cooperación de las comunidades locales. La falta de involucramiento de las comunidades podría limitar la efectividad de las soluciones propuestas.

A pesar de estas posibles limitaciones, la tesis se esforzará por abordar estos desafíos de manera adecuada y transparente, y buscará mitigar su impacto en la calidad y la validez de los resultados y conclusiones.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes y Estado del Arte

Los puentes colgantes son una de las estructuras más utilizadas en la construcción de carreteras, pasarelas y otros tipos de infraestructuras a lo largo del mundo, ejemplo de ello lo son: Puente de Zwenberg en Karnten en Austria, caracterizándose por ser unos de los tramos de vía más difícil (Schmidt, 1972), Puente sobre el río Severn, Inglaterra, como una solución a los problemas de tráfico (Smith, 1970); Puente río Colorado, Costa Rica, el cual fue diseñado basado en los principios del puente colgante, pero apoyando el camino de rodadura en los cables (Gómez, 1973); Puente colgante sobre el Lillebaelt en Dinamarca, primer puente danés de este tipo (Jonson, 1971); Puente sobre el Tigris, en Bagdad, primero de su tipo en Irak.

En Colombia este tipo de estructura también son ampliamente utilizados, destacándose que en la región sur occidente del país -entre 1865 y 1895-, se construyeron alrededor de 40 (Galindo, 2010), a la fecha contamos con algunos puentes colgantes ampliamente conocidos como lo son Puente Colgante de Occidente en Antioquia, Puente Bicentenario, Puente Colgante Don Nicolas y Puente de Guayaquil en Medellín.

Aunque los puentes colgantes poseen ventajas como su capacidad de extensión, bajos costos de construcción, versatilidad y fácil mantenimiento, también cuenta con algunos aspectos desfavorables entre las que encontramos vulnerabilidad al viento y sismos, capacidad de carga.

Como lo mencionamos los puentes soportados en cables son sensibles al viento, por tanto se hace necesario estudiar los efectos del viento en este tipo de estructura, como son el desprendimiento de torbellinos (vortex shedding), flameo (flutter) o el bataneo (buffeting), generalmente los estudios se realizan mediante ensayos de túneles de viento, pero actualmente

gracias a los desarrollos en el área de predicciones computacionales es posible realizar predicciones que tiene un alto grado de precisión (Nieto, 2013).

Así mismo son realizadas pruebas de carga, las cuales se dividen en pruebas de carga estáticas y dinámicas, para las cuales se desarrollan diseños experimentales en los que se evalúan diversas condiciones (Domínguez et al., 2017).

De otro lado en varios países se han realizado diversos estudios con el objetivo de estandarizar la evaluación de puentes, como se menciona a continuación:

Colombia:

- Guía para la Rehabilitación de Puentes con Estructura de Acero. Ofrece referencias metodológicas para la inspección de es puentes de acero existentes en Colombia, destacando que las metodologías propuestas fueron en base a los procedimientos utilizados por entidades nacionales e internacional (Martín, 2021).
- El Manual para la inspección visual de puentes y pontones. Presenta recomendaciones para que un ingeniero civil calificado, lleve a cabo la inspección visual y el inventario de los daños que afecten los elementos intervenidos en un puente o pontón, en virtud de un contrato celebrado con el Instituto Nacional de Vías, El manual contiene información sobre cómo realizar inspecciones visuales en puentes y pontones, así como los procedimientos a seguir para reportar cualquier anomalía. (Grupo Técnico – Convenio 587 de 2003, OCTUBRE DE 2006). Además, el INVIAS a publicado en su página oficial el instructivo para diligenciamiento de la ficha técnica de información del Sistema de Información para la administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL), ficha que permite identificar los principales criterios para la inspección de este tipo de estructuras. La implementación exitosa del manual, dentro de la red nacional subraya su eficacia

como herramienta integral para la evaluación y documentación de la condición estructural de puentes en todo el país. Además, esta aplicación respalda la importancia continua de contar con guías técnicas sólidas que faciliten la gestión efectiva y el mantenimiento preventivo de la infraestructura vial.

España:

- Norma ADIF Plataforma, Inspección principal de puentes de ferrocarril. Definen las metodologías para la toma de datos en la realización de inspecciones, que tienen como objetivo verificar la funcionalidad, resistencia y seguridad de un puente colgante (ADIF, 2015).
- Inspección Principal de Puentes de Ferrocarril. Instrucción Técnica ADIF-IT-301-001-VIA-31. Definen responsabilidades y fases de trabajo en las inspecciones de puentes de ferrocarril en la Red Ferroviaria de Interés General de España (ADIF, 2015).
- Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado. Centraliza información sobre metodologías para la inspección de puentes discriminando la información por nivel de intensidad. Convirtiéndose en una herramienta útil para los inspectores (Geocisa e Ines Ingenieros, 2012).

Costa Rica:

- Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante Inspección Visual. Diseñó una metodología que permite evaluar la vulnerabilidad sísmica, importancia estratégica del puente, antigüedad, impacto hidráulico -hidrológico, entre otros, teniendo en cuenta los procedimientos realizados en 12 países diferentes (Muñoz et al., 2015).

Perú:

- Directiva No. 01-2006-MT/14. Guía para inspección de puentes. En ella se ofrecen pautas para realizar la inspección apropiada de puentes (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2006).

- Guía de Diseño de puentes atirantados con sección compuesta. Presenta una metodología para el análisis y diseño de puentes atirantados con tablero de sección compuesta. (Acevedo, 2021).

Venezuela:

- Guía de inspección para la evaluación de la integridad estructural de puentes de estructura metálica, tipo: “Puentes de celosía de acero”. Estandariza técnicas y procedimientos para la inspección de puentes de celosía de acero, teniendo en cuenta las metodologías nacionales e internacionales (Ramirez, 2016).

Centro América:

- Manual centroamericano de gestión del riesgo en puentes, edición 2010. Esta guía estandariza la normativa sobre conservación de la infraestructura vial en Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, en todo lo referente a gestión del riesgo, seguridad vial, mantenimiento, entre otras (SIECA, 2010).

Así mismo, a lo largo del tiempo se han realizado diversos casos estudios que permiten denotar la importancia de los análisis de evaluación el estado de los puentes colgante con el objetivo de mantener y garantizar la seguridad de todos aquellos que hagan uso de estos, a continuación, se destaca algunos de ellos.

Colombia:

- Estudio de Investigación del estado actual de las Obras de la Red Nacional de Carreteras. Este estudio fue realizado por la Universidad Nacional de Colombia y el Ministerio

de Transporte Instituto Nacional de Vías, en el cual se incluyó información sobre generalidades de la inspección, captura de información, síntesis de daños en puentes de concreto y en estructuras metálicas. El estudio fue realizado en Antioquia, Atlántico, Bolívar, Boyacá, Caldas, Caquetá, Casanare, Cauca, Cesar, Choco, Córdoba, Cundinamarca, Guajira, Huila, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Quindío, Risaralda, Santander, Sucre, Tolima, Valle y Ocaña (Instituto Nacional de Vias, 2006).

- Caso estudio: Puente Colgante con Estructura de Acero. El puente se construyó entre 1955 y 1958, el cual soporta la estructura mediante cables de acero en forma de arco, y los mecanismos de fijación fue mediante tirantes. El estudio incluía la descripción preliminar del puente, comportamiento teórico del puente, materiales, perfiles estructurales y placas, resultados de estudios realizados, reparaciones realiza (Indicando procedimientos). Entre los ensayos que se realizaron de Composición química, Resistencia a la Tensión, Estudio geofísico y batimétrico de las subestructura, Evaluación de la Cimentación del Puente. Como resultados generales encontraron falla de Montante, Corrosión en Diagonal, Corrosión en Cordón Inferior, Corrosión en Presillas, Alumbrado Público en Contacto con el Cable Principal, Corte de Perno y Ausencia de Tuerca, Corrosión Del Tablestacado, Corrosión y Residuos Sólidos en Articulación, Corrosión de Articulación, y adicionalmente se encontraron 5 afectaciones leves (Martin, 2021).

Costa Rica:

- Diseño del Puente Colgante Proyecto Geotérmico Las Pailas. Este puente fue construido con el objetivo de producir 35 MW de energía, en el documento describían todo lo referente al diseño de las tuberías de reinyección del agua remanente de la planta después de generar electricidad al manto acuífero. El documento describía las cargas aplicadas, elementos

del puente, factores de seguridad en cables, resultados y análisis de resultados. De manera general en los resultados indicaban características que debía tener cada uno de los elementos del puente colgante (Calderón, 2010).

México:

- Estudio Experimental de un puente atirantado-Evaluación de Cables. Trabajo realizado por la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Dicho trabajo a bordo de manera general modelos teóricos para el análisis de cables, características del puente atirantado, Estudio Experimental de vibraciones y Conclusiones. De manera general indican que el modelo lineal aplicado se puede utilizar para evaluar la tensión de tirantes, que la evaluación de la tensión por vibraciones es eficiente (Carrión et al., 2005).

Cuba:

- Propuesta de rehabilitación y cambio de uso del Puente colgante sobre el río San Agustín. La investigación fue realizada bajo la metodología de inspección visual y estudio de caso, así como también a través de modelación estructural. En la inspección los autores encontraron deterioro en los cimientos, corrosión del Nudo del Pórtico Principal, Grietas en Estribos, Perdidas de secciones de tirantes, cables y mordaza, corrosión de Vigas de la sección transversal y Pórtico principal. Posteriormente presentan la propuesta de intervención en cimientos, torres, estribos, tensores, vigas, cables y mordazas (Gamez, et al., s.f.).

Ecuador:

- Modelo de aeroelasticidad comparando un puente tipo colgante versus tipo arco, caso río Arajuno y su incidencia en el comportamiento estructural. La investigación fue de tipo no experimental y la metodología desarrollada fue la siguiente: levantamiento de datos,

propuesta de puente colgante y tipo arco, análisis de las fuerzas aeroelásticas mediante los métodos: AASHTO LRFD, coeficientes de arrastre y sustentación, y cargas estáticamente equivalentes, así mismo, mencionan el desarrollo de simulaciones con el Software CSI Bridges. Como resultados obtuvieron que los puentes tipo arco tiene menor probabilidad de colapso (Poveda, 2022).

El Salvador:

- Evaluación estructural de un puente mediante la realización de una prueba de carga estática. Inicialmente indican los criterios de selección del puente a ser estudiado, en este sentido seleccionaron “Apertura conexiones Nejapa – Apopa – Troncal del Norte, Tramo 1”, posteriormente indican una descripción estructural, características de los materiales, inspección preliminar de campo, evaluación preliminar (modelación), planificación, preparación y ejecución del ensayo de carga (Diagnostico, efectos de carga medidos, equipo utilizado, personal, aplicación de carga, plan de seguridad de la prueba, seguridad y control de tráfico, pesaje, materialización de la carga), evaluación de los resultados, y resultados. Al finalizar el documento concluyen sobre la aplicación de las metodologías usadas, manuales a usar, coherencia de la modelación con la práctica, entre otros (Cardoza & Villalobos, 2005).

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Puentes colgantes. Un puente colgante es una estructura de ingeniería civil que se compone de varios elementos fundamentales. El elemento principal es el tablero o plataforma del puente, que se encuentra suspendido de dos o más cables principales que se extienden desde las torres o pilares ubicados en cada extremo del puente. Los cables principales están sujetos a las torres mediante anclajes que garantizan su estabilidad y resistencia ante las cargas que soportan.

Además de los cables principales, los puentes colgantes también cuentan con otros elementos importantes como los cables de suspensión, que se extienden desde los cables principales hasta el tablero del puente y sirven para sostenerlo y transmitir las cargas. Los cables de suspensión están unidos a las cadenas o tirantes que se extienden desde el tablero del puente hasta los anclajes ubicados en las torres.

Los pilares o torres son otro elemento fundamental de los puentes colgantes, ya que son los encargados de soportar el peso de los cables principales y mantenerlos en posición vertical. Los pilares se construyen sobre cimientos sólidos y deben ser capaces de soportar grandes cargas y vientos fuertes.

