

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA EL MONITOREO
DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES BASADO EN
INSAR Y VISIÓN POR COMPUTADORA**

TESIS DE INVESTIGACIÓN

PRESENTA:

M. C. GERMÁN MICHEL GUZMÁN ACEVEDO

DIRECTORES:

**DR. G. ESTEBAN VÁZQUEZ BECERRA
DR. JUAN ANTONIO QUINTANA RODRÍGUEZ**

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO AGOSTO DEL 2024



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



Dedicatoria

Este trabajo es dedicado con amor a mi esposa Lesly Acuña, mi familia Guzmán Acevedo, Frida, Ginger, Figaro y Hugo.

Agradecimientos

Le agradezco a CONAHCYT por proporcionarme la beca para culminar este trabajo de investigación (CVU: 709603). De igual forma, agradezco el apoyo brindado por Instituto Mexicano del Transporte, especialmente del Dr. Quintana. También, le doy las gracias al profe. Esteban Vázquez y a Ramón Gaxiola, por toda su ayuda durante mi formación académica. Por último, señalo mi gratitud al comité evaluador (Dr. Jesús Millán y Dr. Wenseslao Plata), Dr. García Armenteros, Dr. García Armenta y a mis amigos de posgrado.

Índice general

Resumen	XII
Abstract	XIII
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1 Objetivos específicos	3
1.4. Hipótesis	4
1.5. Preguntas de investigación	4
1.6. Metodología	4
1.7. Estructura	4
1.8. Referencias	6
2. Marco Teórico	9
2.1. Monitoreo de la salud estructural	9
2.1.1. Desplazamientos	10
2.1.2. Modos de vibrar	10
2.1.3. Monitoreo visual	11
2.2. Fundamentos de la Percepción Remota de Microondas	11
2.2.1. Señal electromagnética	11
2.2.2. Principio de adquisición	12
2.2.3. Sistema de imagen	14
2.2.4. InSAR	15
2.3. Referencias	16
3. Monitoreo Global con InSAR	18
3.1. Introducción	18
3.2. Puente El Carrizo	19
3.3. Metodología	20
3.3.1. Materiales	20
3.3.2. PS InSAR	21
3.4. Prueba de validación implementando antenas reflejantes	25
3.5. Resultados en el puente Carrizo	28
3.6. Conclusiones y discusiones	31
3.7. Referencias	32

4. Índice de riesgo	35
4.1 Introducción	35
4.2. Metodología	37
4.2.1. Materiales	37
4.2.2. Evaluación del riesgo con InSAR	37
4.2.2.1. Cálculo de límites	38
4.2.2.2. Probabilidad de riesgo	39
4.2.2.3. Curva de fragilidad	40
4.2.2.4. Índice de riesgo	42
4.3. Resultados	42
4.3.1. Desplazamientos del puente	42
4.3.2. Evaluación de riesgo	42
4.3.3. Validación de resultados utilizando un Modelo de Elemento Finito	45
4.4. Conclusiones y discusiones	48
4.5. Referencias	48
5. Monitoreo local de la fuerza de tensión en tirantes mediante cámara digital fija	52
5.1. Introducción	52
5.2. Puente Río Papaloapan	54
5.3. Metodología	55
5.3.1. Materiales	55
5.3.2. Estimación de la tensión de los tirantes sin medición de los parámetros mecánicos	56
5.3.3. Visión por computadora	60
5.4. Prueba de validación de la metodología para el cálculo de tensión en tirantes	62
5.5. Prueba con mesa vibratoria	64
5.6. Aplicación en el Puente Río Papaloapan	65
5.6.1. Resultados de la primera campaña de medición	65
5.6.2. Resultados de la segunda campaña de medición	68
5.7. Conclusiones y discusiones	73
5.8. Referencias	75
6. Monitoreo local de la fuerza de tensión en tirantes mediante cámara digital instalada sobre un UAV	78
6.1. Introducción	78
6.2. Metodología	79
6.2.1. Materiales	79
6.2.2. Determinación de la fuerza de tensión con UAV	79
6.3. Estabilidad UAV	82
6.4. Pruebas de validación con mesa vibratoria	85
6.5. Resultados en el Puente Río Papaloapan	90
6.6. Conclusiones y discusiones	93
6.7. Referencias	94

7. Capítulo 7. Monitoreo local para determinar frecuencias de vibrar del tablero a partir de una cámara digital fija	97
7.1. Introducción	97
7.2. Metodología	97
7.2.1. Materiales	97
7.2.2. Extracción de las frecuencias de los modos de vibrar	98
7.3. Campaña de medición en el Puente El Carrizo	99
7.4. Validación con Modelo de Elemento Finito	100
7.5. Conclusiones	101
7.6. Referencias	102
8. Conclusiones del monitoreo estructural basado en mediciones remotas	103
8.1. Conclusiones	103
8.2. Trabajos futuros y recomendaciones	106
Anexos 1. Algoritmo para determinar tensiones de tirantes con una cámara fija	107

Índice de Tablas

3.1	Características de la imagen IWS de Sentinel-1.	25
3.2	Diferencias resultantes de las mediciones InSAR.	28
3.3	Velocidad y desviación estándar en cada punto del puente.	31
4.1	Valores de probabilidad de riesgo correspondientes a la primera curva de fragilidad del Punto número 1.	43
4.2	Evaluación de riesgo en cada punto del puente.	45
5.1	Promedio de los cinco primeros modos de vibrar pertenecientes a los cables del Puente Río Papaloapan.	55
5.2	Características del instrumento empleado en las campañas de medición.	56
5.3	Cables analizados durante la prueba de validación.	63
5.4	Comparación de los resultados de tensión obtenidos mediante acelerómetro y gato hidráulico.	63
5.5	Resultados de la prueba controlada utilizando mesa vibratoria y cámara fija.	64
5.6	Cables analizados durante la primera campaña de medición en el Puente Río Papaloapan.	65
5.7	Resultados obtenidos en la primera campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (5 modos de vibrar).	67
5.8	Resultados obtenidos en la primera campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (n modos de vibrar).	67
5.9	Resultados obtenidos en la primera campaña de medición empleando cámara fija y gato hidráulico.	67
5.10	Resultados obtenidos en la segunda campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (primer segmento).	72
5.11	Resultados obtenidos en la segunda campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (segundo segmento).	72
5.12	Resumen de los resultados determinados en la segunda campaña de medición utilizando cámara fija y acelerómetro.	73
6.1	Resultados determinados en la prueba controlada implementando mesa vibratoria y UAV fijo.	86
6.2	Resultados determinados en la prueba controlada implementando mesa vibratoria y UAV volando.	88
6.3	Comparación de los resultados obtenidos sobre el Puente Río Papaloapan implementando UAV y acelerómetro.	92
6.4	Resultados obtenidos sobre el Puente Río Papaloapan implementando UAV y acelerómetro.	93

6.5	Comparación de los resultados obtenidos sobre el Puente Río Papaloapan implementando UAV y la tensión máxima de diseño.	93
7.1	Evaluación entre las frecuencias de vibrar definidas entre la cámara y el acelerómetro.	100
7.2	Evaluación entre las frecuencias de vibrar definidas entre el Modelo de Elementos Finito y el acelerómetro.	101

Índice de figuras

1.1	Diagrama de flujo de la metodología propuesta.	5
2.1	Ejemplo de modos de vibrar de un cable.	10
2.2	Ejemplo de una señal armónica (Tomado de (Meyer, 2023b)).	12
2.3	Ejemplo de una señal armónica en el plano complejo (Tomado de (Meyer, 2023b)).	13
2.4	Adquisición de la información en el terreno cubierto por un pixel (Tomado de (Meyer, 2023c)).	13
2.5	Interferencia de la señal reflejada en el terreno cubierto por un pixel (Tomado de (Meyer, 2023c)).	14
3.1	Vista longitudinal del Puente El Carrizo.	19
3.2	Puente El Carrizo: área dañada y de rehabilitación.	20
3.3	Punto estable dentro de un conjunto de imágenes (Tomado de (Meyer, 2023)).	21
3.4	Comportamiento de punto persistente dentro de un pixel (Tomado de (Meyer, 2023)).	21
3.5	Relación imágenes, línea base temporal y perpendicular (Tomado de (Meyer, 2023)).	22
3.6	Ajuste de los desplazamientos y el error producido por la topografía utilizando un plano bidimensional (Tomado de (Meyer, 2023)).	23
3.7	Reducción de fuentes de error al implementar puntos persistentes cercanos (Tomado de (Meyer, 2023)).	24
3.8	Ajuste de la red de puntos persistentes para obtener los desplazamientos finales (Tomado de (Meyer, 2023)).	24
3.9	Antena reflejante elaborada para el experimento controlado de validación.	27
3.10	Promedio de mapas de reflectividad.	27
3.11	Puntos persistentes encontrados en el Puente El Carrizo.	28
3.12	Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 1).	29
3.13	Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 2).	29
3.14	Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 3).	29
3.15	Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 4).	30
3.16	Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 5).	30
3.17	Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 6).	30
3.18	Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 7).	31
4.1	Metodología para calcular el índice de riesgo.	37
4.2	Desplazamiento simulado para explicación de la metodología.	38
4.3	Distribución estadística de los desplazamientos simulados.	38

4.4	Desplazamiento simulado con sus límites de 3 sigmas.	39
4.5	Ejemplo del concepto de probabilidad de riesgo.	40
4.6	Curva de fragilidad.	41
4.7	Curvas de fragilidad obtenidas al incrementar la velocidad de tendencia.	41
4.8	Desplazamiento del Punto número 1.	43
4.9	Ajuste de los desplazamiento pertenecientes al Punto número 1 considerando la Distribución Laplace.	43
4.10	Primera curva de fragilidad resultante del Punto número 1.	44
4.11	Curvas de fragilidad con incrementos de velocidad a partir del comportamiento resultante del Punto número 1.	44
4.12	Modelo de Elemento Finito del Puente El Carrizo.	45
4.13	Comparación de la primera curva de fragilidad entre los límites de desplazamiento.	46
4.14	Curvas de fragilidad calculadas a partir del límite propuesto.	47
4.15	Curvas de fragilidad calculadas a partir del límite de servicio.	47
4.16	Curvas de fragilidad calculadas a partir del límite de ruptura.	47
5.1	Puente Río Papaloapan.	55
5.2	Comportamiento de la desviación estándar del Tirante 1.	58
5.3	Comportamiento de la desviación estándar del Tirante 14.	58
5.4	Comportamiento de la desviación estándar al utilizar el promedio de la constante del Tirante 1.	58
5.5	Desviación estándar, tensión indirecta y tensión máxima de los tirantes correspondientes a la Semi-arpa 1.	59
5.6	Relación tirante y desviación estándar (Semi-arpa 1).	59
5.7	Metodología para determinar la tensión de los tirantes mediante visión por computadora.	60
5.8	Experimento en laboratorio con la mesa de vibración y cámara fija.	64
5.9	Instrumentación durante pruebas en campo.	66
5.10	Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T2S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).	68
5.11	Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T4S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).	69
5.12	Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T5S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).	69
5.13	Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T6S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).	70
5.14	Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T8S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).	70
5.15	Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T10S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).	71
5.16	Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T12S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).	71
6.1	Corrección de los desplazamientos del UAV.	81
6.2	UAV con acelerómetro montado en parte superior.	82
6.3	Prueba del UAV siendo afectado por viento.	82

6.4	Aceleración en el dominio de la frecuencia resultante por la inestabilidad del UAV en el eje x.	83
6.5	Aceleración en el dominio de la frecuencia resultante por la inestabilidad del UAV en el eje y.	83
6.6	Aceleración en el dominio de la frecuencia resultante por la inestabilidad del UAV en el eje z.	83
6.7	Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje x.	84
6.8	Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje z.	84
6.9	Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje x (dominio de la frecuencia).	84
6.10	Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje z (dominio de la frecuencia).	85
6.11	Pruebas controladas con la mesa vibratoria y el UAV.	86
6.12	Ruido producido por la cámara del UAV.	86
6.13	Ruido producido por la cámara del UAV (dominio de la frecuencia).	87
6.14	Desplazamiento de la mesa vibratoria capturada por el UAV fijo.	87
6.15	Desplazamiento de la mesa vibratoria capturada por el UAV fijo (dominio de la frecuencia).	87
6.16	Desplazamientos de la mesa vibratoria capturados por el UAV volando.	88
6.17	Desplazamientos de la mesa vibratoria capturados por el UAV volando (dominio de la frecuencia).	89
6.18	Desplazamientos de la mesa vibratoria utilizando las correcciones propuestas.	89
6.19	Desplazamientos de la mesa vibratoria utilizando las correcciones propuestas (dominio de la frecuencia).	89
6.20	Resultados dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 14.	91
6.21	Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 12.	91
6.22	Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 10.	91
6.23	Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 5.	92
6.24	Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 4.	92
7.1	Diagrama de flujo para determinar las frecuencias de los modos de vibrar.	98
7.2	Prueba para determinar la frecuencia de vibrar del tablero.	99
7.3	Desplazamientos de la sección atirantada del Puente El Carrizo (píxeles).	100
7.4	Frecuencias de vibrar de la sección atirantada del Puente El Carrizo.	100
A.1	Programa 1	108
A.2	Programa 2	108
A.3	Programa 3	109
A.4	Programa 4	109
A.5	Programa 5	110
A.6	Programa 6	110
A.7	Programa 7	110