Así mismo, los puentes colgantes también cuentan con otros elementos que contribuyen a su estabilidad y seguridad, como los estribos o apoyos ubicados en cada extremo del puente para evitar su movimiento lateral, los cables de contraviento que se extienden desde el tablero del puente hacia los pilares para evitar su oscilación y los dispositivos de anclaje que se utilizan para sujetar los cables a los anclajes ubicados en las torres.

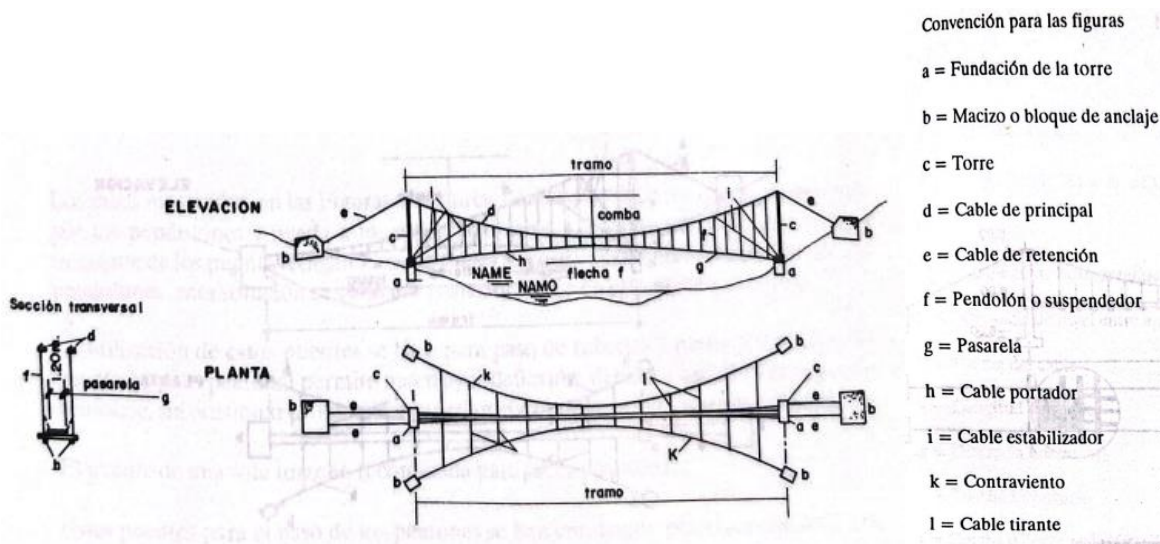


Figura 1. Elementos básicos en un puente colgante

Fuente: Calderón, 2010.

2.2.2 Factores que afectan estructura. Las patologías en puentes colgantes son un tema crítico en el mantenimiento y la seguridad estructural de estas infraestructuras. Según algunos autores, las patologías pueden ser definidas como cualquier alteración en la estructura que afecte su funcionamiento y durabilidad (Málaga, 2020). Algunas de las patologías más comunes en puentes colgantes son la corrosión, el desgaste, la fatiga, el pandeo y la deformación (Duan, 2019).

La corrosión es una de las principales patologías en puentes colgantes, que puede ser causada por diversos factores como la exposición a la intemperie, el contacto con agentes químicos, la acción del agua y la humedad (Cai, 2020). El desgaste es otra patología que puede ser causada por el tráfico vehicular, la acción del viento y el movimiento natural de la estructura (Li, 2019).

La fatiga es una patología que puede ser causada por la sobrecarga en la estructura, la cual puede generar la aparición de grietas y fisuras en los materiales (Feng, 2017). El pandeo y la deformación también son patologías que pueden afectar la seguridad estructural de los puentes colgantes, ya que pueden provocar la pérdida de estabilidad y resistencia en la estructura (Wang, 2018).

2.2.3 Métodos de evaluación de la vulnerabilidad estructural. Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad estructural en puentes colgantes son una herramienta importante para garantizar su seguridad y prevenir accidentes. Existen diversas técnicas y métodos disponibles para identificar y cuantificar la vulnerabilidad estructural de estas estructuras.

Una de las técnicas más utilizadas es la evaluación basada en la condición, la cual implica una inspección visual detallada de la estructura para identificar defectos, daños y desgaste en los componentes del puente. También se puede realizar una evaluación basada en la carga, que implica la realización de pruebas de carga para determinar la capacidad de carga actual de la estructura y compararla con la capacidad de carga original.

La inspección visual es una técnica relativamente económica y de fácil aplicación, lo que la hace una técnica muy popular en la evaluación de la vulnerabilidad estructural de los puentes colgantes. Sin embargo, también tiene algunas limitaciones. La inspección visual puede no detectar daños internos o sub-superficiales, lo que puede ser crítico para la evaluación de la integridad estructural de la estructura. Además, esta técnica no siempre es adecuada para evaluar la resistencia de materiales, la capacidad de carga y la respuesta dinámica del puente.

Por lo tanto, la inspección visual se utiliza generalmente en combinación con otras técnicas, tales como la evaluación de la resistencia de materiales, la modelización computacional y la instrumentación estructural, para proporcionar una evaluación más completa y precisa de la vulnerabilidad estructural de los puentes colgantes.

Del mismo modo, se utilizan técnicas de evaluación no destructivas, como la radiografía y la ultrasonografía, para detectar defectos ocultos en los materiales y elementos de la estructura. Estas técnicas son útiles para identificar la presencia de grietas, corrosión y otros daños que pueden comprometer la integridad estructural del puente.

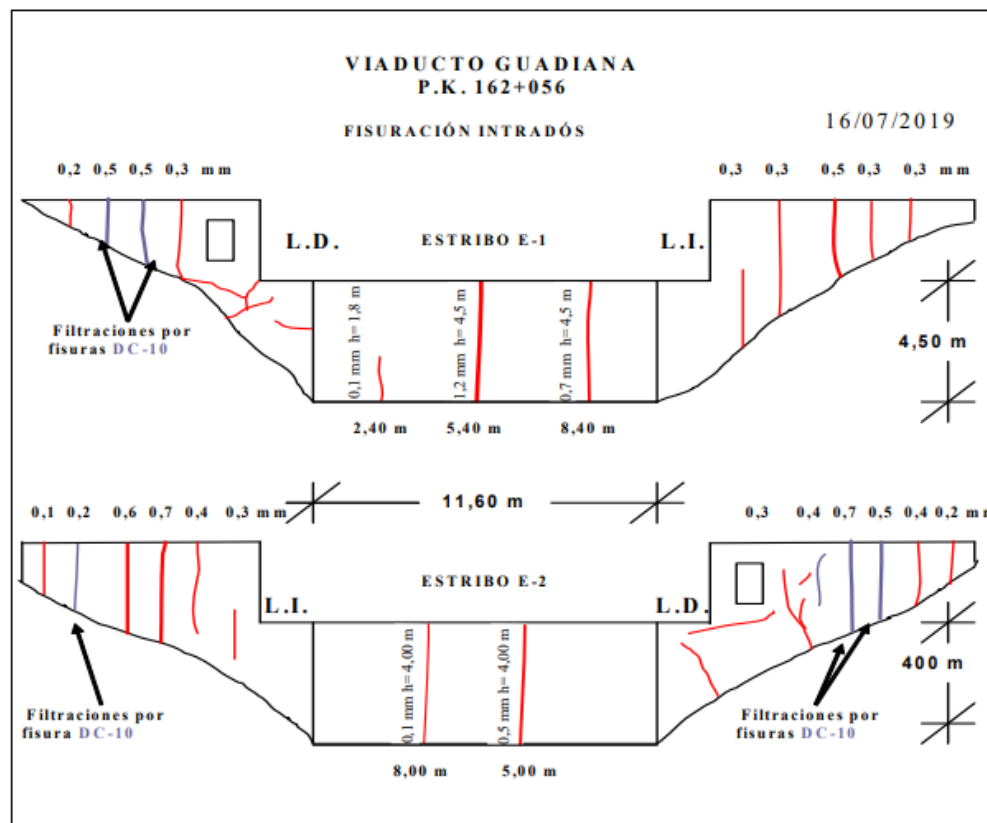


Figura 2. Ejemplo de mapeo de fisuras

Fuente: ADIF, 2015.

2.2.4 Patologías estructurales en pasarelas colgantes. Las patologías estructurales en general pueden ser categorizadas en tres principales grupos: mecánicas, físicas y químicas. Las cuales se basan en su “naturaleza”, el tipo de acción que las provoca y en cómo evolucionan con el tiempo.

2.2.4.1 Procesos mecánicos. Este tipo de patologías emerge como resultado de la función de soporte desempeñada por los componentes estructurales y a menudo comprometen la integridad del sistema en su totalidad. Podemos identificar dos categorías de daños, como sigue a continuación:

Deformaciones. Estas son los cambios en la forma, geometría o configuración original de los elementos que componen una estructura y tener su origen en dos causas principales. En

primer lugar, existe una causa indirecta relacionada con la insuficiente capacidad debido a errores en el diseño o la ejecución de la construcción. En segundo lugar, está la causa directa, que se deriva de sobrecargas resultantes de cambios en el uso o de incrementos dimensionales causados por variaciones en la temperatura o humedad.

En todo caso estas deformaciones pueden afectar a otros elementos ligados a aquel que sufre la patología y se pueden distinguir algunos tipos:

- Deformaciones en las cimentaciones debido a asentamientos ocasionados por deficiencias en el terreno, diseño insuficiente o incremento de la carga. Estos pueden provocar efectos patológicos como deformaciones y grietas en las estructuras aéreas.
- Desplomes de muros y pilares, atribuibles a asentamientos previos, dimensionamiento inadecuado o incremento de las cargas aplicadas, como por ejemplo los empujes.
- Curvaturas en muros, pilares y vigas debido a las mismas razones mencionadas anteriormente.
- Pandeo de muros y pilares a causa de dimensionamiento insuficiente o sobrecarga.
- Hundimientos en arcos, bóvedas y cáscaras como resultado de asentamientos, desplomes, falta de dimensionamiento o aumento de las cargas.
- Deflexiones en vigas, forjados y losas debido a un dimensionamiento inadecuado o un incremento en las cargas aplicadas.

Roturas. Estas irregularidades se manifiestan en superficies externas y en su mayoría están vinculadas a las deformaciones experimentadas por la estructura, ya que tienden a generar

tensiones que desencadenan la fractura de los componentes. Las roturas también son posibles de clasificar en dos grandes grupos:

- Fisuras: Este tipo de roturas se caracteriza por ser discontinuidades lineales que aparecen en los elementos constructivos y pueden ser señales de posibles problemas en la integridad de la estructura.
- Grietas: Estas afectan a todo el espesor del elemento estructural, en caso de materiales como el hormigón puede que no lleguen a atravesar por completo al elemento esto debido a la inclusión de las armaduras que hacen que estos adquieran propiedades de heterogeneidad; esas aberturas suelen ser perpendiculares al esfuerzo que se provoca.

A continuación, se muestra una representación aproximada de cómo se muestran este tipo de roturas, clasificadas según el tipo de elemento y según la posible causa.