Resumen

Uno de los principales desafíos de México en términos de crecimiento y desarrollo económico, es el mantener su infraestructura de transporte terrestre trabajando en condiciones adecuadas de operación, para esto es requerido una metodología que permita monitorear óptimamente el comportamiento de los puentes desde el momento de su construcción hasta el fin de su vida útil. El beneficio de estas acciones es mejorar la toma de decisiones durante el proceso de mantenimiento y rehabilitación, así como detectar daños de forma oportuna para salvaguardar la integridad de los usuarios. Por lo tanto, este trabajo de investigación propuso el desarrollo, validación e implementación de una metodología alterna de monitoreo estructural en puentes basada en mediciones remotas respaldadas por las disciplinas de Geodesia y Geomática. De forma general, la metodología consiste en utilizar imágenes satelitales adquiridas por la técnica de Radar de Apertura Sintética (SAR) para determinar y evaluar los desplazamientos semi-estáticos de los puentes, mientras que, al momento de detectar algún comportamiento fuera de lo normal se desencadena el empleo de video-imágenes y visión por computadora, con el objetivo de determinar la tensión de los tirantes y las frecuencias de los modos de vibrar pertenecientes al tablero de la estructura. Las imágenes satelitales fueron proporcionadas por la misión Sentinel-1, así como los videos fueron adquiridos por un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV, por sus siglas en inglés) de la marca DJI modelo Phantom 4 pro y un celular iPhone 12 pro. El procesamiento de los datos fue llevado a cabo por el software SARPROZ, las librerías OpenCV, Numpy, matplotlib y OS en el lenguaje de Python. Las estructuras seleccionados para ser analizadas fueron el Puente El Carrizo (Concordia, Sinaloa) y Río Papaloapan (Cosamaloapan, Veracruz), en el caso de la primera, se consideró para realizar las mediciones con InSAR (Interferometría de Radar de Apertura Sintética) y la identificación de las frecuencias de sus modo de vibrar con la cámara fija; por otro lado, en el Puente Río Papaloapan se desarrollaron las pruebas para determinar la tensión de los tirantes a partir de visión por computadora usando cámara fija y el UAV. Los resultados de las mediciones indicaron precisiones de 2 milímetros y de 0.002 Hz, de acuerdo con InSAR y los procesamientos de visión por computadora, respectivamente. A partir de esta información se concluye que la metodología desarrollada cumple en términos de precisión para monitorear tanto los parámetros dinámicos como semi-estáticos de los puentes. Adicionalmente, se establece que la sección del doble voladizo del Puente El Carrizo y los cables analizados en el Puente Río Papaloapan, se encuentran en condiciones óptimas de operación, sin embargo, se recomienda que este procedimiento se realice continuamente en estas estructuras y en el resto de las obras de ingeniería que conforman a las carreteras del país.

Abstract

One of the main challenges of Mexico in terms of economic development and growth is to maintain its land transportation infrastructure working in adequate operating conditions. For this, a methodology is required for monitoring the behavior of the bridges from the moment of their construction until the end of their useful life. The benefit of these actions is to improve decision-making during the maintenance and rehabilitation process, as well as detecting damage to safeguard the integrity of users. Therefore, this research work proposed the development, validation, and implementation of an alternative structural monitoring methodology in bridges based on remote measurements supported by the disciplines of Geodesy and Geomatics. In general, the methodology consists of using satellite images acquired by the Synthetic Aperture Radar (SAR) technique to determine and evaluate the semi-static displacements of the bridges. Subsequently, the implementation of video images and computer vision was considered to determine the tension of the cables and the frequencies of the vibrating modes belonging to the deck of the structure. The satellite images were provided by the Sentinel-1 mission, as well as the videos were acquired by a DJI Phantom 4 pro Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and an iPhone 12 pro cell phone. Data processing was carried out by the SARPROZ software, OpenCV, Numpy, matplotlib, and OS libraries in the Python language. The selected study cases in Mexico were the El Carrizo bridge (Concordia, Sinaloa) and Río Papaloapan (Cosamaloapan, Veracruz); in the case of the first, it was considered to perform measurements with InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) and the identification of the frequencies of their vibrating modes with the fixed camera. On the other hand, on the Río Papaloapan bridge, tests were developed to determine the tension of the cables through computer vision implementing a fixed camera and the UAV. Measurement results indicate accuracies of 2 millimeters and 0.002 Hz, according to InSAR and computer vision processing, respectively. From this information, it is concluded that the developed methodology accomplishes in terms of precision to monitor both the dynamic and semi-static parameters of the bridges. Additionally, it is established that the double cantilever section of the El Carrizo bridge and the cables analyzed in the Río Papaloapan bridge are in optimal operating conditions; however, it is recommended that this procedure be carried out continuously in these structures and the rest of the engineering structures within the country's roads.

Capítulo 1. Introducción

La infraestructura carretera juega un papel importante en el desarrollo económico de un país, siendo necesario el mantenerla en condiciones óptimas de operación y que adecuadamente conecte las principales zonas de la región. Dentro de este sistema de autopistas, los puentes son elementos trascendentales, ya que permiten sobrepasar diversas zonas caracterizadas por accidentes topográficos. A pesar de que estas estructuras son construidas para trabajar eficientemente durante un largo periodo de tiempo, los daños pueden surgir en cualquier etapa de su vida útil. En las últimas dos décadas, el colapso de puentes se ha convertido en una situación constante a nivel mundial, por ejemplo, en el año 2001, el Puente Hintze Ribeiro (Portugal) se derrumbó por una falla en la pila número 4 ocasionando 59 pérdidas humanas (Sousa y Bastos, 2013); en agosto del 2018, el Puente Morandi localizado en Génova Italia colapsó ocasionando la muerte de 43 personas y dejando 11 heridos (Milillo et al., 2019); en Reino Unido el Puente Tadcaster presentó un colapso parcial en una de sus columnas (Selvakumaran et al., 2018). De igual forma, estos eventos se han presentado en el estado de Sinaloa, en el año 2018, el Puente El Carrizo ubicado en las afueras de la ciudad de Los Mochis falló debido a las lluvias producidas por la tormenta tropical 19-E (El Debate, 2018); en el año 2021, el Puente El Quelite con ubicación en la carretera libre Culiacán-Mazatlán colapsó por el incremento en el gasto del río que produjo el Huracán Nora (El Heraldo de México, 2021). Considerando estos acontecimientos, se demuestra la necesidad de tener conocimiento del estado en que se encuentran los puentes, además de contar con la capacidad de identificar oportunamente las estructuras que no cumplen con los estándares de operación. Es por esta razón, que en la literatura científica los trabajos se han centrado en detección de daños (Valtierra-Rodríguez et al., 2023), inspecciones visuales (Jeong et al., 2018), pronosticar futuros escenarios (Qu et al., 2024), y monitoreo estructural detallado (Carrion et al., 2017).

Comúnmente, la manera más precisa para determinar el desempeño estructural de los puentes es a través del monitoreo estructural, lo cual se logra utilizando acelerómetros (Kaloop et al., 2015), receptores del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) (Xi et al., 2021), extensómetros (Quintana et al., 2021), entre otros sensores de medición. Particularmente en México, en términos prácticos, se sigue una estrategia para determinar la condición estructural de los puentes, conformada de dos etapas; inicialmente, Caminos y Puentes Federales (CA-PUFE) y la Dirección General de Carreteras (DGC) llevan a cabo las evaluaciones a través de inspecciones visuales cada dos años. La información recolectada se guarda en una base de datos ya sea el Sistema de Puentes de México (SiPuMex) o el sistema de administración de puentes (SIAP). Cada estructura se califica con un número que

indica su grado de daño y de acuerdo con el presupuesto asignado se desarrolla un plan de acción para la reparación de cada puente, considerando como prioritarios los más críticos (Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, 2018). Por otro lado, basado en las inspecciones visuales, se toma la decisión en algunos casos de efectuar estudios más detallados, los cuales pueden incluir, pruebas de carga o monitoreo estructural. El primer tipo, son evaluaciones sobre la estructura basadas en los códigos de diseño, las cuales pueden ser estáticas o dinámicas (Vazquez-Ontiveros et al., 2021). El segundo tipo se enfoca en analizar los parámetros estructurales de los puentes en el tiempo a través del monitoreo periódico o permanente de las estructuras (Hernández et al., 2018; Quintana et al., 2018). En ambos casos, los sensores presentan ventajas y desventajas durante el proceso de evaluación del desempeño estructural de un puente, sin embargo, para que proporcionen datos confiables deben ser instalados directa y puntualmente sobre la estructura, lo cual representa una limitante para analizar una mayor cantidad de elementos.

La presente tesis de investigación propone el desarrollo de una metodología para monitorear la salud estructural de puentes basada en mediciones remotas, así como procedimientos para la estimación de la fuerza de tensión en tirantes de puentes a través de video-imágenes (Guzman-Acevedo et al., 2022), calcular índices de riesgo estructural a partir de series de tiempo resultantes de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas en inglés) (Guzman-Acevedo et al., 2023, 2024a), y la reducción de fuentes de error al determinar frecuencias de vibrar con Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) (Guzman-Acevedo et al., 2024b).

1.1. Planteamiento del problema

La Red Federal de Carreteras de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) está compuesta por 9 mil 798 puentes (SICT, 2024), a los cuales se programan inspecciones visuales cada dos años, sin embargo, las inspecciones visuales son ambiguas pues dependen de las capacidades sensoriales y la experiencia del inspector. También es importante agregar que la solución no es monitorear de forma detallada todos los puentes; de acuerdo a la experiencia obtenida por el grupo de monitoreo del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), para una estructura de 50 metros de largo con 2 o hasta 3 claros, se necesitarían 5 días, en los cuales se debe instalar los sensores de medición, recolectar datos, procesar la información y evaluar los resultados; por lo que tomaría aproximadamente 4.4 años evaluar los 323 puentes que solamente se localizan en el estado de Sinaloa, siendo poco práctico y altamente costoso. Por lo tanto, a pesar de que se estén realizando evaluaciones periódicas en los puentes, es necesario proponer algunas metodologías alternas para mejorar el proceso.

En la actualidad, la percepción remota brinda una amplia gama de metodologías de medición, una de ellas es InSAR, la cual tiene la capacidad de determinar desplazamiento de áreas extensas de terreno a partir de dos imágenes satelitales SAR (Radar de Apertura Sintética) con una precisión milimétrica (Ferretti et al., 2007). Al implementar imágenes adquiridas mediante un sistema activo y con longitud de onda en el rango de las microondas, la señal electromagnética emitida por los senso-

res penetra las nubes y permiten obtener información en cualquier momento del día. Estas características, hacen a InSAR una herramienta idónea para el monitoreo del comportamiento semi-estático de las estructuras. Por otro lado, las cámaras digitales tienen la capacidad de analizar parámetros estructurales dinámicos debido a que alcanzan resoluciones debajo del milímetro, frecuencias de muestreo relativamente altas (30 a 120 Hz) y efectúan las mediciones sin perturbar los elementos de interés (Feng et al., 2017). Considerando estos dos instrumentos es posible desarrollar una evaluación completa de la súper y subestructura perteneciente a los puentes.

1.2. Justificación

Debido a la gran cantidad de puentes que existen en México (SICT, 2024) y a la dificultad que representa elaborar un monitoreo estructural local en cada elemento mediante instrumentos de alta precisión como receptores GNSS (Xi et al., 2021) y acelerómetros (Kaloop et al., 2015), el número de puentes en los que se están desarrollando campañas constantes de medición es bajo. Por lo que, el desarrollo de una metodología alternativa con la virtud de estudiar los puentes remotamente, permite adquirir información periódicamente, extraer el comportamiento semi-estático y dinámico, optimizar la toma de decisiones en la planeación y ejecución del mantenimiento preventivo, así como en la realización de pruebas específicas a las estructuras. De esta manera, se pueden prevenir daños a la infraestructura carretera, lo cual conlleva a un ahorro económico por no requerir cierre del tráfico vehicular ni la reparación de emergencia en puentes, además de salvaguardar la integridad de los usuarios.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de la presente investigación consiste en desarrollar una metodología que permita examinar los puentes de la infraestructura carretera del país, a través de InSAR para detectar estructuras en condiciones desfavorables; además, identificar puntos críticos de inspección y criterios de evaluación en puentes a partir de video-imágenes obtenidas por una cámara digital y analizados mediante visión por computadora.

1.3.1. Objetivos específicos

- Implementar la metodología InSAR para detectar cambios estructurales en puentes.
- Desarrollar un análisis estadístico donde se involucre información semi-estática de los puentes para determinar casos fuera de lo normal que necesiten ser estudiados con un mayor detalle.
- Desarrollar una metodología para determinar la tensión en cables a partir de imágenes capturadas por una cámara digital instalada sobre un trípode y también montada en un Vehículo Aéreo no Tripulado.

- Evaluar la metodología propuesta para calcular la tensión de los tirantes sin usar información de sus parámetros mecánicos.
- Elaborar un algoritmo para determinar las frecuencias de vibrar del tablero de un puente a través de video-imágenes.

1.4. Hipótesis

Es factible determinar y evaluar parámetros estructurales en los puentes que pertenecen al entorno de transporte terrestre con una precisión milimétrica mediante InSAR y visión por computadora.

1.5. Preguntas de investigación

¿Qué desplazamientos estructurales puede detectar InSAR en los puentes con imágenes libres?

¿Cuál es la precisión de InSAR para detectar desplazamientos en puentes?

¿Se puede sustituir un sistema completo de monitoreo por uno basado en imágenes capturadas por un UAV?

¿Cuál es la precisión y resolución de video-imágenes para detectar frecuencias de vibrar en puentes?

1.6. Metodología

En el presente trabajo de investigación se propone desarrollar una metodología compuesta para monitorear los puentes que pertenezcan a la infraestructura mexicana de transporte. Esta metodología se forma de dos secciones (Figura 1.1); la primera denominada global, cuya finalidad es evaluar a través de InSAR (basada en imágenes satelitales SAR) el comportamiento semi-estático de las estructuras. En el caso de que los desplazamientos semi-estáticos producidos en los puentes sobrepasen los límites de un comportamiento estándar, la segunda sección de la metodología se desencadena consistiendo en un monitoreo local. Esta etapa contempla adquirir videos mediante cámaras digitales para analizar los puentes, pero con una mayor resolución espacial, frecuencia de muestreo y la capacidad de evaluar simultáneamente diferentes zonas de la estructura.

1.7. Estructura

Este documento se divide en un total de 8 capítulos, los cuales se describen de forma general a continuación: 1) Introducción al tema de investigación. 2) Definición de algunos conceptos teóricos sobre Interferometría de Radar de Apertura Sintética y el análisis estructural de obras de ingeniería como puentes. 3) Monitoreo global con InSAR cubriendo la validación controlada mediante una antena reflejante, así como su aplicación en el Puente El Carrizo. 4) Cálculo del índice de riesgo de la estructura mediante desplazamientos semi-estáticos históricos y estadística. 5) Monitoreo local con cámara digital fija, se basa en las pruebas controladas en laboratorio, pruebas en el Puente Río Papaloapan y la metodología planteada para reducir fuentes de

error en el cálculo de la tensión de tirantes. 6) Monitoreo local con cámara digital instalada en un UAV, contempla las pruebas desarrolladas con una mesa vibratoria y la experimentación en el Puente Río Papaloapan. 7) Identificación de las frecuencias de los modos de vibrar provenientes del tablero del Puente El Carrizo a través de visión por computadora. 8) Conclusiones generales del trabajo.

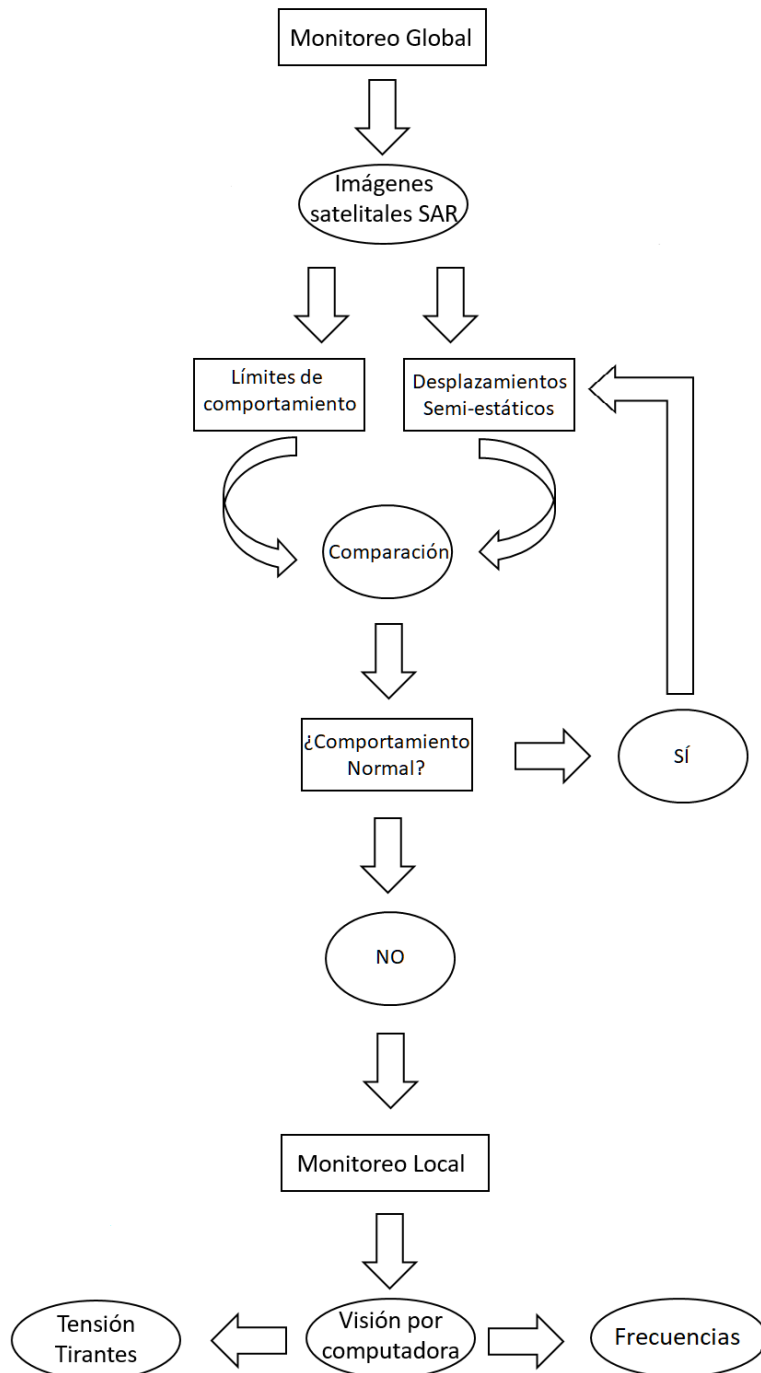


Figura 1.1: Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

1.8. Referencias

Carrion, F. J., Quintana, J. A., & Crespo, S. E. (2017). SHM of a stayed bridge during a structural failure, case study: the Rio Papaloapan Bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(2), 139-151.

Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, (2018). Manual para inspecciones de puentes.

El Debate, (2018). Caos por cierre en la carretera México 15. Publicación en línea. Recuperado de <https://www.debate.com.mx/losmochis/carretera-mexico-15-puentes-poblado-6-valle-carrizo-ahome-inundaciones-20180921-0053.html>

El Heraldo de México, (2021). Video: Así fue el impactante desplome del puente El Quelite en Sinaloa. Publicación en línea. Recuperado de <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2021/9/2/video-asi-fue-el-impactante-desplome-del-puente-el-quelite-en-sinaloa-331790.html>

Feng, D., Scarangelo, T., Feng, M. Q., & Ye, Q. (2017). Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor. *Measurement*, 99, 44-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.020>

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19. The Netherlands: ESA Publications.

Guzman-Acevedo, G. M., Quintana-Rodriguez, J. A., Vazquez-Becerra, G. E., Martinez-Trujano, L. A., Carrion-Viramontes, F. J., & Garcia-Armenta, J. (2022). Tension Force Estimation of Cable-Stayed Bridges Based on Computer Vision Without Need of Direct Measurement of Mechanical Parameters of the Cables. Available at SSRN 4267741. Under Review in *Journal of Civil Structural Health Monitoring* (Springer).

Guzman-Acevedo, G. M., Quintana-Rodriguez, J. A., Gaxiola-Camacho, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Torres-Moreno, V., & Monjardin-Quevedo, J. G. (2023). The Structural Reliability of the Usumacinta Bridge Using InSAR Time Series of Semi-Static Displacements. *Infrastructures*, 8(12), 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8120173>

Guzman-Acevedo, G. M., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana-Rodriguez, J. A., Gaxiola-Camacho, J. R., Anaya-Diaz, M., Mediano-Martinez, J. C., & Viramontes, F. J. C. (2024a, May). Structural health monitoring and risk assessment of bridges integrating InSAR and a calibrated FE model. In *Structures* (Vol. 63, p. 106353). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106353>

Guzman-Acevedo, G. M., Quintana-Rodriguez, J. A., Vazquez-Becerra, G. E., & Garcia-Armenta, J. (2024b). A reliable methodology to estimate cable tension force in cable-stayed bridges using Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Measurement*,

229, 114498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114498>

Hernández Figueroa, J., Gasca Zamora, H., Martínez Trujano, L., Carrión Viramontes, F., Quintana Rodríguez, J. (2018). Integración e implementación de la plataforma IMT Monitorem en el puente Mezcala, Publicación Técnica 520 del IMT, Sanfandila, Qro.

Jeong, Y., Kim, W., Lee, I., & Lee, J. (2018). Bridge inspection practices and bridge management programs in China, Japan, Korea, and US. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 3(2), 126-135. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705314.2018.1461548>

Kalooop, M. R., & Hu, J. W. (2015). Stayed-cable bridge damage detection and localization based on accelerometer health monitoring measurements. *Shock and Vibration*, 2015, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/102680>

Milillo, P., Giardina, G., Perissin, D., Milillo, G., Coletta, A., & Terranova, C. (2019). Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, 11(12), 1403. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11121403>

Qu, G., & Sun, L. (2024). Performance prediction for steel bridges using SHM data and bayesian dynamic regression linear model: a novel approach. *Journal of Bridge Engineering*, 29(7), 04024044. DOI: <https://doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-6435>

Quintana Rodríguez, J., Carrión Viramontes, F., Martínez Trujano, L., Anaya Díaz, M., Hernández Figueroa, J., Gasca Zamora, H., Valenzuela Delgado, J., Guzmán Hernández, A. (2018). Actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del Puente Río Papaloapan, Publicación Técnica 524 del IMT, Sanfandila, Qro.

Quintana, J. A., Carrión, F. J., Anaya, M., Guzmán, G. M., Hernández, J. A., Martínez, L. A. & Gasca, H. M. (2021, March). Monitoring and evaluation of a highway bridge during major rehabilitation. In *International Workshop on Civil Structural Health Monitoring* (pp. 271-287). Cham: Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-74258-4_19.

Selvakumaran, S., Plank, S., Geiß, C., Rossi, C., & Middleton, C. (2018). Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73, 463-470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.004>.

SICT, (2024). Puentes en la Red Federal de Carreteras. Publicación en línea. Recuperado de <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/puentes-de-la-red-federal-de-carreteras/>

Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-13-659-2013>, 2013.

Valtierra-Rodriguez, M., Machorro-Lopez, J. M., Amezquita-Sanchez, J. P., Dominguez-Gonzalez, A., Alvarez-Junco, S., & Gasca-Zamora, H. M. (2023). A new damage indicator based on homogeneity and wireless accelerometers for evaluating the structural condition of a cable-stayed bridge. *Developments in the Built Environment*, 14, 100166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100166>

Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, J. R. (2021). Implementation of PPP-GNSS measurement technology in the probabilistic SHM of bridge structures. *Measurement*, 173, 108677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108677>

Xi, R., He, Q., & Meng, X. (2021). Bridge monitoring using multi-GNSS observations with high cutoff elevations: A case study. *Measurement*, 168, 108303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108303>

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Monitoreo de la salud estructural

El principio del monitoreo de la salud estructural consiste en determinar el comportamiento de las obras de ingeniería a través del tiempo. Cambios en el desempeño de una estructura pueden representar un daño potencial que se debe de considerar al momento de tomar decisiones para su mantenimiento o rehabilitación. Los parámetros a los cuales comúnmente se les da seguimiento son las deflexiones, frecuencias de los modos de vibrar, inclinación y deformaciones (Martínez, 2023). La adquisición de estos valores se efectúa mediante diferentes tipos de sensores, los más utilizados son acelerómetros, galgas extensiométricas, sensores de temperatura, inclinómetros, receptores GNSS y sensores de desplazamiento. Estos instrumentos requieren tener contacto directo con la estructura de interés, sin embargo, actualmente se están incorporando sensores de diferente índole que tienen la capacidad de adquirir información remotamente en zonas de difícil acceso.

Sin importar el tipo de instrumento que se implemente para analizar el comportamiento estructural, se debe contemplar la configuración metrológica adecuada para poder muestrear los valores de interés correctamente. Como elementos a considerar se tiene la frecuencia de muestreo, resolución, y tiempo de medición. Estipular la configuración de la frecuencia de adquisición es indispensable para determinar la clase de comportamiento que se puede estudiar, por ejemplo, si la frecuencia es de 60 Hz, cierto desempeño dinámico puede ser capturado. No obstante, si la periodicidad de las mediciones es de una vez al mes, solamente fenómenos que se desarrollan lentamente pueden ser analizados, referido al proceder semi-estático. Para seleccionar el número de mediciones por segundo que el instrumento debe llevar a cabo, la regla básica es aplicar la teoría de Nyquist-Shannon, la cual define que para la adecuada caracterización de una señal de frecuencia f es necesario realizar mediciones con intervalos de al menos $2f + 1$ (Nyquist, 1928).