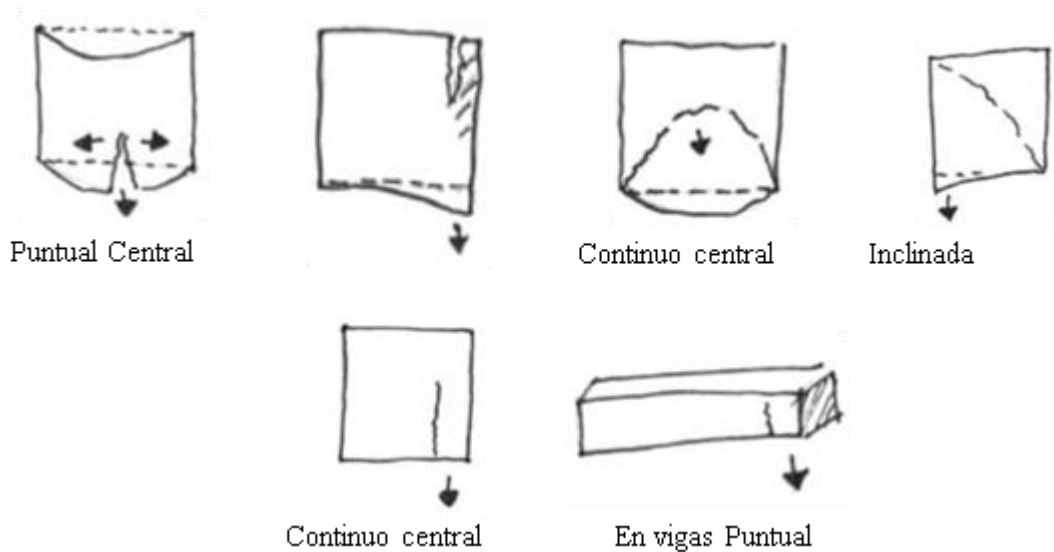


Figura 3. Grietas y fisuras debidas a asientos

Fuente: Elaboración propia basada en Carrió & Ramos, 2001.

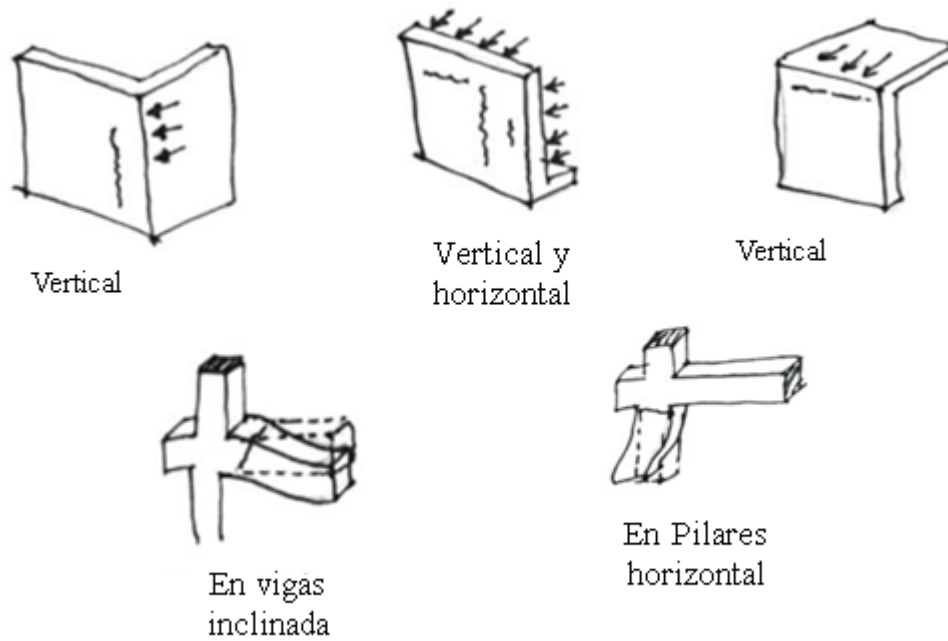


Figura 4. Grietas y fisuras debidas a empujes

Fuente: Elaboración propia basada en Carrió & Ramos, 2001.

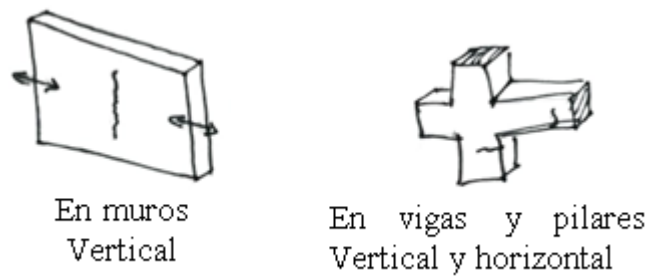


Figura 5. Grietas y fisuras debidas a acciones térmicas

Fuente: Elaboración propia basada en Carrió & Ramos, 2001.

2.2.4.2 Procesos físicos. Las patologías estructurales originadas por procesos físicos en pasarelas colgantes surgen debido a la interacción constante entre la estructura y su entorno, así como a cargas y condiciones ambientales. Estos factores incluyen la exposición a elementos climáticos como la humedad y los cambios de temperatura, lo que puede causar corrosión y erosión en los materiales; algunas patologías más comunes son:

Ciclos térmicos. Las expansiones y contracciones repetidas debido a cambios de temperatura pueden provocar tensiones internas en los materiales, lo que a su vez puede dar lugar a la formación de fisuras y grietas.

Exposición a la intemperie. La constante exposición a factores climáticos como la humedad, la lluvia, el viento y los cambios de temperatura puede causar desgaste y deterioro en los materiales, especialmente en aquellos expuestos directamente.



Figura 6. Ejemplo de patologías físicas

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4.3 Procesos químicos. Surgen comúnmente como resultado de la interacción entre agentes contaminantes químicos presentes en la atmósfera, que se combinan con factores meteorológicos, amplificando los efectos de ataque químico adicional; También se deben considerar los efectos provocados por algunos organismos que atacan a las estructuras, principalmente a aquellas compuestas de madera.

A continuación, se muestra una breve clasificación de este tipo de patologías:

Corrosión. Elementos metálicos:

- Corrosión por oxidación previa: La conversión del óxido húmedo en hidróxido, actuando como cátodo en el contacto con el metal restante, inicia un proceso corrosivo. Esto ocurre siempre que el elemento carece de protección y está expuesto a la humedad, ya sea debido a la exposición directa al ambiente o a la condensación superficial.
- Corrosión por aireación diferencial: Se produce cuando no se cuenta con la protección adecuada contra la oxidación y se produce la persistencia de áreas húmedas próximas a zonas secas, como en los arranques de pilares, superficies exteriores e interiores, y uniones horizontales entre perfiles
- Corrosión por inmersión: Este fenómeno ocurre cuando una porción del elemento metálico permanece en un entorno saturado, como un suelo húmedo, sin contar con una protección contra la corrosión.



Figura 7. Ejemplo de corrosión en elementos metálicos

Fuente: Elaboración propia.

Elementos de hormigón:

Esta forma de corrosión tiene dos causas principales. Por un lado, puede ser causada por la infiltración de agua desde el exterior a través de fisuras, afectando principalmente a las armaduras más superficiales, como los estribos, pero potencialmente alcanzando todas las armaduras. La intensidad de este efecto depende de la humedad y agresividad del entorno. Por otro lado, también puede ser resultado de la acción química de cloruros u otros agentes presentes en el hormigón que rodea las armaduras, influenciada por el tipo de cemento y áridos utilizados, así como por la carbonatación del hormigón, que disminuye la protección al reducir la alcalinidad.

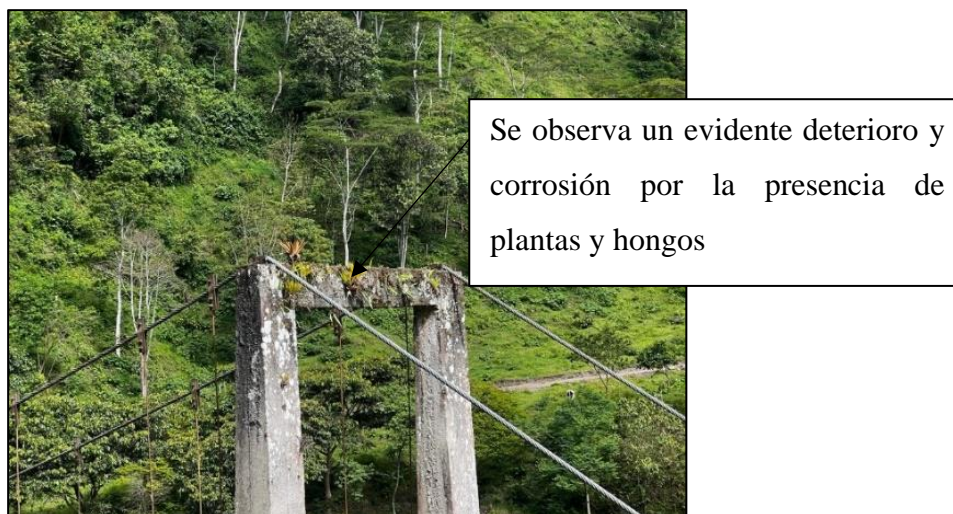


Figura 8. Ejemplo de corrosión en elementos de hormigón

Fuente: Elaboración propia.

Erosión química. Esta forma de deterioro surge de la interacción entre contaminantes atmosféricos y fenómenos meteorológicos, en especial la lluvia, que acelera su efecto. Afecta principalmente a las estructuras de ladrillo, manifestándose mayormente a través de

eflorescencias. En el caso del hormigón, el tipo de árido influye y, además, puede dar lugar a ataques corrosivos en las armaduras.

Erosión biológica. Principalmente se presenta en componentes de madera de las estructuras, aunque también se da en otros materiales como el hormigón, resultado de la actividad de insectos xilófagos y hongos que descomponen la madera, generando una pérdida variable de material y debilitando sus fibras resistentes. Esta degradación conjunta puede eventualmente llevar al colapso de la estructura.



En el siguiente vano se observa la presencia de hongos y moho adheridos a los elementos de madera.

Figura 9. Ejemplo de erosión biológica

Fuente: Elaboración propia.

2.2.5 Patologías debidas al proyecto. Además de considerar las patologías que surgen debido a factores externos y condiciones ambientales, es crucial tener en cuenta las posibles patologías resultantes de errores en el diseño y la planificación del proyecto. Estas patologías pueden derivar de decisiones inadecuadas en la elección de materiales, cálculos incorrectos de cargas y fuerzas, deficiencias en la geometría estructural o incluso falta de consideración de condiciones sísmicas y geotécnicas. Estos errores pueden dar lugar a problemas como deformaciones excesivas, sobrecargas localizadas, desequilibrios en la distribución de cargas y

fallos prematuros en elementos clave. Una revisión rigurosa del diseño y una evaluación exhaustiva de las especificaciones del proyecto son esenciales para prevenir y abordar estas patologías antes de que comprometan la seguridad y la funcionalidad de la pasarela colgante.



Figura 10. Ejemplo de patologías debidas al proyecto

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la última fotografía, se observa claramente un ejemplo de una estructura carente de un diseño adecuado. En esta construcción, los cables parecen cumplir únicamente la función de barandilla, además de que tanto el tablero como el cerchado satisfacen las necesidades de la pasarela.

2.3 Marco Conceptual

Ciclo de vida. Se refiere a las diferentes etapas o fases por las que atraviesa desde su diseño y construcción hasta su demolición o retirada.

Daño. Efecto perjudicial de la infraestructura física de un elemento o construcción, producida por el paso del tiempo, su uso o causas externas; puede llevar al cierre de la función de la estructura.

Elemento. Componente, parte, unidad o sistema descrito de forma individual.

Evaluación de riesgos. Es un proceso sistemático que busca identificar y analizar los riesgos asociados con una determinada estructura o actividad, con el fin de determinar las medidas necesarias para reducir o mitigar estos riesgos.

Inspección básica de puentes. Consiste en un proceso visual para observar los componentes del activo con el fin de detectar posibles daños reales o aparentes lo más temprano posible. El propósito de la inspección es identificar los daños que requieren seguimiento o reparación.

Inspección especial. En caso de que se requiera información adicional sobre el puente después de una inspección principal y antes de abordar cualquier deficiencia, se puede realizar una inspección especial. Este tipo de inspección puede involucrar la realización de pruebas complementarias, una revisión completa y analítica de la estructura, e incluso la ejecución de pruebas de carga de control en servicio.

Inspección parcial. Es un tipo de evaluación que se enfoca en un conjunto específico de elementos del activo que deben ser observados según las instrucciones técnicas que se han establecido para la inspección básica o principal.