En el caso de la resolución, se refiere a la magnitud mínima que puede ser detectada por el instrumento, en términos de desplazamiento este valor puede ser, por ejemplo, milímetro o centímetro. Algunos investigadores consideran de igual forma la teoría de Nyquist-Shannon para establecer este valor, es decir, la resolución del instrumento debe de ser mínimo la mitad de la magnitud de interés (Guzman-Acevedo et al., 2024).

Por último, el tiempo de medición es relevante debido a que permite estudiar un fenómeno de manera parcial o total, además de que en ocasiones precisa la resolución de los resultados. Usualmente, para analizar el comportamiento dinámico de la estructura se utilizan sesiones de medición que duran un par de minutos, horas

y algunos días completos, porque a pesar de que una frecuencia de adquisición alta permite definir de manera detallada el comportamiento de una estructura, surge el problema de la capacidad de almacenamiento, que es una limitante a considerar. Así mismo, en el ámbito dinámico se debe tomar en consideración que, en el dominio de la frecuencia, la resolución de los resultados es proporcional al inverso del tiempo medido en segundos (NTI Audio, 2024). Por otro lado, en los estudios de tipo semi-estático, no existe tanto inconveniente con respecto al resguardo de la información debido a que las mediciones duran años, pero el muestreo es bajo.

2.1.1. Desplazamientos

Debido a que las estructuras son afectadas continuamente por un conjunto de fuerzas aplicadas tanto en dirección vertical como horizontal, al transmitir la carga desde el punto donde se inició hasta los cimientos, la estructura responde con desplazamientos. En la literatura se clasifican los desplazamientos estructurales en semi-estáticos y dinámicos. Los desplazamientos semi-estáticos se conforman por desplazamientos lentos y de periodo amplio ocasionados por socavación, subsidencia, efectos térmicos, pérdida de rigidez y deterioros en la estructura. En el caso de los desplazamientos dinámicos, son producidos por fenómenos desarrollados en un periodo corto, por ejemplo, la aplicación de carga vehicular, el viento, incluso eventos sísmicos (Vazquez-Becerra et al., 2017).

2.1.2 Modos de vibrar

Los desplazamientos que generan las estructuras se caracterizan por su forma y frecuencia, los cuales dependen de la geometría, masa, rigidez y condiciones de frontera. En el caso del modo de vibrar, es un patrón de oscilación periódica de la estructura, por ejemplo, en la Figura 2.1 se presentan los 4 primeros modos de vibrar de una cuerda sujeta en ambos extremos, cada modo de vibrar se diferencia por el número de ondas que lo definen, entre mayor sea el número del modo de vibrar, menor es la magnitud de las oscilaciones (Guzman-Acevedo et al., 2024).

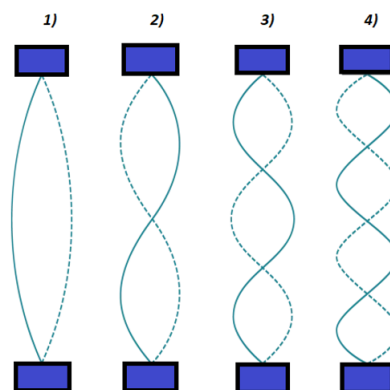


Figura 2.1: Ejemplo de modos de vibrar de un cable.

En esa misma línea, la frecuencia de vibrar establece los ciclos por segundo desarrollados por los diferentes modos de vibrar, en el ejemplo del cable, la frecuencia

fundamental es la correspondiente a la frecuencia del primer modo de vibrar, mientras que el resto de las frecuencias son armónicas de ésta, es decir, son múltiplos de la frecuencia fundamental (la frecuencia del segundo modo de vibrar es igual a multiplicar la frecuencia fundamental por dos, la frecuencia del tercer modo de vibrar es resultado de multiplicar la frecuencia del primer modo de vibrar por tres, el resto de las frecuencias se define de la misma forma) (Georgia State University, 2024). Sin embargo, a diferencia de un tirante, un puente es una estructura más compleja, por lo que, no presentan el mismo comportamiento en relación con las frecuencias armónicas.

2.1.3. Monitoreo visual

El monitoreo visual es una metodología emergente, la cual utiliza sensores que consiguen información del elemento de interés de forma remota extrayendo información a partir de video-imágenes. El sistema de sensores visuales típicamente contempla una video cámara, un lente para el zoom, y una computadora (Feng et al., 2017; Khuc y Catbas, 2017; Kim et al., 2013). Es importante mencionar que es necesario un software que sea capaz de procesar las imágenes para detectar objetivos artificiales o naturales sobre la estructura. Este sistema tiene la gran ventaja de ser fácil de operar y tener la capacidad de medir desplazamientos de varios elementos con una sola cámara (Feng et al., 2017).

2.2. Fundamentos de la Percepción Remota de Microondas

La percepción remota se define como la ciencia que permite realizar evaluaciones sobre ciertos objetos analizando su interacción con respecto al espectro electromagnético, desarrollando las mediciones sin tener contacto físico entre el sensor y el elemento de interés. En ocasiones, la adquisición de información es afectada por las condiciones ambientales, por ejemplo, lluvia y nubosidad, esto depende de la longitud de onda que se empleó (Woodhouse, 2017). En el caso del rango de microondas, es decir, de 1 mm a 1 m, presenta un buen desempeño con las diferentes condiciones atmosféricas, por lo tanto, se puede obtener información en cualquier condición climatológica (Meyer, 2023a). En este trabajo de investigación se emplea la banda C de microondas caracterizada por tener una longitud de onda de 5.6 cm (Flores-Anderson et al., 2019), la finalidad de implementar percepción remota en el rango mencionado es para determinar los desplazamientos que sufre una estructura como los puentes a través del tiempo.

2.2.1. Señal electromagnética

La radiación electromagnética es una señal periódica que presenta tanto un campo eléctrico como uno magnético. Además, cuenta con las siguientes características (Meyer, 2023b):

- Longitud de onda: distancia recorrida por la señal en un ciclo.
- Frecuencia: número de ciclos realizados por segundo.

- Polarización: orientación del plano eléctrico de la señal pudiendo ser horizontal o vertical.
- Fase de la señal: ángulo medido en el sentido contrario de las manecillas del reloj al desenvolver la onda, con un rango de 0 a 2π .

Comúnmente una señal senoidal se representa con la siguiente ecuación (Meyer, 2023b):

$$\Psi(t) = A * \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (2.1)$$

Donde A es la amplitud, f la frecuencia y φ_0 la fase inicial. Estos parámetros se ilustran en la Figura 2.2.

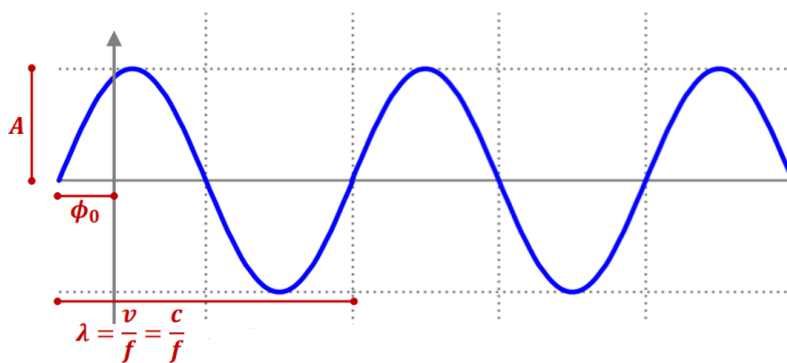


Figura 2.2: Ejemplo de una señal armónica (Tomado de (Meyer, 2023b)).

También se puede definir la señal a través de los números complejos con la siguiente ecuación (Meyer, 2023b).

$$z = re \{z\} + j * im \{z\} \quad (2.2)$$

Siendo z la amplitud de la señal compuesta de la parte real $re \{z\}$ en el eje horizontal y el porcentaje imaginario $im \{z\}$ en la componente vertical. Adicionalmente, se considera que el valor de la fase es igual al arco tangente de la división entre la componente imaginaria y real. La Figura 2.3 muestra el sistema de la señal en notación de números complejos.

2.2.2. Principio de adquisición

El principio de adquisición de las imágenes satelitales de interés contempla un sistema activo instalado sobre una plataforma que orbita la Tierra, el cual emite una señal electromagnética en el rango de las microondas, cuya trayectoria cubre el espacio y atmósfera, hasta incidir con la superficie terrestre y diversos objetos. En este punto, existe una interacción entre la señal y los objetos físicos definida como conservación de la energía, la cual indica la relación entre la energía recibida, absorbida, reflejada y refractada. De esta forma, solamente una porción de señal emitida regresa al sensor para la generación de las imágenes. En la reflectancia es importante el tipo de superficie, pudiendo ser lisa, rugosa, borde y difusa. La superficie lisa no refleja información con dirección al sensor, la rugosa genera una dispersión de la señal

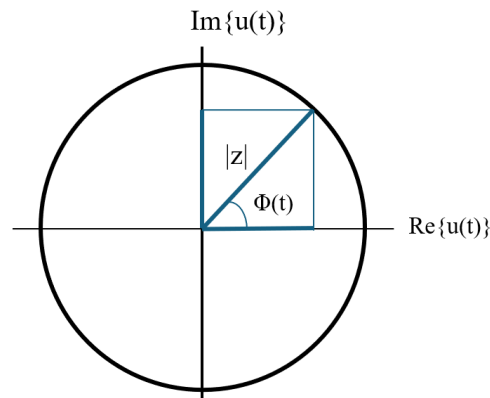


Figura 2.3: Ejemplo de una señal armónica en el plano complejo (Tomado de (Meyer, 2023b)).

en diferentes trayectorias, la superficie de borde ocasiona rebotes dobles y la difusa ocasiona reflectividad de una serie de elementos (Flores-Anderson et al., 2019). Considerando la representación de la señal recibida de regreso por el sensor montado en el satélite, cada pixel cuenta con un valor de amplitud y fase de la señal, por lo que, la imagen resultante es de tipo compleja (Flores-Anderson et al., 2019). Debido a que cada pixel cubre un área de terreno específico, por ejemplo, la misión Sentinel-1 tiene una resolución espacial de 5x20 m (Agencia Espacial Europea, 2023), el resultado de sus valores es igual a la interferencia de los ecos emitidos por cada uno de los objetos dentro de esta área (Meyer, 2023c). La Figura 2.4 muestra un ejemplo de la superposición de las señales para un solo pixel. La combinación de ondas indica una superposición entre dos o más señales involucradas, al manejar el plano complejo descrito, la interferencia es igual a una sumatoria de vectores (Flores-Anderson et al., 2019). La Figura 2.5 ilustra el comportamiento de la señal reflejada por el terreno cubierto por un pixel, es por esto, que el comportamiento de la fase dentro de una imagen satelital tiene valores aleatorios parecidos a ruido.

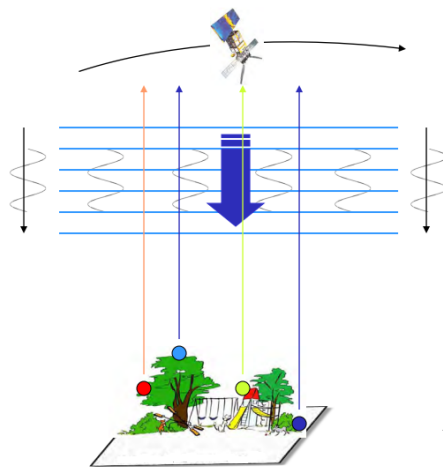


Figura 2.4: Adquisición de la información en el terreno cubierto por un pixel (Tomado de (Meyer, 2023c)).

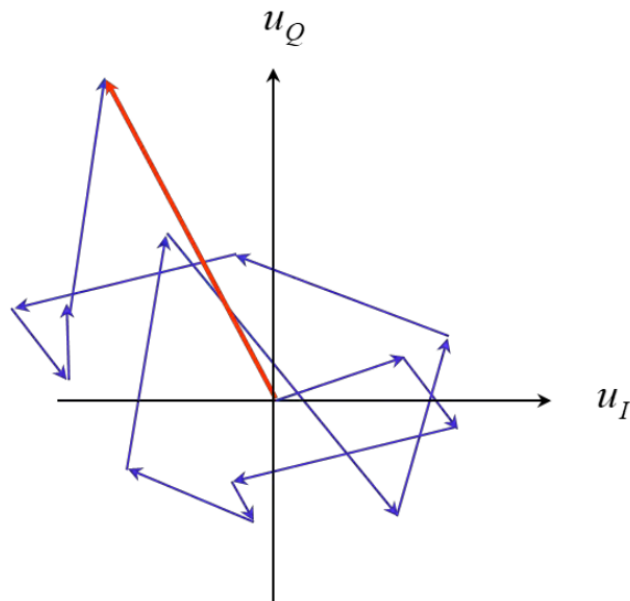


Figura 2.5: Interferencia de la señal reflejada en el terreno cubierto por un pixel (Tomado de (Meyer, 2023c)).

Por la manera en que se definen los valores de fase en cada imagen es importante considerar la coherencia, la cual se conceptualiza como un indicador de que la diferencia de fase entre dos imágenes complejas de tipo SAR es constante a través del tiempo o espacio (Meyer, 2023b). De esta forma, se puede establecer si las imágenes de interés son buenas candidatas para desarrollar un interferograma. El motivo de esto es que la coherencia señala que el patrón de ruido se mantiene igual en ambas imágenes, por lo que, la información de interés puede ser extraída al eliminar estos efectos no deseados. La magnitud de la coherencia cubre el rango de 0 a 1, siendo 0 una coherencia nula, mientras que 1 resulta una coherencia total (Meyer, 2023b). Para estimar la coherencia entre dos imágenes complejas SAR, U_1 y U_2 , es necesario implementar la siguiente ecuación (Meyer, 2023b).

$$|\hat{y}[i,k]| = \frac{|\sum_W U_1[i,k] \cdot U_2^*[i,k]|}{\sqrt{\sum_W |U_1[i,k]|^2 \cdot \sum_W |U_2[i,k]|^2}} \quad (2.3)$$

Donde W es una ventana con el centro en el pixel $[i,k]$ y el símbolo $*$ representa una conjugación compleja.

2.2.3. Sistema de imagen

La adquisición de las imágenes SAR se desarrolla manteniendo una inclinación con respecto a la vertical, siendo denominada vista lateral compleja (SLC, por sus siglas en inglés). Con esta metodología es posible detectar los diferentes objetos en la dirección de rango, es decir, perpendicularmente a la trayectoria de satélite (dirección azimutal) (Flores-Anderson et al., 2019). Sin embargo, debido a las complicaciones de utilizar un pulso lo suficientemente corto y con la potencia necesario, los radares utilizan una señal lineal de frecuencia modulada. Esto permite, transmitir señal

codificada en frecuencia de longitud, recibir eco codificado en frecuencia, y comprimir la señal codificada en frecuencia mediante una operación de decodificación llamada filtrado coincidente, por esta razón, la resolución en la dirección de rango es representada como (Meyer, 2023d):

$$\rho_R = \frac{c}{2W_p} \quad (2.4)$$

Donde c es la velocidad de la luz y W_p es el ancho de banda de la señal transmitida. Por otro lado, la resolución azimutal para un radar de apertura real se expresa de la siguiente forma (Meyer, 2023e):

$$\rho_a = \frac{R\lambda}{L} \quad (2.5)$$

Donde R es la distancia entre el radar y la superficie reflejante, mientras que L es la longitud del radar.

Por ejemplo, teniendo un radar con una longitud de 10 m, una distancia de 800 km, y una longitud de onda de 5.6 cm, la resolución azimutal sería de aproximadamente 4.5 km, lo cual se convierte en un valor impráctico. Para mejorar la resolución en esta dirección es necesario aumentar el tamaño del radar, por lo que se desarrolló el Radar de Apertura Sintética. Dicha técnica consiste en la emisión de pulsos secuenciales con el propósito de simular un radar de mayor longitud. Además de que considerando el efecto Doppler, se puede determinar la tasa de cambio en la fase, es decir, que la fase va a mostrar máximas diferencias en los extremos y en el zenit del punto de interés presenta un valor igual a cero (Meyer, 2023e). Con esto, se replica el proceso de la señal lineal de frecuencia modulada y la resolución se establece con la siguiente ecuación (Meyer, 2023e):

$$\rho_a = \frac{L}{2} \quad (2.6)$$

Considerando el mismo ejemplo del radar de longitud igual a 10 m, la resolución azimutal sería de 5 m.

2.2.4. InSAR

Interferometría de Radar de Apertura Sintética es la metodología que permite determinar los desplazamientos que han sufrido objetos o el terreno durante un periodo. La información de entrada para llevar a cabo este procedimiento son dos imágenes complejas con información de la misma área de interés. Posteriormente, es necesario aplicar una multiplicación compleja entre la imagen U_1 y la conjugación compleja de la segunda imagen U_2^* (Meyer, 2023f).

$$I = U_1 \cdot U_2^* \quad (2.7)$$

En el caso de la multiplicación compleja se desarrolla de la siguiente manera (Meyer, 2023a).

$$U_1 * U_2 = Re\{U_1\}Re\{U_2\} - im\{U_1\}im\{U_2\} + j(Re\{U_1\}im\{U_2\} + Re\{U_2\}im\{U_1\}) \quad (2.8)$$

Al final el resultado señala que la amplitud de la imagen se debe multiplicar y el valor de la fase se suma. Otro factor para considerar es la conjugación compleja, la cual se expresa a continuación (Meyer, 2023a).

$$U^* = |U|exp(-j\phi) \quad (2.9)$$

Para establecer los desplazamientos que han sucedido en la zona, el enfoque es sobre las diferencias de fase resultante. Estos valores son afectados por algunas fuentes de error que se deben tomar en cuenta (Veci, 2016).

$$\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_t + \Delta\phi_d + \Delta\phi_a + \Delta\phi_n \quad (2.10)$$

Siendo $\Delta\phi$ la diferencia de fase total, $\Delta\phi_f$ el remanente de la diferencia de fase ocasionado por la curvatura de la tierra, $\Delta\phi_t$ el producto generado por la topografía del terreno, $\Delta\phi_d$ es creado por los desplazamientos que sufrió el terreno o los objetos durante el periodo analizado, $\Delta\phi_a$ es generado por las diferentes condiciones atmosféricas (humedad, temperatura y presión) durante cada una de las adquisiciones, y $\Delta\phi_n$ es producido por ruido debido a cambios en el ángulo de incidencia, volumen del elemento reflejante y otros efectos temporales. En este proceso una de las imágenes involucradas se selecciona para que funja como referencia, mientras que la otra se cataloga como secundaria. Ambas imágenes deben de estar alineadas con una alta precisión para que las diferencias de fases entre ambas imágenes sean de la misma zona, esta etapa se denomina como co-registro (Meyer, 2023f).

2.3. Referencias

Agencia Espacial Europea, (2022). Sentinel-1. Publicación en línea. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

Feng, D., Scarangelo, T., Feng, M. Q., & Ye, Q. (2017). Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor. *Measurement*, 99, 44-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.020>

Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E. (2019). *The SAR handbook: Comprehensive methodologies for forest monitoring and biomass estimation* (No. MSFC-E-DAA-TN67454).

Georgia State University. (2024). Hyperphysics-Armonicos. Disponible en línea <http://hyperphysics.gsu.edu/hbasees/Waves/string.html>.

Guzman-Acevedo, G. M., Quintana-Rodriguez, J. A., Vazquez-Becerra, G. E., & Garcia-Armenta, J. (2024). A reliable methodology to estimate cable tension force in cable-stayed bridges using Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Measurement*, 229, 114498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114498>

Khuc, T., & Catbas, F. N. (2017). Computer vision-based displacement and vibration monitoring without using physical target on structures. *Structure and Infrastructure*

Engineering, 13(4), 505-516.

Kim, S. W., Jeon, B. G., Kim, N. S., & Park, J. C. (2013). Vision-based monitoring system for evaluating cable tensile forces on a cable-stayed bridge. *Structural Health Monitoring*, 12(5-6), 440-456. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921713500513>

Martínez Trujano, L., Guzmán Acevedo, M., Gasca Zamora, H., Anaya Díaz, M., Hernández Guzmán, A., Hernández Figueroa, J., Montes Zea, M., Porres López, A., Machorro López, J., Quintana Rodríguez, J. y Carrión Viramontes, F. (2023). Monitoreo y evaluación estructural del Puente El Carrizo. *Publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte 725*, Sanfandila, Qro.

Meyer, F. (2023a). Lecture history math background. University of Alaska Fairbanks.

Meyer, F. (2023b). Lecture properties and propagation of electromagnetic waves. University of Alaska Fairbanks.

Meyer, F. (2023c). Lecture geometric & radiometric properties of SAR data; geocoding, geometric & radiometric correction. University of Alaska Fairbanks.

Meyer, F. (2023d). Lecture Principles of Radar & Active Microwave Systems. University of Alaska Fairbanks.

Meyer, F. (2023e). Lecture the principle of Synthetic Aperture Radar (SAR). University of Alaska Fairbanks.

Meyer, F. (2023f). Lecture Concepts of InSAR and Its Application to Mapping Topography. University of Alaska Fairbanks.

NTI Audio, (2024). Fast Fourier Transformation FFT - Basics. Disponible en línea: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>

Nyquist, H. (1928). Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 47(2), 617-644. DOI: 10.1109/T-AIEE.1928.5055024.

Vazquez-Becerra, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. *Measurement*, 110, 146-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.026>

Veci, L. (2016). TOPS Interferometry Tutorial. European Space Agency.

Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press.

Capítulo 3. Monitoreo Global con InSAR

3.1. Introducción

De acuerdo con Breugel (2017), los puentes que actualmente se encuentran en funcionamiento fueron diseñados para llevar un periodo de vida útil entre 50-100 años, por lo cual, probablemente una gran cantidad de puentes superan este lapso. Es importante considerar que existen otras cuestiones que los afectan como desastres naturales, incremento del tráfico vehicular, proceso de construcción inadecuado y daños ocasionados por el hombre. Comúnmente, cada país presenta un plan de inspección con el objetivo de detectar posibles daños en las estructuras; no obstante, las evaluaciones visuales carecen de la habilidad para detectar comportamientos anormales que se reproducen lentamente. Por otro lado, generar los programas de mantenimiento es una tarea complicada de desarrollar por la gran cantidad de puentes que existen en México y por el presupuesto necesario para realizarlo. Por lo que, algunas estructuras no se encuentran en las condiciones óptimas para operar, lo cual podría ser un riesgo para los usuarios si la infraestructura no es atendida a tiempo. A partir de este conjunto de problemas, surge la necesidad de implementar una metodología dentro del área de monitoreo de la salud estructural que pueda solucionar la mayoría de las limitaciones económicas, en términos de precisión, resolución y desempeño.

InSAR se puede utilizar para determinar desplazamientos de forma precisa utilizando imágenes satelitales (Ferretti et al., 2001), las cuales deben ser adquiridas sobre la misma zona, pero en diferente periodo. Entre las ventajas de esta metodología se encuentra el área que se cubre a través de una sola escena (la dimensión de una imagen del Sentinel-1 es 250x250 km (Agencia Espacial Europea, 2023)), mediciones remotas y precisión milimétrica (Perissin, 2016). Desafortunadamente, solo se le puede dar seguimiento a fenómenos que ocurren en un periodo largo, es decir, que se desarrolla paulatinamente, esto se debe a que la frecuencia de medición es de 1 o 2 veces al mes. A pesar de lo anterior, con la metodología de InSAR se han logrado identificar los efectos producidos por socavación, pérdida de rigidez en el tablero y cambios por la temperatura (Cusson et al., 2018; Jung et al., 2019; Schlögl et al., 2021; Selvakumaran et al., 2018; Sousa y Bastos, 2013; Vadivel et al., 2020), siendo el primer fenómeno, la causa más recurrente de que los puentes colapsen en el mundo (Selvakumaran et al., 2018).

En este capítulo se describen los resultados de la primera etapa de evaluación estructural de puentes propuesta, que consiste en el monitoreo global de estructuras

mediante InSAR. Dicho segmento está dividido en cinco secciones: la primera define la estructura considerada como caso de estudio (Puente El Carrizo); la segunda plantea la metodología implementada; la tercera describe las pruebas de validación; la cuarta consiste en la aplicación sobre la estructura; en la última se discuten las conclusiones.

3.2. Puente El Carrizo

La metodología InSAR se aplicó en el Puente El Carrizo, el cual es parte de las estructuras con mayor relevancia dentro de la Red Federal de Carreteras de la SICT, uniendo al país a través de la sierra madre occidental. Actualmente, el Puente El Carrizo tiene instalado un sistema de monitoreo periódico con el cual se evalúa una o dos veces al año su integridad estructural (Martínez et al., 2023), por tal motivo, se consideró como buen candidato para ser monitoreado. De acuerdo con Quintana-Rodríguez et al. (2021), el Puente El Carrizo está construido en tres secciones, una formada por vigas Nebraska (38 m), otra por vigas de tipo cajón funcionando como doble voladizo (70.6 m), y la última consiste en un sistema atirantado (364 m). La longitud total del puente es de aproximadamente 487 metros, claro principal de 217.3 m, cuenta con 56 tirantes distribuidos en 4 semi-arpas. En la Figura 3.1 se puede apreciar el Puente El Carrizo.



Figura 3.1: Vista longitudinal del Puente El Carrizo.

En enero de 2018, el Puente El Carrizo sufrió daños producidos por un accidente de tránsito. Un camión biarticulado volcó y derramó combustible ocasionando un incendio por aproximadamente 6 horas continuas. La mayoría de los daños ocurrieron en la sección del doble voladizo de la estructura. Por lo tanto, tras el incidente, durante el resto del año, el puente estuvo en rehabilitación. Al inicio de este proceso, se instaló un sistema de monitoreo en la sección de doble voladizo, el cual se basó en fibra óptica contemplando inclinómetros, galgas extensiométricas, acelerómetros y sensores de temperatura. Además de los instrumentos que midieron en tiempo real durante todas las etapas de la rehabilitación, se desarrolló un Modelo de Elemento

Finito (FEM por sus siglas en inglés) para el cálculo de las condiciones estructurales, consideradas como un criterio que indica las capacidades operativas del puente (Quintana et al., 2021). Al final de la rehabilitación se realizó una prueba de carga, la cual determinó que el Puente El Carrizo presentaba una condición operativa normal (Vazquez-Ontiveros et al., 2021). Es importante mencionar que solamente se contempló evaluar la sección del doble voladizo debido a que fue la zona del puente que sufrió daños en el accidente vial y que posteriormente fue rehabilitada. La Figura 3.2 muestra el Puente El Carrizo con algunos daños y durante su proceso de rehabilitación.