Inspección principal de puentes. Su propósito es la evaluación funcional y estructural para obtener información sobre el estado actual del activo con el fin de verificar que es capaz de desempeñar su función original con un nivel de seguridad aceptable. En general, este tipo de evaluación se lleva a cabo visualmente y no requiere el uso de equipos o técnicas especiales, a menos que sea necesario acceder a diferentes partes de la estructura.

Inspección. Implica la medición, observación o ensayo de las características importantes de un elemento para determinar si cumple con los requisitos establecidos. Dependiendo del propósito, este examen puede ser básico, principal o especial, mientras que en función del elemento del activo que se esté evaluando, se clasifica como ordinario o parcial.

Mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo se lleva a cabo con el objetivo de evaluar y/o reducir la degradación y la probabilidad de fallo de un elemento en particular. Este tipo de mantenimiento es programable y se realiza siguiendo los criterios generales establecidos en el documento correspondiente. Las actividades del mantenimiento preventivo están diseñadas para anticiparse a posibles fallos y para mitigar cualquier degradación del elemento en cuestión.

Puentes colgantes. Son estructuras que consisten en dos torres de soporte ancladas en los extremos de un puente suspendido mediante cables, los cuales sostienen el tablero de la estructura y los elementos estructurales que lo componen.

Vulnerabilidad estructural. Se refiere a la susceptibilidad de una estructura a sufrir daños o colapsos debido a la exposición a agentes externos, como sismos, vientos fuertes, cargas de tráfico o el envejecimiento natural de la estructura.

2.4 Marco Legal

En Colombia, la construcción y mantenimiento de puentes colgantes se rige por varias normas y regulaciones. Entre las que se incluyen la Norma Colombiana Sismo Resistente NSR-10, La Ley 400 de 1997 establece las disposiciones generales para la ordenación del territorio y el uso del suelo, lo que incluye la construcción y mantenimiento de infraestructuras como los puentes. Asimismo, el Ministerio de Transporte, a través de la resolución 3600 de 1996, adoptó como Norma Técnica el Código Colombiano Sísmico de Puentes (CCP), elaborado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, y El Instituto Nacional de Vías (INVIAS). La primera edición se publicó en el año de 1995 y su última actualización fue en el año 2014, por lo cual, se conoce el Código Colombiano de Puentes como CCP-14, la cual se adoptó a través de la resolución No 108 de 2015 expedida por el Ministerio de Transporte. El documento técnico establece las prácticas actuales de diseño y construcción de puentes en el país, especialmente en la sección No 4 denominada ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL, el CCP-14 expone las metodologías que se deben considerar para realizar un análisis apropiado de las estructuras de puentes, en el caso en particular al estar estudiando Puentes colgantes la norma recomienda para el análisis específico a través de modelación matemática que se haga uso de métodos elásticos no lineales.

En cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad estructural de los puentes colgantes, el Ministerio de Transporte de Colombia ha emitido manuales y guías técnicas que establecen los procedimientos y criterios para la inspección, evaluación y mantenimiento de los puentes. Entre estas normas se encuentran el Manual Para la Inspección Visual de Puentes y Pontones, publicada en el 2006 por la Universidad Nacional de Colombia y el INVIAS para el Estudio e Investigación del Estado Actual de las Obras de la Red Nacional de Carreteras, y la Guía Técnica

Colombiana GTC 45, que establecen los lineamientos para la evaluación de la capacidad estructural de puentes y viaductos, Por otro lado, en Colombia existen diversas entidades encargadas de la inspección y evaluación de la seguridad de los puentes colgantes, como el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y las Secretarías de Planeación y/o Infraestructura y/o Obras civiles Departamentales y Municipales. Estas entidades tienen la responsabilidad de realizar inspecciones periódicas de los puentes para evaluar su estado estructural y tomar medidas de mantenimiento y reparación en caso de ser necesario, ya que son las encargadas de planificar y gestionar el desarrollo urbano y rural en sus respectivos territorios, incluyendo la construcción y mantenimiento de este tipo de estructuras.

3. Metodología

3.1 Tipo de Investigación

La investigación aplicada se enfoca en la solución de problemas prácticos a través de la aplicación de conocimientos teóricos y científicos. En este caso, se busca desarrollar una guía metodológica que pueda ser aplicada por instituciones de educación superior y profesional en las secretarías de planeación municipal para evaluar la vulnerabilidad estructural de puentes colgantes. Esta guía se desarrollará a partir de la revisión de literatura especializada y la aplicación de técnicas y herramientas de ingeniería estructural para evaluar la vulnerabilidad de estos puentes en condiciones específicas. Por otro lado, la investigación descriptiva se enfoca en obtener información detallada sobre un tema en particular. En este caso, se busca obtener información sobre las condiciones estructurales de los puentes colgantes y su vulnerabilidad ante ciertos eventos, lo que permitirá establecer un diagnóstico y proponer medidas de mitigación adecuadas.

3.2 Instrumentos para la Recolección de la Información

La elaboración de una guía metodológica para la evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes de uso peatonal es un proyecto que requiere una cuidadosa planificación y una amplia gama de instrumentación. A continuación, se proporciona una lista de instrumentación y equipos que podrían ser necesarios para llevar a cabo este proyecto de investigación:

3.2.1 Instrumentación simple

Inspección visual. Este es un instrumento fundamental para la identificación de patologías estructurales en puentes colgantes. Consiste en una observación detallada de la

infraestructura con el fin de identificar anomalías, deformaciones, grietas, corrosión, entre otros problemas que puedan afectar la integridad del puente.

Revisión documental. Se revisarán documentos técnicos, estudios previos, manuales y normativas que estén relacionados con la evaluación y mantenimiento de puentes colgantes. Esta revisión permitirá obtener información relevante sobre los criterios de diseño, los procedimientos de evaluación, las técnicas de mantenimiento y los estándares de calidad que se aplican en este tipo de infraestructuras.

Instrumentos de Medición Geodésica:

- Estación total: Para la medición precisa de las coordenadas y las deformaciones en la estructura.

- Nivel de ingeniero: Para la nivelación y determinación de las alturas relativas.

Equipos de Topografía y Cartografía:

- GPS: Para obtener coordenadas precisas y georreferenciar la estructura.
- Software de modelado y cartografía: Para crear mapas y modelos tridimensionales de la estructura.

Instrumentos de Seguridad Personal:

- Equipo de protección personal: Para garantizar la seguridad del personal de campo durante las evaluaciones. Los componentes mínimos que debería llevar un equipo de protección personal son: casco, chaleco reflectante y arnés de seguridad.

Herramientas de Comunicación:

- Dispositivos de comunicación: Para mantener una comunicación efectiva entre el equipo de trabajo, como lo son los radios, teléfonos satelitales, celulares, entre otros.

Dispositivos de Almacenamiento y Procesamiento de Datos:

- Computadoras portátiles o tablets: Para procesar y analizar los datos recopilados en el campo.
- Unidades de almacenamiento externo: Para respaldar los datos de forma segura como memorias USB o discos duros portables.

Instrumentos de Registro y Documentación:

- Cámaras fotográficas y videocámaras: Para documentar visualmente las condiciones de la estructura y los procedimientos de evaluación.
- Cuadernos de campo y software de registro de datos: Para mantener un registro detallado de las observaciones y resultados.
- Guías o formatos: El equipo de trabajo que realiza la inspección debe generar formatos donde puedan registrar las observaciones y aspectos relevantes en la visita de manera rápida, ágil y oportuna.

Equipos de Acceso y Seguridad en Altura:

- Equipo de escalada o andamios suspendidos: Para acceder de manera segura a partes elevadas de la estructura.

3.2.2 Instrumentación avanzada

Equipos de Topografía y Cartografía:

- GPS: Para obtener coordenadas precisas y georreferenciar la estructura.
- Software de modelado y cartografía: Para crear mapas y modelos tridimensionales de la estructura.

Instrumentos de Medición de Deformaciones:

- Extensómetros: Para medir deformaciones en elementos estructurales clave.

- Inclínómetros: Para medir inclinaciones y desplazamientos angulares.
- Acelerómetros: Para detectar vibraciones y resonancias no deseadas.

Instrumentación para Pruebas de Carga:

- Células de carga: Para medir cargas aplicadas y distribución de cargas.
- Transductores de fuerza y torsión: Para medir esfuerzos internos.
- Dispositivos de registro de datos: Para registrar y analizar los resultados de las

pruebas de carga.

Instrumentos de Medición Ambiental:

- Sensores de temperatura y humedad: Para evaluar las condiciones ambientales.
- Anemómetros: Para medir la velocidad y dirección del viento, que pueden afectar

la estructura del puente.

- Sensores de corrosión: Para evaluar el estado de la corrosión en elementos

metálicos.

Instrumentos de Pruebas No Destructivas (PND):

- Ultrasonidos: Para evaluar la integridad de las estructuras de hormigón y detectar defectos internos.
- Termografía infrarroja: Para identificar áreas con anomalías de temperatura que

pueden indicar problemas estructurales.

Software de Simulación y Análisis Estructural:

- Programas de análisis estructural: El análisis estructural de puentes colgantes es una tarea crucial en ingeniería civil para garantizar la seguridad y estabilidad de estas impresionantes estructuras. Para llevar a cabo este análisis, se emplean diversos programas y herramientas especializadas que permiten a los ingenieros evaluar el comportamiento estructural

y la respuesta ante cargas dinámicas.

Algunos de los programas ampliamente utilizados son los softwares de CSI (Computer and Structures, Inc), programas mundialmente usados en el ámbito de la Ingeniería Estructural y Sísmica, que proporciona capacidades avanzadas para el modelado y análisis estructural. Entre los programas destacados se encuentran: SAP2000, SAFE, ETABS y CSiBridge, pues con ellos se pueden realizar análisis enfocados al comportamiento estructural según las características de físicas existentes en el puente en estudio. Para el caso en estudio el programa con mayor incidencia y facilidad para la evaluación y diseño de puentes es el CSiBridge, pues es un programa totalmente independiente que integra las capacidades de modelado, análisis y dimensionamiento de estructuras de puentes en un único modelo, lo que brinda mayor comodidad y agilidad para el análisis estructural. Sin embargo, existen otros programas como, SCIA Engenieer o STAAD que también permiten la creación detallada de modelos de puentes colgantes. Proporciona herramientas para modelar geometrías complejas, considerar efectos no lineales y realizar análisis dinámicos que son esenciales para evaluar el comportamiento de puentes sometidos a cargas variables.

Instrumentos de Muestreo de Materiales:

- Dispositivos para tomar muestras de materiales de construcción con fines de análisis de laboratorio. Tales muestras de materiales pueden ser de concreto, acero, cables y demás componentes que pueda tener el puente.

Herramientas de Análisis de Riesgos:

- Software de análisis de riesgos estructurales: Para evaluar los riesgos y la vulnerabilidad de la estructura a diferentes amenazas, como terremotos, vientos fuertes, inundaciones, etc.

Instrumentación de Monitoreo Continuo:

- Sensores de monitoreo en tiempo real para medir movimientos, tensiones y vibraciones constantemente.

Es importante destacar que la selección de la instrumentación específica dependerá de los objetivos de tu investigación, el presupuesto disponible y las características particulares de los puentes colgantes que estás evaluando. Además, es esencial asegurarse de que todo el equipo y la instrumentación cumplan con las normativas de seguridad aplicables y que el personal esté capacitado para su uso adecuado.

Para efectos del desarrollo y elaboración de la guía de vulnerabilidades estructurales en puentes peatonales en zonas rurales, propuesta para esta tesis, se optó por hacer uso de la instrumentación simple, mencionada en el numeral 4.2.1. La instrumentación avanzada, también es importante y es fundamental en un análisis de patologías o vulnerabilidades, pero se descartó, ya que dicha instrumentación tiene un alcance más detallado y de intervención de la estructura, lo cual implica un impacto en el presupuesto de la evaluación. Cabe mencionar que la instrumentación simple conlleva a una inspección visual, con el propósito de identificar fallencias estructurales, mientras la instrumentación avanzada implica una intervención directa sobre la estructura para su cuidado y mantenimiento.