Figura 3.2: Puente El Carrizo: área dañada y de rehabilitación.

3.3. Metodología

3.3.1. Materiales

Las imágenes satelitales empleadas fueron proporcionadas gratuitamente por la misión satelital Sentinel-1. Las características de estas imágenes fueron tipo L1 SLC, Ancho Interferométrico (IW, por sus siglas en inglés) como modo del haz, polarización VV, franja de 250 km y una resolución de 5 m x 20 m. Los datos de enero de 2019 a septiembre de 2022 se analizaron con una resolución temporal de 12 días, dirección descendente y solo información del Satélite A. Las imágenes se descargaron utilizando la plataforma Vertex, propiedad de las Instalaciones Satelitales de Alaska (ASF, por sus acrónimos del inglés) (ASF Data Search, 2024). El software implementado para determinar los desplazamientos estructurales fue SARPROZ, el cual permite aplicar diferentes tipos de enfoques de procesamiento InSAR (SARPROZ Webpage, 2024).

3.3.2. PS InSAR

Ferreti et al. (2001) propusieron la metodología de Dispersadores Persistentes (PS, por sus siglas en inglés) InSAR como una alternativa multi-temporal que utiliza un conjunto de interferogramas estimados sobre la misma zona. Dentro del conjunto de imágenes satelitales SAR empleadas, existen algunos puntos que siempre reflejan establemente la señal electromagnética emitida por el satélite (Figura 3.3), usualmente son obras de ingeniería. Estos puntos son elementos que dominan la reflectividad de la señal dentro del área que cubre un pixel (Figura 3.4).

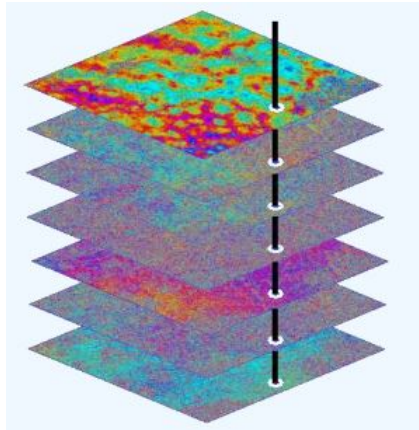


Figura 3.3: Punto estable dentro de un conjunto de imágenes (Tomado de (Meyer, 2023)).

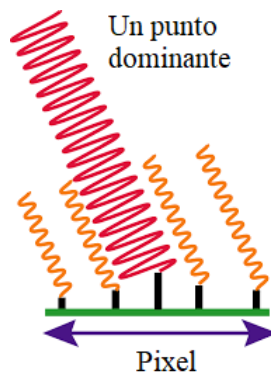


Figura 3.4: Comportamiento de punto persistente dentro de un pixel (Tomado de (Meyer, 2023)).

PS InSAR se desarrolla a partir de la siguiente secuencia de pasos (Meyer, 2023):
a) Procesamiento InSAR. Se estima la diferencia de fase entre varias imágenes de la misma zona adquiridas en diferente tiempo, una de las imágenes funge como referencia al participar en la creación de todos los interferogramas y el resto se denomina como secundarias. Frecuentemente, la imagen de referencia se localiza en la mitad del periodo contemplado para desarrollar el procesamiento, esto tiene la finalidad de encontrar más puntos coherentes sobre las imágenes, ya que no hay límite en la línea

base temporal (Figura 3.5). El valor de la fase de estos interferogramas se define como:

$$\phi = W \{ \phi_{topo} + \phi_{desp} + \phi_{atmo} + \phi_{orbit} + \phi_{ruido} \} \quad (3.1)$$

Donde W indica que el valor de la fase está envuelta, es decir, dentro del rango de 0 a 2π , ϕ es la diferencia de fase resultante del interferograma, ϕ_{topo} son efectos producidos por la topografía en la diferencia de fase (es proporcional a la línea base espacial), ϕ_{desp} representa los desplazamientos ocurridos en el periodo analizado, ϕ_{atmo} es resultado de las diferentes condiciones atmosféricas al momento de adquirir las imágenes (tiene un comportamiento aleatorio en tiempo y suave a través del espacio), ϕ_{orbit} es el efecto producido por la variación en las órbitas (desempeño semejante al de la atmosfera), y ϕ_{ruido} son alteraciones por ruido aleatorio en tiempo y espacio.

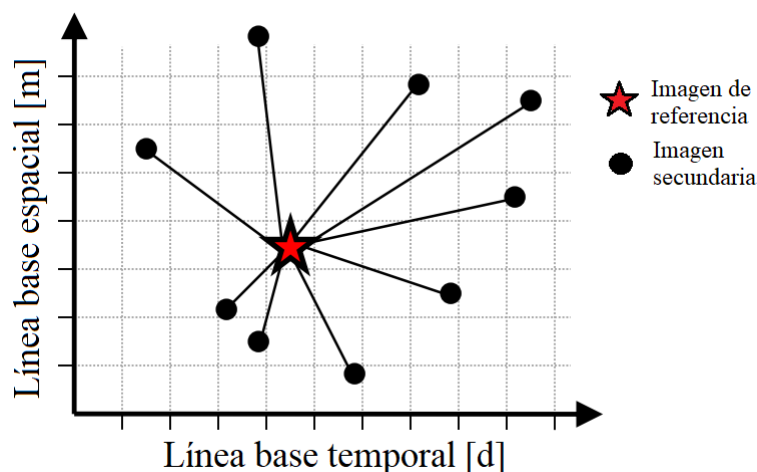


Figura 3.5: Relación imágenes, línea base temporal y perpendicular (Tomado de (Meyer, 2023)).

b) Procesamiento InSAR Diferencial. Durante la generación de los interferogramas se reducen los efectos de la topografía a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), sin embargo, no se eliminan por completo quedando un remanente.

c) Selección de puntos persistentes. Los reflejantes constantes se seleccionan utilizando un límite llamado índice de dispersión de la amplitud, el cual se establece como:

$$DA = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (3.2)$$

Siendo DA el índice de dispersión de la amplitud del punto reflejante en todas las imágenes, σ_A es la desviación estándar de la amplitud, y μ_A es la media de la amplitud. Se emplea la amplitud de la señal porque su estabilidad está relacionada con el comportamiento de la fase, por lo que, estos puntos presentan correlación temporal y tienen un valor bajo de ruido en la fase.

d) Modelo espacial temporal I. Idealmente, es posible encontrar una solución para los errores remanentes ocasionados por la topografía y los desplazamientos sufridos por el punto de interés. Esto se realiza ajustando las observaciones de fase a un plano bidimensional considerando el comportamiento espacio-tiempo y los cambios de la distancia línea base (Figura 3.6). Contemplando un modelo lineal de desplazamientos, el valor de la fase se describe como:

$$\phi_{x,desp}^k = \frac{4\pi}{\lambda} v_x \Delta t^k \quad (3.3)$$

Donde λ es la longitud de onda, v_x es la velocidad del pixel x , y Δt^k es el tiempo del interferograma k . Por otro lado, la representación de la relación entre la línea base espacial y el error producido por las limitantes del Modelo Digital de Elevaciones empleado, se describe de la siguiente manera:

$$\phi_{x,topo}^k = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^k}{R \cdot \sin\theta} h_{x,err} \quad (3.4)$$

Siendo B_{\perp}^k la línea base espacial en el interferograma k , R la distancia entre el sensor y el elemento reflejante, θ el ángulo de incidencia y $h_{x,err}$ el error por la imperfección del MDE en el pixel x . En el caso de que el modelo no se represente adecuadamente, no se encuentra solución.

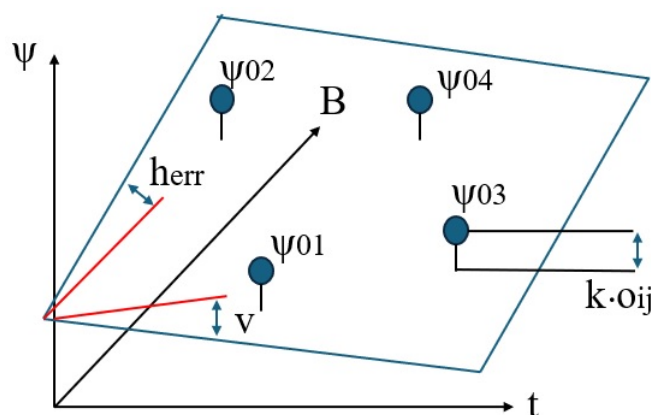


Figura 3.6: Ajuste de los desplazamientos y el error producido por la topografía utilizando un plano bidimensional (Tomado de (Meyer, 2023)).

e) Estimación II. En el paso anterior, no se reducen todas las fuentes de error que afectan el valor de la fase, por lo que, es necesario restar las diferencias de fase entre puntos cercanos, es decir dentro de una distancia de 1 km (Figura 3.7). Por lo que, la relación entre los efectos dentro de la diferencia de fase se expresa como:

$$\Delta\phi_{x-y}^k = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^k}{R \cdot \sin\theta} \Delta h_{x-y,err} + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta v_{x-y} * \Delta t^k + \phi_{x-y,atmo}^k + \phi_{x-y,orbit}^k + \phi_{x-y,noise}^k \quad (3.5)$$

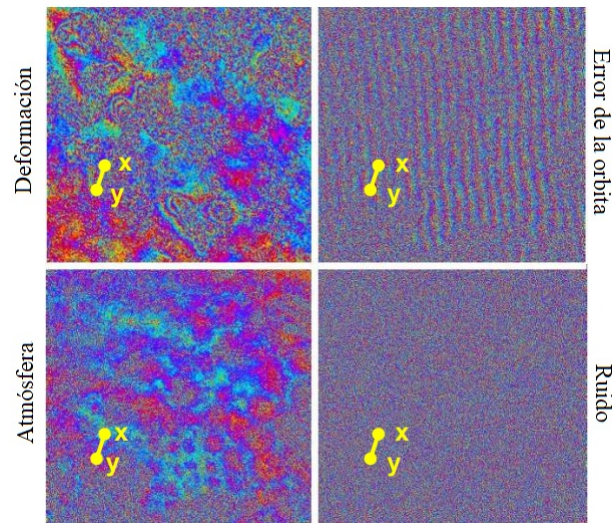


Figura 3.7: Reducción de fuentes de error al implementar puntos persistentes cercanos (Tomado de (Meyer, 2023)).

Debido a que los efectos atmosféricos se correlacionan en espacio y no en tiempo, las variaciones que introducen a la ecuación son despreciables, así como por la órbita y ruido (los dos últimos se mantienen relativamente bajos al emplear puntos reflejantes estables y disminuyen aún más cuando se calculan las discrepancias entre puntos cercanos). Posteriormente, se repite el ajuste en el plano bidimensional contemplando la resta de las diferencias de fase, la correlación tiempo espacio de los desplazamientos y la relación entre la distancia línea base con la topografía.

f) Integración. Al tener establecida una red de diferencias de fases, se selecciona un punto de referencia para realizar un ajuste por mínimos cuadrados y encontrar la solución para cada punto (Figura 3.8). De esta forma se encuentra el valor de Δv_{x-y} y $\Delta h_{x-y, err}$.

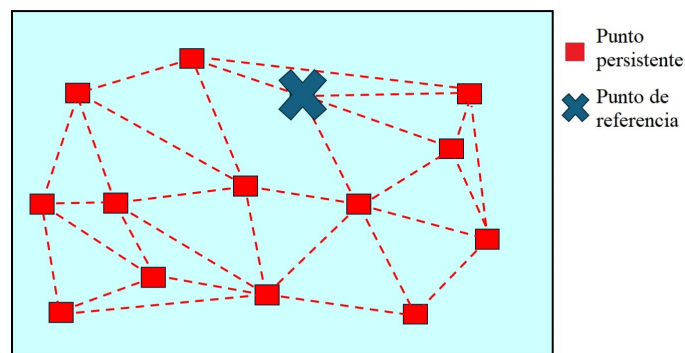


Figura 3.8: Ajuste de la red de puntos persistentes para obtener los desplazamientos finales (Tomado de (Meyer, 2023)).

Las principales características de la metodología son que mantiene la resolución total de las imágenes, solamente algunos puntos en toda la escena son coherentes,

no funciona adecuadamente para un conjunto pequeño de interferogramas y permite obtener desplazamientos al nivel del milímetro (Meyer, 2023).

3.4. Prueba de validación implementando antenas reflejantes

Para que un elemento sea evaluado mediante la metodología de PS InSAR debe reflejar la señal electromagnética de manera estable en cada una de las imágenes consideradas en el procesamiento. Como se mencionó, el índice de dispersión de la amplitud se utiliza para seleccionar los puntos PS. A pesar de que las obras de ingeniería son los casos de estudio ideales para analizar bajo los principios de esta metodología, no todos los elementos estructurales de interés cumplen el principio básico. Por lo tanto, para solucionar este inconveniente se implementan antenas reflejantes con la capacidad de siempre retornar la señal emitida por el satélite siendo el objeto dominante dentro del área cubierta por un pixel. Es por esto, que se optó por emplear una antena reflejante durante una prueba controlada para evaluar las capacidades de InSAR en la determinación de los desplazamientos estructurales en la componente vertical. Debido a que las dimensiones y figura de la antena reflejante dependen de las características de las imágenes satelitales que se utilizan en el procesamiento InSAR, se desarrollaron los cálculos necesarios considerando los valores presentados en la Tabla 3.1 de la información proporcionada por la misión Sentinel-1 (Garthwaite, 2017).