3.3 Fases y Actividades Específicas del Proyecto

Para la elaboración de la guía metodológica para la evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes, se han establecido las siguientes fases y actividades específicas:

3.3.1 Fase 1: revisión bibliográfica. Durante el desarrollo de esta guía se realizó una investigación, con el fin de adquirir los conocimientos suficientes para la realización de este proyecto, dentro de la cual se encontró información relevante relacionada con la inspección de patologías dentro de esto (ADIF, 2015) es una guía que muestra los procesos ya estandarizados para inspeccionar puentes de ferrocarriles en España, donde se detallan los procesos y flujos de trabajo para llevar de la mejor manera estas tareas, tal como se muestra en la figura 11.

En particular, se investigaron documentos técnicos, estudios de casos y publicaciones científicas que abordan las patologías específicas relacionadas con los materiales empleados en las estructuras que nos conciernen. Estos recursos ofrecieron un valioso contexto y comprensión sobre cómo identificar, evaluar y abordar las patologías que pueden surgir en estos materiales a lo largo de su ciclo de vida.

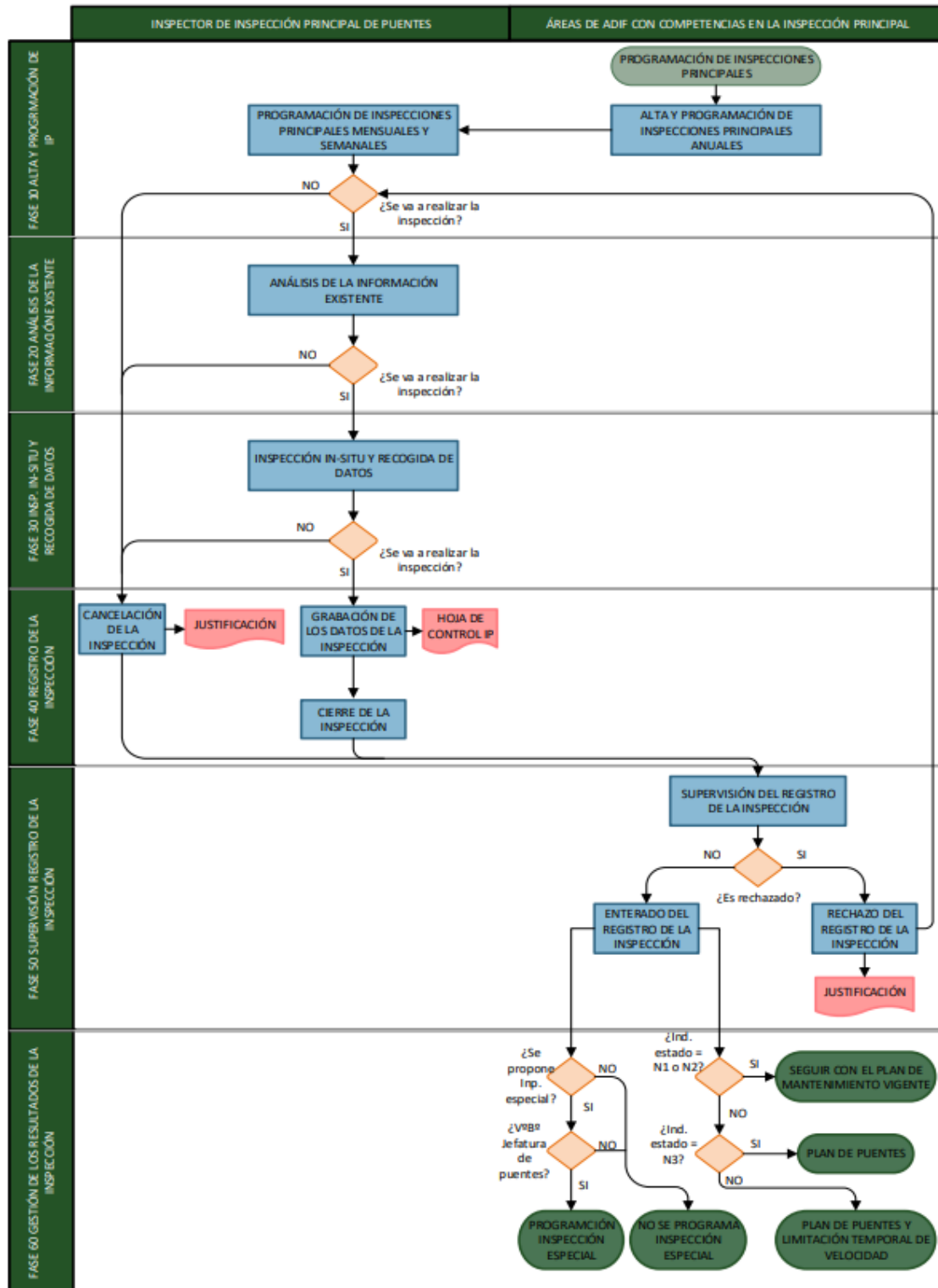



Figura 11. Diagrama de flujo de una inspección principal

Fuente: ADIF, 2015.

3.3.2 Fase 2: identificación de puentes a estudiar. Para llevar a cabo este estudio piloto, se ha seleccionado un conjunto específico de puentes y pasarelas colgantes. Estos serán sometidos a inspecciones técnicas con el propósito de identificar las características más recurrentes en este tipo de estructuras. Estas visitas técnicas permitirán obtener información fundamental para el análisis y la comprensión de las particularidades que suelen presentarse en estas construcciones.


Tabla 1. Formato 1. Identificación del puente 01

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Nombre de Puente:	Puente 01 – San Carlos - Urapal
Departamento:	Norte De Santander
Municipio:	Toledo
Vereda:	San Carlos - Urapal
Centro Poblado más cercano:	San Bernardo De Bata.
Uso:	Peatonal y de Carga
Observación:	<p>El puente se basa en una estructura conformada por dos torres principales de concreto reforzado, las cuales soportan dos cableados principales que a su vez soporta por medio de tensores en acero; una estructura en madera que cumple la función de tablero del puente.</p> <p>Se observo la presencia de afecciones patológicas debidas a la falta de mantenimiento. De acuerdo con las observaciones y el deterioro que presentaba el puente se realizó intervención por parte del municipio.</p>
Localización:	<p>Vereda San Carlos – Urapal, Coordenadas, LAT: 7°11'1.35"N & LONG: 72°25'58.95"O</p> 

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Registro fotográfico:	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Formato 2. Identificación del puente 02



IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Nombre de Puente:	Puente 02 – San José del Pedregal
Departamento:	Norte De Santander
Municipio:	Toledo
Vereda:	San José del Pedregal
Centro Poblado más cercano:	Cabecera Municipal
Uso:	Peatonal y de Carga
Observación:	<p>El puente se basa en una estructura conformada por dos torres principales de concreto reforzado, las cuales soportan dos cableados principales que a su vez soporta por medio de tensores en acero; una estructura en madera que cumple la función de tablero del puente.</p> <p>Se observó la presencia de afecciones patológicas debidas a la falta de mantenimiento. De acuerdo con las observaciones y el deterioro que presentaba el puente se realizó intervención por parte del municipio.</p>
Localización:	<p>Vereda San José del Pedregal, Coordenadas, LAT: 7°24'52.47"N & LONG: 72°31'41.76"O</p> 

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Registro fotográfico:	

Fuente: Elaboración propia.

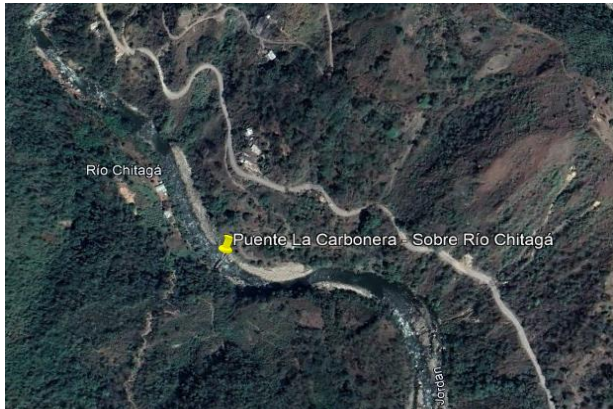

Tabla 3. Formato 3. Identificación del puente 03

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Nombre de Puente:	Puente 03 – Alto El Oro – Buena Vista
Departamento:	Norte De Santander
Municipio:	Toledo
Vereda:	Alto El Oro – Buena Vista
Centro Poblado más cercano:	San Bernardo De Bata.
Uso:	Peatonal y de Carga
Observación:	<p>El puente se basa en una estructura conformada por dos torres principales de concreto reforzado, las cuales soportan dos cableados principales que a su vez soporta por medio de tensores en acero; una estructura en madera que cumple la función de tablero del puente.</p> <p>Se observo la presencia de afecciones patológicas debidas a la falta de mantenimiento. De acuerdo con las observaciones y el deterioro que presentaba el puente se realizó intervención por parte del municipio.</p>

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Localización:	<p>Vereda Alto-El Oro - Buenavista, Coordenadas, LAT: 7° 9'39.78"N & LONG: 72°25'30.98"O</p> 
Registro fotográfico:	

Fuente: Elaboración propia.


Tabla 4. Formato 4. Identificación del puente 04

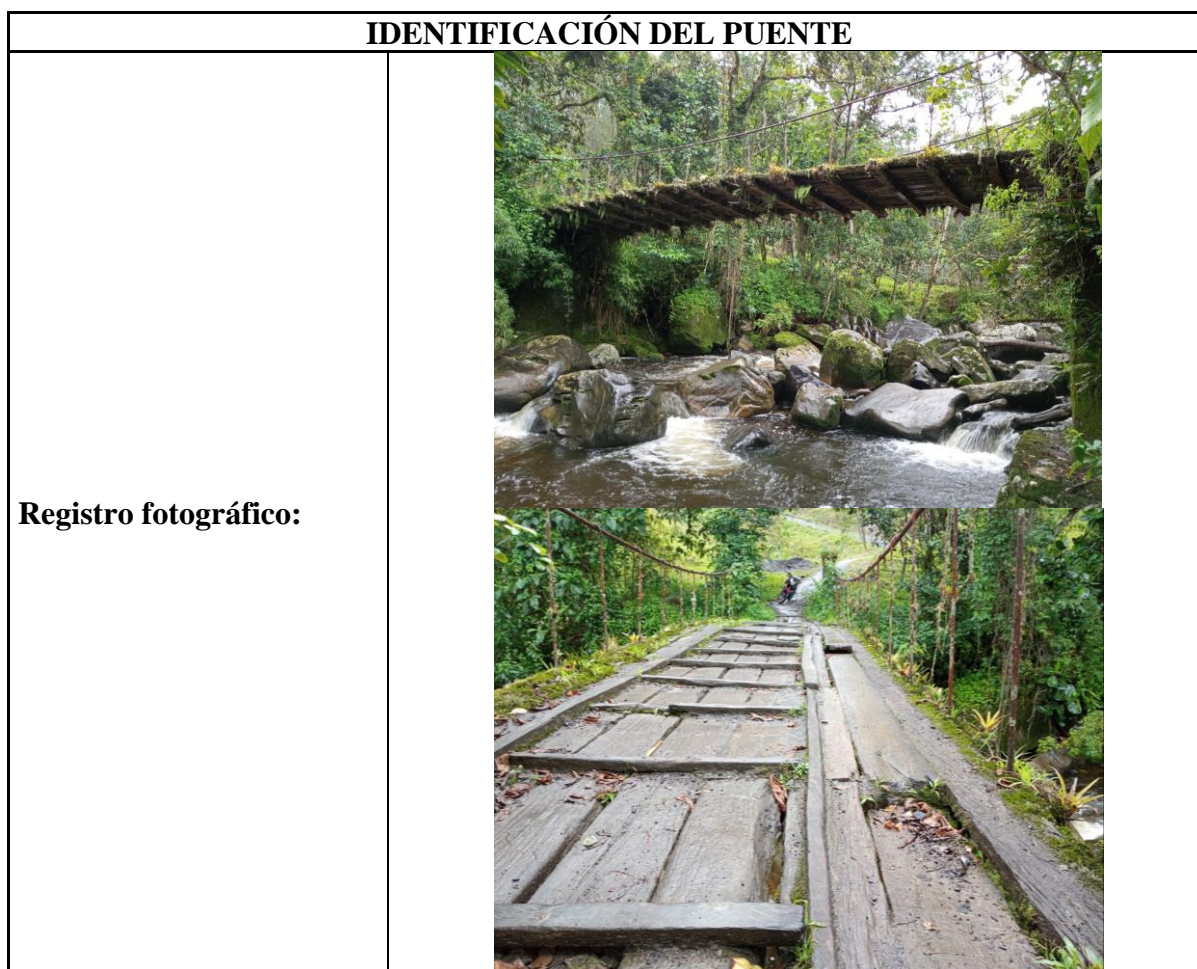
IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Nombre de Puente:	Puente 04 – La Carbonera
Departamento:	Norte De Santander
Municipio:	Toledo
Vereda:	La Carbonera
Centro Poblado más cercano:	San Bernardo De Bata.
Uso:	Peatonal y de Carga
Observación:	<p>El puente se basa en una estructura conformada por dos torres principales de concreto reforzado, las cuales soportan dos cableados principales que a su vez soportan por medio de tensores en acero; una estructura en madera que cumple la función de tablero del puente.</p> <p>Actualmente requiere de intervención y mantenimiento.</p>
Localización:	<p>Vereda La Carbonera, Coordenadas, LAT: 7°13'54.99"N & LONG: 72°26'54.52"O</p> 
Registro fotográfico:	