Tabla 3.1: Características de la imagen IWS de Sentinel-1.

Modo de imagen	Banda ancha interferométrica
Resolución azimutal (m)	20.0
Resolución rango inclinado (m)	5.0
Resolución rango terrestre (m)	8.7
Rango terrestre resolución área (m ²)	174.3
Ruido de fondo (dB)	-12

Para conocer la dimensión y geometría de la antena es necesario llevar a cabo 5 pasos:

1. Establecer la correspondencia entre el error de la fase deseado (φ_{err}) y la relación señal ruido (SCR) (Adam et al., 2004; Ketelaar et al., 2005):

$$\varphi_{err} = \frac{1}{\sqrt{(2 * SCR)}} \quad (3.6)$$

2. Transformar el error de fase a desplazamiento en la dirección de la línea de vista del satélite (LOS, por sus acrónimos en inglés) a través de la siguiente ecuación (Garthwaite, 2017):

$$d_{err} = \frac{(\varphi_{err} * \lambda)}{4\pi} \quad (3.7)$$

Donde λ es la longitud de onda de la señal electromagnética empleada.

3. Determinar el valor necesario de *SCR* basado en la Ecuación 3.8, la cual surge de las Ecuaciones 3.6 y 3.7:

$$SCR = \frac{\left(\frac{\lambda}{0,0001*4\pi}\right)^2}{2} \quad (3.8)$$

Al contemplar un error en la distancia de 0.1 mm, el valor resultante de *SCR* es 30 dB.

4. A partir del valor de *SCR* se determina la sección transversal de radar (*RCS*) con la siguiente Ecuación 3.9 (Nahli et al., 2020):

$$SCR = RCS - (10\log(A) + N) \quad (3.9)$$

Siendo *N* el ruido de fondo y *A* el área del pixel.

Al ingresar los valores de *A* igual a 174.3 m², *SCR* de 30dB y *N* de -12, el resultado concluye que la antena debe cumplir con un valor de 40.4 dBm².

5. Debido a que es relativamente simple de construir y genera un alto *RCS*, se decidió que la geometría de la antena fuera un tetraedro cuadrado, cuyo máximo valor de *RCS* se establece en la Ecuación 3.10 (Qin et al., 2022).

$$MaxRCS = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2} \quad (3.10)$$

Donde *a* es la longitud de cada uno de los lados de la antena.

Al requerir 40.4 dBm² de *RCS*, es necesario que la antena tenga lados con 1 metro de longitud.

Posteriormente, la antena se fijó al terreno natural mediante una base con cuatro apoyos, cada uno de estos elementos fue empotrado en el terreno mediante agujeros de 30 x 15 cm, además, de contar con perforaciones horizontales separadas por algunos milímetros verticalmente. De esta forma, la prueba controlada se pudo llevar a cabo al cambiar la posición vertical de la antena previamente a cada adquisición de las imágenes SAR.

Para continuar con las mediciones de validación se debe de orientar la antena tanto verticalmente como horizontalmente considerando el origen de la señal electromagnética proveniente del satélite. Contemplando que la dirección de adquisición de las imágenes fue a través de una órbita ascendente utilizando ángulo de incidencia igual a 39.5811° y un azimut de 349°, la antena debe estar orientada con un ángulo azimutal de 259° debido a que el radar se localiza perpendicularmente en el costado derecho del satélite. En el caso de la inclinación se determinó un valor de 15° porque la parte de la antena que refleja la señal de mejor manera es a los 54° (Algafsh et al., 2016) y el ángulo de incidencia es de 39.5811°. La Figura 3.9 ilustra la antena reflejante elaborada antes de ser instalada en el terreno.

Con el objetivo de establecer que la antena se orientó adecuadamente, se generó un mapa con el promedio de la reflectividad resultante en 18 imágenes SAR. La información contempla datos de ambos satélites pertenecientes a la constelación Sentinel-1 utilizando una resolución temporal de 6 días. En la Figura 3.10, se ilustra el mapa de reflectividad resultante donde la posición de la antena se estableció



Figura 3.9: Antena reflejante elaborada para el experimento controlado de validación.

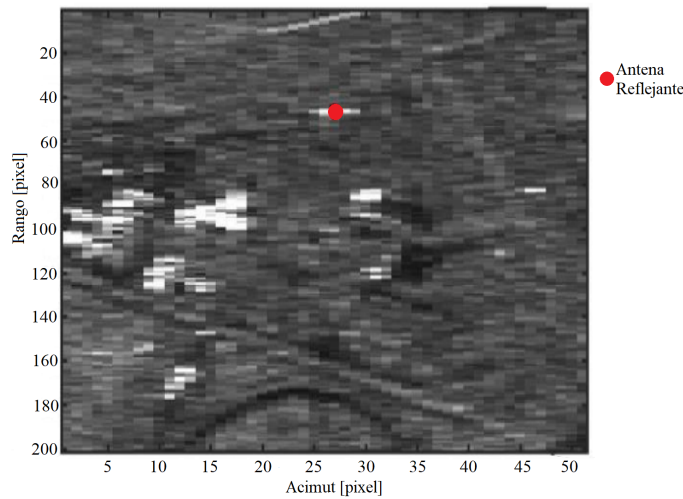


Figura 3.10: Promedio de mapas de reflectividad.

con un círculo rojo. Bajo estas circunstancias, la instalación de la antena fue llevada correctamente.

Por último, se desarrolló el procesamiento InSAR para determinar los desplazamientos verticales aplicados a la antena reflejante durante un mes. En este caso se emplearon las 18 imágenes previas más 6 nuevas que registraron los cambios de posición provenientes de la antena, por lo cual, en total fueron 24 imágenes SAR cumpliendo con el requisito de implementar al menos 15 o 20 imágenes (Hoppe et al., 2019; Perissin y Wang, 2011). A través del software SARPROZ se determinaron las series de tiempo en la componente vertical, la configuración consideró la modalidad de áreas pequeñas, efectos térmicos, valores de reflectividad para identificar puntos persistentes y desplazamientos con comportamiento no lineal. Los resultados del procesamiento indican un promedio de diferencia con los valores de referencia de 0.8 mm, mínima variación de -1.4 mm, máxima discrepancia de 2.1 mm, la desviación estándar de 1.2 mm y Error Medio Cuadrático de 1.36 mm. Tabla 3.2 muestra

las variaciones entre los desplazamientos obtenidos con InSAR y los establecidos como referencia.

Tabla 3.2: Diferencias resultantes de las mediciones InSAR.

Número de prueba	Diferencia (mm)
1	1
2	1.6
3	1
4	2.1
5	0.5
6	-1.4

3.5. Resultados en el puente Carrizo

Para el monitoreo del Puente El Carrizo, la configuración implementada en el software SARPROZ considera estimar desplazamientos lineales y efectos térmicos, utilizando un enfoque multi-maestro con el modelo on/off como peso, lo cual es una variación de PS InSAR, denominado como Cuasi-PS (Perissin, 2016). Los resultados obtenidos mediante InSAR en la estructura presentan un comportamiento aparentemente estable durante el periodo 2019-2022 con velocidades de apenas unos cuantos milímetros al año. En la Figura 3.11 se presenta la ubicación de los puntos persistentes encontrados sobre el Puente El Carrizo, mientras que las Figuras 3.12-3.18 muestran cada una de las series de tiempo correspondiente a estos puntos.



Figura 3.11: Puntos persistentes encontrados en el Puente El Carrizo.

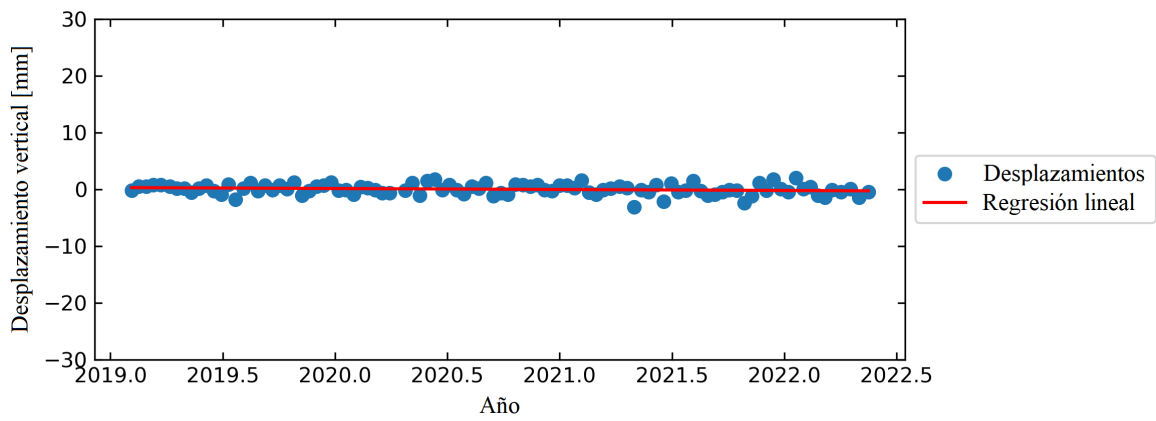


Figura 3.12: Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 1).

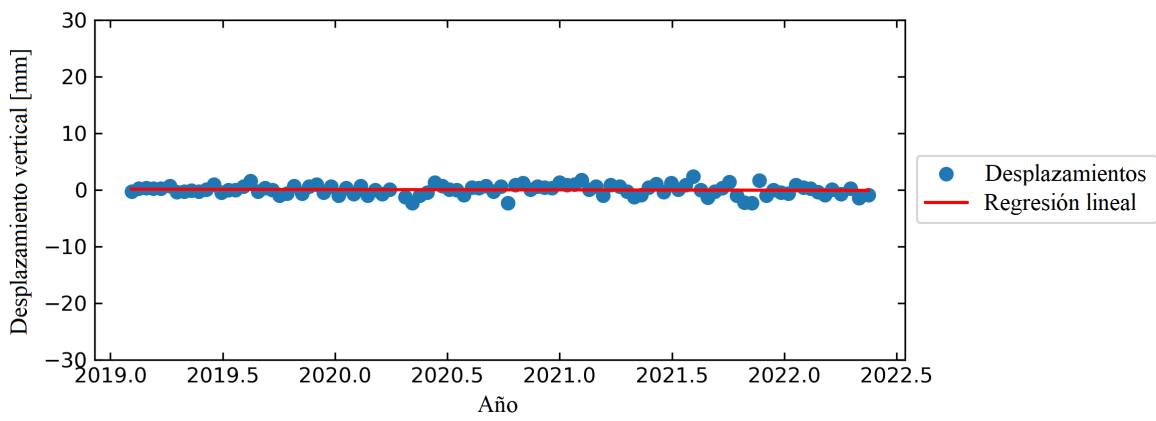


Figura 3.13: Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 2).

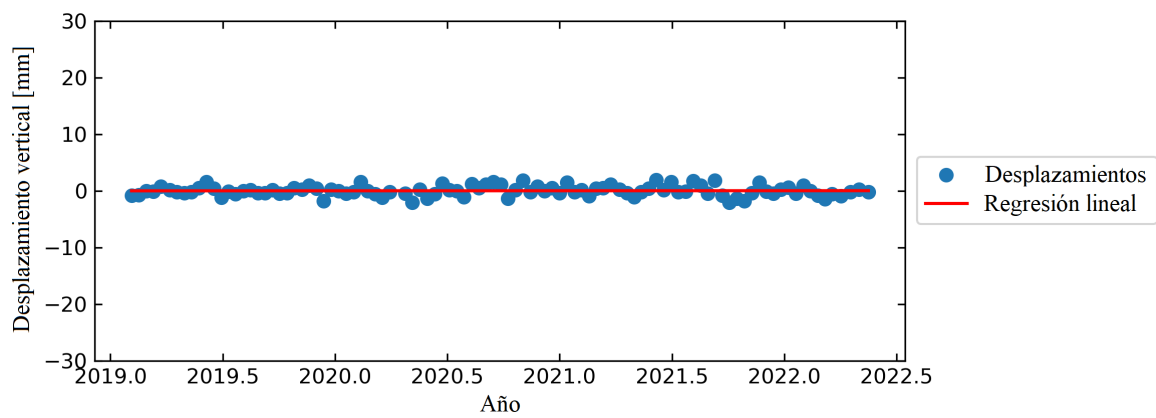


Figura 3.14: Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 3).