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Formato 5. Identificación del puente 05

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Nombre de Puente:	Puente 05 – Tapatá
Departamento:	Norte De Santander
Municipio:	Toledo
Vereda:	Tapatá
Centro Poblado más cercano:	Cabecera Municipal
Uso:	Peatonal y de Carga
Observación:	<p>El puente se basa en una estructura conformada por dos torres principales de concreto reforzado, las cuales soportan dos cableados principales que a su vez soporta por medio de tensores en acero; una estructura en madera que cumple la función de tablero del puente.</p> <p>Actualmente requiere de intervención y mantenimiento.</p>
Localización:	<p>Vereda Tapatá, Coordenadas, LAT: 7°25'18.83"N & LONG: 72°31'52.79"O</p> 



Fuente: Elaboración propia.

Los puentes seleccionados y visitados se encuentran en diferentes etapas con relación al estado de sus elementos estructurales. Para el caso de los tres primeros puentes, ubicados en las veredas San Carlos-Urapal, San José del Pedral y Alto El Oro-Buenvista, presentaban gran deterioro en el tablero, motivo por el cual se realizaron por parte del municipio las intervenciones requeridas en aras de garantizar la estabilidad del elemento:

En el caso del Puente No 1 se realizó un reforzamiento de la estructura de soporte del tablero, modificando los elementos de madera existentes por elementos de acero, así como también se realizaron intervenciones en los pendolones que presentaban mayor deterioro, así

como sus anclajes, en el caso del tablero se renovaron los elementos de madera en la totalidad del área.

En el caso del Puente No 2 y 3 se realizó un reforzamiento de la estructura de soporte del tablero, modificando la totalidad de la estructura del tablero que existía en madera, a elementos en acero y lamina antiderrapante, de igual manera que en el puente No 1 se realizaron intervenciones en los pendolones que presentaban mayor deterioro, así como sus anclajes.

En el caso de los Puente No 4 y 5 se observó que los elementos de concreto reforzado y de madera presentan patologías generadas por procesos biológicos y químicos, las dos estructuras requieren de una repotenciación en aras de garantizar la estabilidad de los puentes, en ambos casos se sugiere modificar los elementos de madera por elementos de acero y reforzar los anclajes entre tablero, pendolones y cable principal.

3.3.3 Fase 3: Caracterización de las patologías estructurales. A través de las visitas realizadas en el terreno y el exhaustivo estudio de la literatura especializada, se lograron identificar las patologías predominantes que afectan a las pasarelas colgantes. Estas patologías fueron clasificadas según su naturaleza y la ubicación específica dentro de la estructura. Este proceso de análisis permitió no solo reconocer las principales problemáticas que aquejan a estas pasarelas, sino también comprender en qué partes de la estructura suelen manifestarse con mayor frecuencia. Así, hemos obtenido una visión integral de las posibles patologías que pueden surgir en este tipo de construcciones, sentando las bases para futuras evaluaciones y proyectos de mantenimiento.

Esta clasificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resumen de patologías típicas en estructuras de pasarelas colgantes

PROCESO	PATOLOGÍA	ELEMENTO
BIOLÓGICO	Vegetación herbácea, musgos o líquenes	Aletas Y Muros de contención
		Anclajes del cableado
		Apoyos
		Tablero (elementos de madera)
		Torres
DEBIDO AL PROYECTO	Altura inadecuada	Barandas
	Movimiento o giro del encofrado	Aletas Y Muros de contención
		Torres
	Objetos extraños	Aletas Y Muros de contención
		Torres
	Tornillos o roblones flojos	Anclajes del Tablero
		Cables
		Tablero (elementos metálicos)
FISICOS	Armaduras vistas	Aletas Y Muros de contención
		Anclajes del cableado
		Apoyos
		Cimentaciones
		Torres
	Arrastre, deterioro o pérdida de elementos de protección	Cimentaciones
	Asentamientos	Apoyos
	Aterramiento	Cauces
	Coqueras o nidos de grava	Aletas Y Muros de contención
		Anclajes del cableado
		Torres
	Corrosión	Tablero (elementos metálicos)
Degradación superficial	Aletas Y Muros de contención	
	Anclajes del cableado	
	Apoyos	
	Barandas	
	Cimentaciones	
Torres		
Depósitos superficiales, acumulación de suciedad	Anclajes del cableado	

PROCESO	PATOLOGÍA	ELEMENTO
		Anclajes del Tablero
		Apoyos
		Torres
	Depresiones de grava	Apoyos
	Descalce / Socavación	Cimentaciones
	Desplazamientos	Apoyos
	Deterioro de pintura o de tratamiento protector	Cables
		Tablero (elementos de madera)
		Tablero (elementos metálicos)
	Encharcamiento	Sistema de drenaje
	Erosión	Cauces
		Terraplenes
	Filtraciones entre juntas	Aletas Y Muros de contención
		Torres
	Hundimiento	Terraplenes
	Pérdida de material	Anclajes del cableado
		Apoyos
		Tablero (elementos de madera)
	Pérdida de piezas	Apoyos
	Pérdida de tornillos, platinas u otros elementos	Anclajes del Tablero
		Barandas
		Cables
		Tablero (elementos metálicos)
	Rebasas, pérdida de lechada y finos en juntas	Aletas Y Muros de contención
		Apoyos
		Torres
	Socavación	Cauces
Suciedad	Anclajes del Tablero	
	Cables	
	Tablero (elementos de madera)	
	Tablero (elementos metálicos)	
Movimientos diferenciales	Aletas Y Muros de contención	
	Torres	
obstrucción	Sistema de drenaje	

PROCESO	PATOLOGÍA	ELEMENTO
MECÁNICO	Abombamiento	Torres
	Asientos / Movimientos / Giros	Cimentaciones
	Deformaciones	Cables
		Tablero (elementos de madera)
		Tablero (elementos metálicos)
	Despegue de asiento diferencial estribo y aleta	Aletas Y Muros de contención
	Desplomes	Aletas Y Muros de contención
		Anclajes del cableado
		Torres
	Fisuras	Aletas Y Muros de contención
		Apoyos
		Tablero (elementos de madera)
		Tablero (elementos metálicos)
	Roturas	Torres
		Aletas Y Muros de contención
		Anclajes del cableado
		Anclajes del Tablero
Apoyos		
Barandas		
Cimentaciones		
Sistema de drenaje		
Tablero (elementos metálicos)		
Terraplenes		
Torres		
QUÍMICO	Corrosión	Aletas Y Muros de contención
		Anclajes del cableado
		Anclajes del Tablero
		Apoyos
		Cables
		Cimentaciones
		Tablero (elementos metálicos)
		Torres

PROCESO	PATOLOGÍA	ELEMENTO
	Humedades, pátinas, costras, eflorescencias, criptoeflorescencias, etc	Aletas Y Muros de contención
		Apoyos
		Tablero (elementos de madera)
		Torres

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Fase 4: evaluación de la vulnerabilidad estructural. Guiados por lo anterior se ha propuesto el desarrollo de un flujo de trabajo que permita establecer la vulnerabilidad estructural tal como se muestra a continuación:

DIAGRAMA DE FLUJO INSPECCION

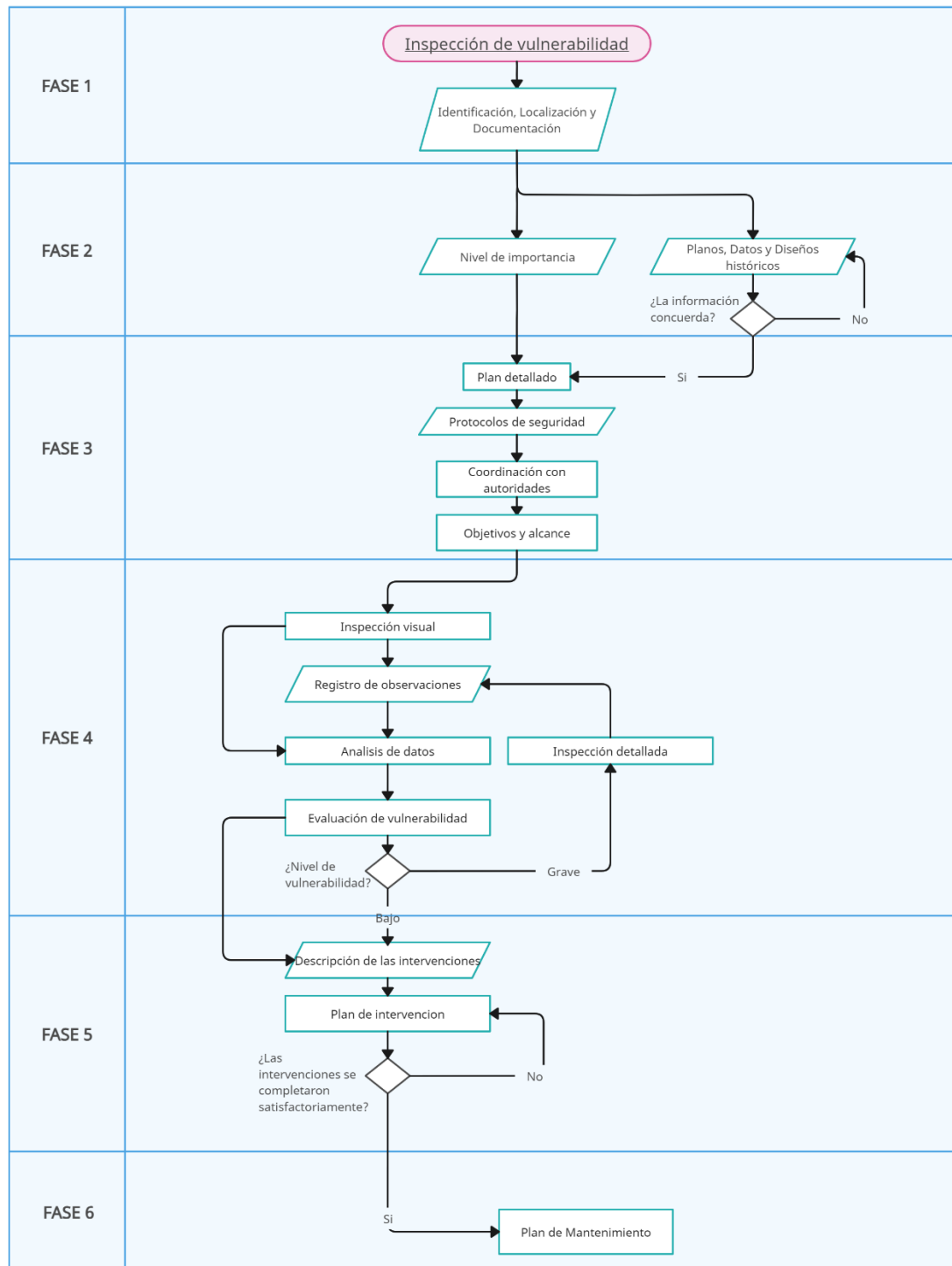


Figura 12. Diagrama de flujo para la inspección de vulnerabilidades

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4.1 Fase 1: identificación de puentes. Como primera actividad en la evaluación de puentes colgantes, se realizara una identificación de estructuras presentes en la zona. De acuerdo con el propósito y el alcance del proyecto, se requiere observar de manera previa las zonas, veredas, vías y/o municipios que cuenten con puentes, con el fin de, posteriormente, generar una programación de visitas. Esta identificación permite optimizar los tiempos de desplazamientos y crear un orden de prioridades preliminar para la intervención de las estructuras.

En la siguiente tabla se presenta la información mínima requerida y una breve descripción de cada ítem, para la identificación:

Tabla 7. Formato de identificación de puentes

IDENTIFICACIÓN DEL PUENTE	
Nombre de Puente:	
Departamento:	
Municipio:	
Vereda:	
Centro Poblado más cercano:	
Vía:	
Kilómetro:	
Uso:	
Observación:	

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4.2 Fase 2: recolección de información existente. Una vez identificados los puentes, se procede a recolectar y analizar la información que exista y que se tenga acceso. La información puede presentarse en forma de planos de diseño, memorias de cálculo o actas de obra hechas en la ejecución de la estructura. Así mismo, es posible tener registro de inspecciones previas en el puente donde se identifiquen daños o patologías, realizadas por otras entidades. También, en esta fase del proceso, cualquier dato o información obtenida a partir de noticias locales o comentarios de la comunidad son aportes en la investigación histórica de la estructura.

La recopilación de información relevante sobre un puente es una actividad crucial en el proceso de evaluación de su vulnerabilidad estructural. Esta actividad implica obtener datos detallados y documentación relacionada con el puente en cuestión. Se presenta una descripción detallada de cómo se llevaría a cabo esta actividad:

- Solicitud de Documentación.
- Planos y Diseños.
- Especificaciones Técnicas.
- Historial de Mantenimiento.
- Informes de Inspección.
- Cargas de Diseño.
- Documentación Fotográfica.
- Información Geotécnica.
- Registro de Eventos Significativos.

Dado que se cuenta con una localización e identificación de puentes y su área de influencia, en este paso se determina el nivel de importancia que tiene cada estructura. Se lleva a cabo un análisis donde se tenga en cuenta factores como patologías o daños detectables a simple vista o el tipo de vía que conecta, es decir, si el puente hace parte de un acceso peatonal o vehicular de una vía primaria, secundaria o terciaria. Otros factores a tener en cuenta son las poblaciones que conecta, la cantidad de personas que utilizan el puente, el tipo de cargas que por allí transitan y la frecuencia de uso.

3.3.4.3 Fase 3: programación de la inspección. Al definir los puentes de mayor importancia y de acuerdo con la información recolectada, se procede a programar la o las inspecciones a realizar. A su vez, la programación de la visita no solo depende de la importancia,

sino también de los recursos disponibles para llevarla a cabo. Es relevante contemplar aspectos como el tiempo de los desplazamientos tanto del personal como de los equipos a utilizar y la cantidad de recursos económicos y humanos para desarrollar la visita. Por último, pero no menos importante, es pertinente definir la manera de recolección de información.

3.3.4.4 Fase 4: inspección de vulnerabilidades. Esta fase consiste en la visita a la estructura y en la mayor recolección de información de la estructura. Para ello, es fundamental determinar los elementos que deben ser observados, las posibles patologías que pueden presentarse, la localización más habitual de dichas patologías, los equipos a emplear y la metodología de recolección.

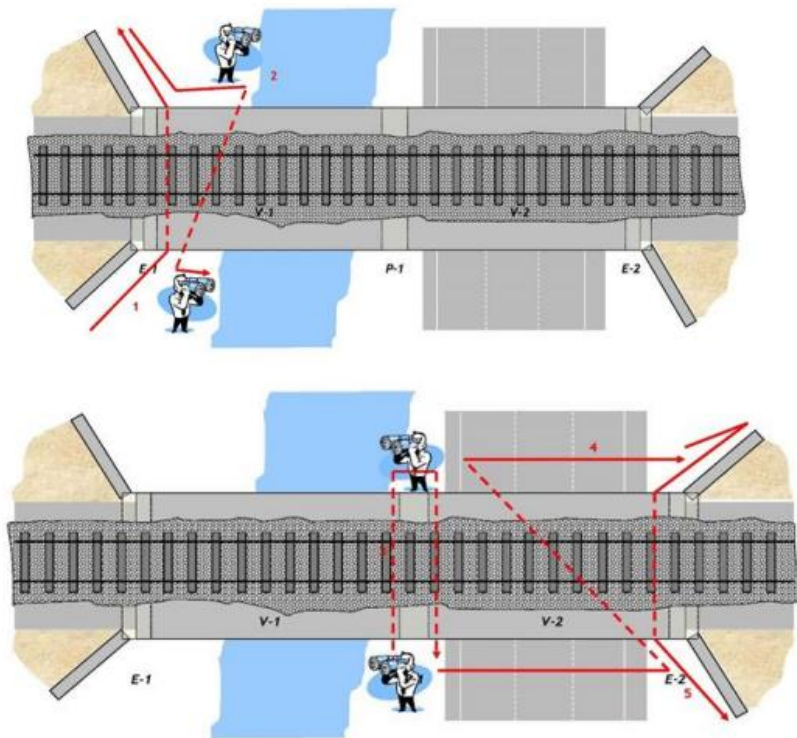


Figura 13. Esquema de inspección inferior

Fuente: ADIF, 2015.

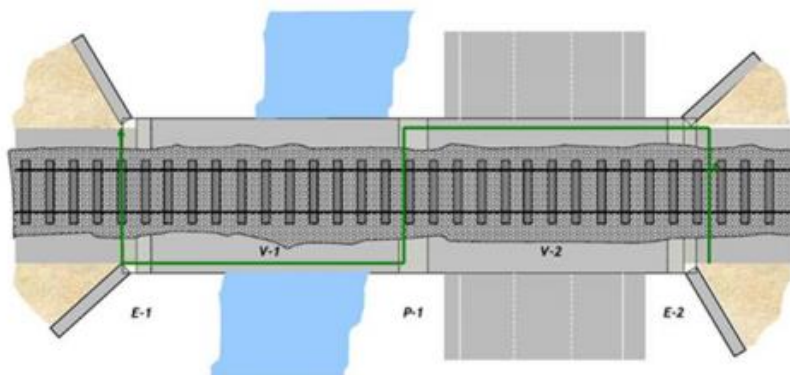


Figura 14. Esquema de inspección superior

Fuente: ADIF, 2015.

Una vez culminada la visita e inspección visual de la estructura colgante, se procede a realizar un análisis de la información recolectada. En este paso se procesa la información y mediante herramientas computacionales se puede determinar el grado de deterioro que está presente en el puente. Se lleva a cabo la respectiva relación entre el material multimedia y las afectaciones identificadas con el objetivo de generar una trazabilidad entre las observaciones in situ, las patologías detectables y las posibles intervenciones para la conservación de la estructura.

También se debe tener en cuenta la intensidad del daño en el momento en que se realiza la inspección, en este caso se le dará un valor cuantitativo que dependerá del criterio del inspector.

Tabla 8. Matriz de identificación de daños

		INTENSIDAD DEL DAÑO			
		1	2	3	4
CATEGORÍA DEL DAÑO	Categoría 1	N1	N1	N1	N1
	Categoría 2	N1	N2	N2	N2
	Categoría 3	N1	N2	N3	N3
	Categoría 4	N1	N2	N3	N4

Fuente: ADIF, 2015.

La categoría de un daño se refiere a la medida en la que las consecuencias de dicho daño, en su nivel de máxima intensidad, pueden afectar a la funcionalidad y seguridad; está determinada por la naturaleza del daño y el elemento que resulta afectado, incluyendo el material del que está hecho dicho elemento.

Algunos defectos, cuando alcanzan su máxima intensidad, pueden tener un impacto de gravedad máxima. Sin embargo, hay otros defectos que, incluso cuando llegan a su máxima intensidad, solo generan niveles intermedios de gravedad.

Es importante destacar que, a medida que la intensidad de estos defectos aumenta, pueden dar lugar a la aparición de otros daños adicionales.

Tabla 9. Matriz niveles de daños

NIVEL DE GRAVEDAD	DESCRIPCION	CLASIFICACION DEL DAÑO
N1	Defectos sin repercusión en el comportamiento estructural, ni en la durabilidad o funcionalidad del elemento.	CLASE 2
N2	Defectos sin repercusión en el comportamiento estructural, pero que menoscaban la durabilidad o la funcionalidad del elemento.	CLASE 2
N3	Defectos que evidencian una evolución patológica y pueden afectar a la seguridad estructural.	CLASE 1
N4	Defectos que afectan a la seguridad estructural	CLASE 1

Fuente: ADIF, 2015.

Los daños de CLASE 1 son altamente recomendable que sean abordados por profesionales debidamente capacitados. Un manejo incorrecto de estos daños podría no solo no resolver el problema, sino incluso agravarlo aún más.

Los daños de CLASE 2 corresponden a problemas que pueden ser abordados con conocimientos básicos. En estos casos, no es necesario contar con una formación especializada, pero se requiere cierta comprensión de las soluciones adecuadas. Estos daños son generalmente

de menor complejidad y pueden ser tratados con medidas más simples y accesibles para personas con conocimientos básicos en la materia.

3.3.4.5 Fase 5: determinación de intervención. Al realizar el análisis de la información de campo se sugiere el nivel de intervención, ya sea una intervención más detallada y una inspección de patologías, o simplemente un mantenimiento periódico o preventivo. Lo anterior se describe a continuación así:

Inspección detallada. Dada la clasificación de la gravedad presente en el puente colgante, se determina si es necesario una nueva revisión más detallada. Este tipo de inspección ya no estaría a cargo de la entidad que realizó la primera visita, sino por un equipo de patólogos estructurales. Lo ideal es que el equipo de trabajo especializado lleve a cabo ensayos no destructivos para obtener información más detallada de la afectación presente. De ser posible, el mismo equipo de patólogos estaría encargado de tomar las acciones pertinentes para la reparación, o de caso contrario, que proporcionen un informe más exhaustivo con recomendaciones que se puedan aplicar para la conservación de la estructura.

Algunas de las acciones que se deberían realizar en una inspección más detallada son las siguientes:

- **Pruebas no destructivas:** Utiliza técnicas como el ultrasonido, la radiografía y las pruebas de penetración para evaluar la integridad estructural de los componentes sin causar daños.
- **Mediciones de vibración y deformación:** Realiza mediciones de vibración y deformación en puntos críticos para evaluar la respuesta estructural ante las cargas.

Intervención de mantenimiento. Realiza las siguientes acciones para abordar las vulnerabilidades estructurales identificadas:

- **Reparaciones Puntuales:** Repara las áreas dañadas o corroídas, como cables, conexiones, anclajes y superficies de concreto, siguiendo las mejores prácticas de ingeniería.
- **Refuerzos y Reemplazos:** Si las vulnerabilidades son significativas, considera la posibilidad de refuerzos estructurales o el reemplazo de componentes afectados.
- **Tratamiento de la Corrosión:** Implementa medidas para controlar y prevenir la corrosión en componentes metálicos, como recubrimientos anticorrosivos y sistemas de protección catódica.

3.3.5 Fase 5: elaboración de la guía metodológica. Con base en todo el proceso investigativo previo llevado a cabo, se ha elaborado el documento titulado 'Guía para la Evaluación de Vulnerabilidad Estructural en Puentes Colgantes'. Este documento representa la recopilación de datos, análisis de patologías, y flujo de trabajo para llevar a cabo una buena inspección de vulnerabilidades aplicada a pasarelas colgantes.

- **Concientización y capacitación:** Promover la comprensión de la importancia de evaluar y abordar las vulnerabilidades estructurales en los puentes colgantes rurales y capacitar a las personas en el uso de la guía.
- **Fomentar la implementación:** Inspirar la aplicación práctica de la guía metodológica en la evaluación y mejora de los puentes colgantes existentes, así como en la construcción de nuevos puentes.

3.3.6.1 Pasos y estrategias clave

- **Identificación de audiencias clave:** Determinar quiénes son las audiencias primarias y secundarias para la guía. Esto podría incluir a ingenieros, gobiernos locales, organizaciones no gubernamentales, comunidades locales y otros interesados en la seguridad de los puentes colgantes.
- **Desarrollo de materiales de difusión:** Crear materiales de difusión efectivos, como folletos, presentaciones, videos instructivos y material en línea que explique la guía de manera clara y accesible.
- **Colaboraciones:** Buscar colaboraciones con instituciones académicas, agencias gubernamentales y organizaciones locales para apoyar la difusión de la guía.
- **Evaluación continua:** Realizar seguimiento y evaluación de la efectividad de tus esfuerzos de difusión, recopilando retroalimentación de los usuarios y ajustando la estrategia según sea necesario.

Esta fase de difusión y socialización no solo garantiza que la investigación tenga un impacto real y positivo en la seguridad de los puentes colgantes en zonas rurales, sino que también contribuye a la promoción de mejores prácticas y la concienciación sobre la importancia de abordar las vulnerabilidades estructurales en la infraestructura crítica.

4. Conclusiones

Aunque la revisión de la normativa vigente, investigaciones previas y guías metodológicas relacionadas con la evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes de uso peatonal reveló que es muy poca la información relacionada con este tipo de estructuras en Colombia, se destacó la importancia de abordar la evaluación de manera integral y adaptativa con normas e investigaciones realizadas en otros países. A pesar de la limitada disponibilidad de guías, se resaltaron diferentes factores clave, como la calidad de los materiales, la carga, la geometría y las condiciones ambientales, que deben considerarse en la evaluación. Esta revisión pone de manifiesto la necesidad de impulsar futuras investigaciones y desarrollar mejores prácticas específicas para puentes colgantes peatonales, con el objetivo de mejorar su seguridad y durabilidad.

Con esta investigación se determinaron los parámetros críticos para evaluar la vulnerabilidad estructural de puentes colgantes peatonales según criterio técnico del investigador. Estos factores incluyen las solicitaciones, el diseño y proceso constructivo, los cuales afectan de manera global a toda la infraestructura y establecen el estado actual de la misma, el cual se ve representado en los tipos de patologías; a su vez, se pudo observar que la naturaleza de las patologías más evidentes suele derivar de procesos constructivos deficientes o de la falta de un mantenimiento periódico adecuado. No obstante, también se identificaron otras patologías, como deformaciones o grietas, que tienen su origen en un diseño estructural deficiente, incluyendo sobreesfuerzos o factores no considerados, como sismos o presiones del terreno, además ausencia de elementos importantes dentro del funcionamiento de un puente colgante como lo es los contravientos.

A pesar de las limitaciones inherentes al proyecto y su enfoque centrado en estructuras de carácter rural, que suelen carecer de los recursos necesarios para llevar a cabo análisis específicos de patologías, se logró el desarrollo de una metodología exhaustiva y detallada para la inspección y el análisis de vulnerabilidad estructural, la cual se basó en una revisión rigurosa de lineamientos y bibliografía previamente investigada, derivándose de fuentes y metodologías aplicadas fuera de Colombia. El resultado es una metodología que se presenta de manera clara y accesible, diseñada para que el personal al que va dirigido pueda realizar un estudio básico del estado de las infraestructuras de manera efectiva.

Se definieron umbrales de tolerancia para diversos tipos de daños o defectos estructurales, junto con el establecimiento de niveles de riesgo fundamentados en la capacidad estructural y la seguridad de los usuarios, representa un avance significativo en la gestión de la integridad de las estructuras. Lo anterior, permitió una evaluación más precisa de la salud estructural, al proporcionar pautas claras para determinar cuándo una estructura necesita intervención o atención inmediata. Además, al correlacionar estos umbrales con niveles de riesgo, se facilita la toma de decisiones informadas sobre la priorización de recursos y acciones correctivas. En última instancia, esta definición de umbrales y niveles de riesgo contribuye a mejorar la seguridad pública y la preservación a largo plazo de las infraestructuras, asegurando que se mantengan en condiciones óptimas para el bienestar y la protección de los usuarios.

El desarrollo de recomendaciones y prácticas para abordar las patologías debe ser definido a partir de las observaciones y análisis de vulnerabilidad realizado. Dadas las condiciones y afectaciones que pueda tener una estructura, es necesario recurrir a un estudio más detallado de un equipo profesional especializado en patologías. Las sugerencias de mantenimiento y cuidado de los puentes deben ser proporcionadas por el ingeniero diseñador. De

no ser así, se recomienda realizar la evaluación preliminar de vulnerabilidades y recurrir a una inspección de patologías más avanzada.

De acuerdo con el desarrollo de esta tesis y de la guía de evaluación de vulnerabilidades, es posible aplicar dicha guía en puentes que se encuentren no solo en zonas rurales del departamento de Norte de Santander, sino también, en otras zonas y regiones del país. La vulnerabilidad y patologías de estructuras es un tema que afecta a cualquier puente, indistinto de su ubicación o condiciones ambientales. Ninguna estructura está exenta de presentar afectaciones, por lo que la aplicación de la guía es útil en cualquier contexto nacional.

5. Recomendaciones

Se plantean las siguientes recomendaciones para investigaciones posteriores, relacionados con el programa desarrollado:

- Desarrollar una guía de intervención y mantenimiento de puentes colgantes. La intención de generar una guía de intervención y mantenimiento es proponer las pautas y directrices para el correcto reforzamiento en estructuras afectadas y la planeación de esquemas de mantenimiento periódico sobre dichas estructuras para prevenir patologías o deterioros causados por los diferentes factores, mencionados previamente a lo largo de esta tesis.
- Ampliar la guía de vulnerabilidades estructurales para puentes vehiculares de tráfico liviano y pesado en zonas rurales y urbanas. El propósito de esta tesis se enfocó principalmente en puentes peatonales en zonas rurales. Sin embargo, el efecto de las patologías estructurales y sus consecuencias afectan a todo tipo de puentes. La carencia de una guía de patologías estructurales en el país y los pocos planes de mantenimiento de estructuras al entrar en funcionamiento, generan la necesidad de proponer guías prácticas para el cuidado y conservación de puentes, ya sea por su importancia o por su constante trabajo ante cargas dinámicas.
- Como recomendación general hacia las autoridades encargadas de ejecutar obras civiles de la importancia de los puentes, se sugiere destinar los recursos necesarios para el constante mantenimiento tanto estético como estructural. Es importante entender que la obra civil no siempre culmina al entregar el proyecto y ponerlo en marcha. La ingeniería civil también se constituye por el cuidado y conservación de las estructuras en la totalidad de su vida útil.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo, V. (2021). Guía de diseño de puentes atirantados con sección compuesta, con un ejemplo práctico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- ADIF. (2015). Inspección principal de puentes de ferrocarril.
https://www.adif.es/es_ES/conoceradif/normativa_tecnica/normativa_tecnica_vigente/instruccion_tecnica_vigente/IT_301_001_VIA_31/index.shtml.
- ADIF. (2015). Instrucción técnica ADIF-IT-301-001-VIA-31. Madrid: ADIF.
- Cai, S. (2020). Research on the corrosion prevention of bridge cables under the effects of marine and industrial atmospheres. *Coatings*, 121.
- Calderón, F. (2010). Diseño del puente colgante proyecto geotermico Las pailas. San José: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Cardoza, M., & Villalobos, J. (2005). Evaluación estructural de un puente mediante la realización de una prueba de carga estática. Tesis de grado, San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Carrión, F., Hernández, J., & Terán, J. (2005). Estudio Experimental de un puente atirantado. Sanfandila: SCT.
- Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2006). Guía para inspección de puentes. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones República del Perú.
- Domínguez, P., Capellán, G., Pereda, B., García, M., Godoy, A., López, J., & García, V. (2017). Diseño y construcción del puente Frank Gehry. Primer acceso a la nueva isla de Zorrotzaurre en Bilbao. *Hormigón y Acero*, 69(284), 27-38.
- Duan, X. (2019). Experimental study on the fatigue life of a suspension bridge. *Shock and Vibration*, 1-15.

- Feng, Y. (2017). Research on Fatigue Crack Growth Life of Suspender Chain of Suspension Bridge. *Applied Sciences*, 345.
- Galindo, J. (2010). La construcción de puentes colgantes en Colombia durante el siglo xix: entre la tradición y la innovación. *Revista M*, 7(1), 4-15.
- Gamez, R., González, L., & Pérez, M. (s.f.). Propuesta de rehabilitación y cambio de uso del Puente colgante sobre el río San Agustín. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 7(1), 1-11.
- Geocisa e Ines Ingenieros. (2012). Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la red de carreteras del estado. Madrid: Administración General del Estado.
- Gómez, R. (1973). Puente de Río Colorado. *Informes de la Construcción*, 25(248), 75-81.
- Instituto Nacional de Vías. (2006). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras, formato de ficha técnica de información Sistema de administración de puentes de Colombia - SIPUCOL. Colombia: INVIAS.
- Jonson, C. (1971). Puente colgante sobre el Lillebaelt. *Informes de la Construcción*, 24(233), 69-77 .
- Li, Y. (2019). Research on dynamic characteristics of the long-span suspension bridge under wind load. *Journal of Structural Engineering*.
- Málaga, C. (2020). Identification and evaluation of structural damages and pathologies in bridges. *Materials Science Forum*, 147-153.
- Martín, M. (2021). Guía de evaluación e intervención de puentes de acero. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías. (2015). RESOLUCIÓN 108 DE 2015 - Por la cual se actualiza el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes y se adopta

- como “Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-2014”. Colombia: Ministerio de Transporte.
- Muñoz, B., Agüero, B., Vargas, B., Villalobos, V., Vargas, A., Barrantes, R., & Loria, G. (2015). Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual. San José: Programa de Infraestructura del Transporte.
- Nieto, J. (2013). Aplicación de métodos computacionales en la evaluación de la respuesta aeroelástica de puentes soportados por cables. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(2), 136-144.
- Poveda, J. (2022). Modelo de aeroelasticidad comparando un puente tipo colgante versus tipo arco, caso río Arajuno y su incidencia en el comportamiento estructural. Tesis de grado, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo.
- Ramírez, J. (2016). Guía de inspección para la evaluación de la integridad estructural de puentes de estructura metálica, tipo “puentes de celosía de acero”. Caracas: Universidad Nueva Esparta.
- Schmidt, W. (1972). El puente Zwenberg en Karnten Austria. *Informes de la Construcción*, 25(244), 63-69.
<https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion>
- Secretaría de Integración Económica Centroamericana - SIECA. (2010). Manual centroamericano de gestión del riesgo. Costa Rica: SIECA.
- Smith, P. (1970). Puente sobre el río Severn. *Informes de la Construcción*, 23(223), 51-59.
- Wang, Y. (2018). Study on the Stability of a suspension bridge under different cable parameters. *Advances in Structural Engineering*, 1279-1289.

Anexos

Anexo 1. Guía de evaluación de vulnerabilidad estructural en puentes colgantes en zonas rurales

Anexo 2. Registro de información de inspección