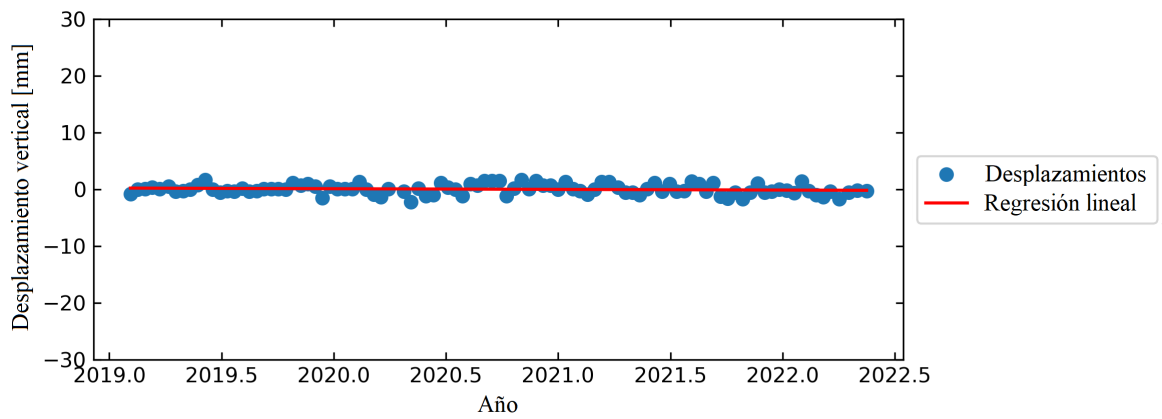


Figura 3.15: Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 4).

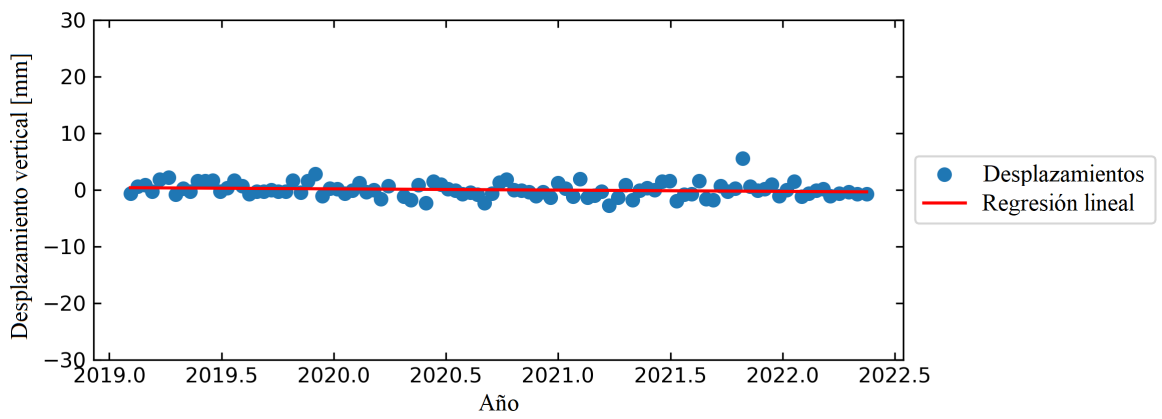


Figura 3.16: Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 5).

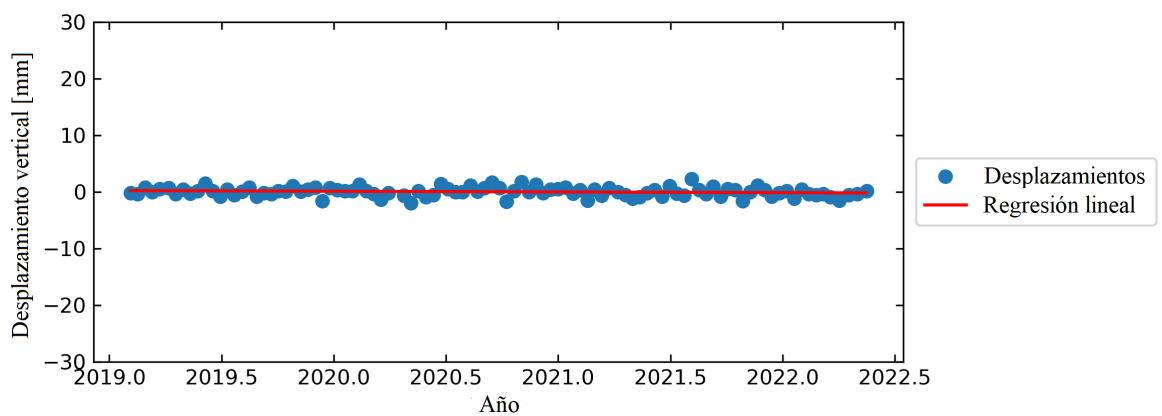


Figura 3.17: Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 6).

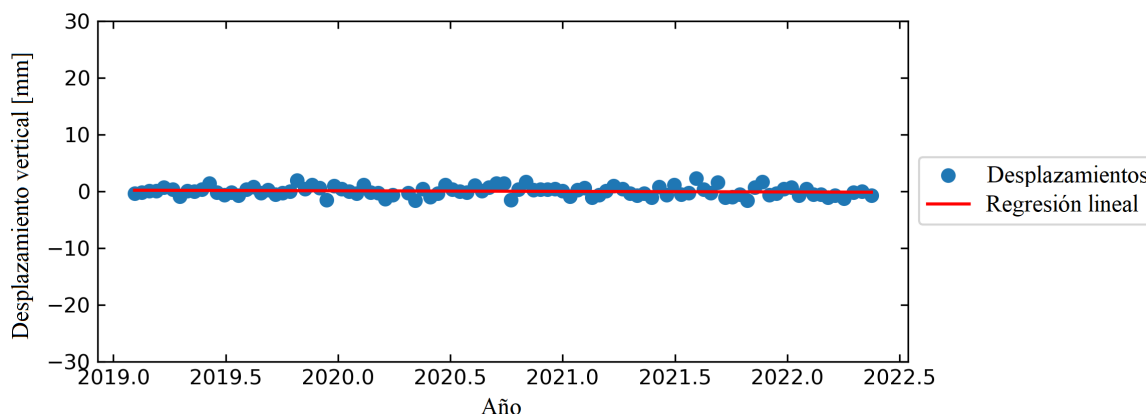


Figura 3.18: Resultados del monitoreo del Puente El Carrizo (Punto 7).

De forma general, las velocidades del puente fueron de ± 0.5 mm, y los desplazamientos acumulados de ± 2 milímetros. La Tabla 3.3 establece la desviación estándar y velocidad de los 7 puntos persistentes, donde la máxima desviación estándar fue 1.2 mm (Punto 2), mínima de 0.8 mm (Punto 5) y en promedio de 0.9557 mm; en el caso de la velocidad, el máximo valor fue 0.007 mm/año (Punto 5), mínimo valor de -0.22 mm/año (Punto 2) y promedio de -0.119 mm/año.

Tabla 3.3: Velocidad y desviación estándar en cada punto del puente.

Punto	Desviación estándar	Velocidad (mm/año)
1	0.97	-0.17 \pm 0.09
2	1.2	-0.22 \pm 0.13
3	0.89	-0.06 \pm 0.09
4	0.95	-0.11 \pm 0.09
5	0.8	0.007 \pm 0.09
6	0.96	-0.14 \pm 0.1
7	0.92	-0.14 \pm 0.08

3.6. Conclusiones y discusiones

En este capítulo se evaluaron las capacidades de la metodología InSAR para el monitoreo de la salud estructural de los puentes. El análisis se llevó a cabo mediante una prueba controlada utilizando una antena reflejante que continuamente sufría cambios en su posición vertical. Los resultados mostraron que las diferencias entre los desplazamientos obtenidos a través de InSAR con respecto a los de referencia, tienen un promedio de 0.8 mm, máxima discrepancia de 2.1 mm, mínima diferencia de -1.4 mm, desviación estándar de 1.2 mm y Error Medio Cuadrático de 1.36 mm. Lo que confirma la capacidad de InSAR para determinar desplazamiento en el rango de lo milimétrico. Por otro lado, aplicando la metodología en el Puente El Carrizo, las velocidades de desplazamiento fueron de ± 0.5 mm, y desplazamientos acumulados de ± 2 milímetros. A partir de estos resultados se puede establecer que los

desplazamientos milimétricos no representan inconveniente en la integridad estructural, sin embargo, aún es necesario proponer una metodología alterna que evalúe el nivel de riesgo de los puentes cuando se detecten comportamientos atípicos en la información. De igual forma, se observó una limitante en la cantidad de puntos reflejantes en los resultados, esto es propiciado por la resolución de las imágenes utilizadas, y se puede solucionar implementando imágenes comerciales o colocando antenas reflejantes sobre los puntos de mayor relevancia en la estructura. Por lo que, se concluye que InSAR se puede emplear como una herramienta confiable durante la primera etapa del monitoreo de la salud estructural de los puentes que conforman la infraestructura carretera del país.

3.7. Referencias

Adam, N., Kampes, B., & Eineder, M. (2004). Development of a scientific permanent scatterer system: Modifications for mixed ERS/ENVISAT time series. In Proceedings.

Agencia Espacial Europea, (2023). Sentinel-1. Publicación en línea. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

Algafsh, A., Inggs, M., & Mishra, A. K. (2016, November). The effect of perforating the corner reflector on maximum radar cross section. In 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS) (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/MMS.2016.7803815

ASF Data Search. (2024). Disponible en línea: <https://search.asf.alaska.edu/#/> (acceso Enero 2024).

Breugel, K. (2017). Ageing infrastructure and circular economy: challenges and risks. In Proceedings of the 2nd world congress on civil, structural, and environmental engineering (CSEE17).

Cusson, D., Trischuk, K., Hébert, D., Hewus, G., Gara, M., & Ghuman, P. (2018). Satellite-based InSAR monitoring of highway bridges: validation case study on the North Channel Bridge in Ontario, Canada. *Transportation Research Record*, 2672(45), 76-86. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118795013>.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20. DOI: 10.1109/36.898661

Garthwaite, M. C. (2017). On the design of radar corner reflectors for deformation monitoring in multi-frequency InSAR. *Remote Sensing*, 9(7), 648. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070648>

Hoppe, E. J., Novali, F., Rucci, A., Fumagalli, A., Del Conte, S., Falorni, G., & Toro, N. (2019). Deformation monitoring of posttensioned bridges using high reso-

lution satellite remote sensing. *Journal of Bridge Engineering*, 24(12), 04019115. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001479](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001479)

Jung, J., Kim, D. J., Palanisamy Vadivel, S. K., & Yun, S. H. (2019). Long-term deflection monitoring for bridges using X and C-band time-series SAR interferometry. *Remote Sensing*, 11(11), 1258. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11111258>.

Ketelaar, G., Marinkovic, P., & Hanssen, R. (2005, April). Validation of point scatterer phase statistics in multi-pass InSAR. In *Envisat & ERS Symposium* (Vol. 572).

Martínez Trujano, L., Guzmán Acevedo, M., Gasca Zamora, H., Anaya Díaz, M., Hernández Guzmán, A., Hernández Figueroa, J., Montes Zea, M., Porres López, A., Machorro López, J., Quintana Rodríguez, J. y Carrión Viramontes, F. (2023). Monitoreo y evaluación estructural del Puente El Carrizo. *Publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte 725*, Sanfandila, Qro.

Meyer, F. (2023). *Lecture InSAR Time Series Analysis Basics & PS-InSAR: Time Series Analysis using Point Targets*. University of Alaska Fairbanks.

Nahli, A., Simonetto, E., Tatin, M., Durand, S., Morel, L., & Lamour, V. (2020). On the combination of PsInsar and GNSS techniques for long-term bridge monitoring. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 325-332. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-325-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-325-2020)

Perissin, D., & Wang, T. (2011). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1), 271-280. DOI: [10.1109/TGRS.2011.2160644](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160644)

Perissin, D. (2016). Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. *Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications*, 145-176. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_8.

Qin, Y., Perissin, D., & Lei, L. (2013). The design and experiments on corner reflectors for urban ground deformation monitoring in Hong Kong. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/191685>

Quintana, J. A., Carrión, F. J., Anaya, M., Guzmán, G. M., Hernández, J. A., Martínez, L. A. & Gasca, H. M. (2021, March). Monitoring and evaluation of a highway bridge during major rehabilitation. In *International Workshop on Civil Structural Health Monitoring* (pp. 271-287). Cham: Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-74258-4_19.

SARPROZ Webpage. (2024). Disponible en línea: <https://www.sarproz.com/> (acceso Enero 2024).

Schlögl, M., Widhalm, B., & Avian, M. (2021). Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel-1. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 172, 132-146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.001>.

Selvakumaran, S., Plank, S., Geiß, C., Rossi, C., & Middleton, C. (2018). Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73, 463-470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.004>.

Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-13-659-2013>, 2013.

Vadivel, S. K. P., Kim, D. J., & Kim, Y. C. (2020). Time-series InSAR Analysis and Post-processing Using ISCE-StaMPS Package for Measuring Bridge Displacements. *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(4), 527-534. DOI: <https://doi.org/10.7780/kjrs.2020.36.4.3>.

Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, J. R. (2021). Implementation of PPP-GNSS measurement technology in the probabilistic SHM of bridge structures. *Measurement*, 173, 108677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108677>

Capítulo 4. Índice de riesgo

4.1 Introducción

Actualmente InSAR tiene la capacidad de determinar desplazamientos de forma remota con una alta precisión (Berardino et al., 2002; Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001; Perissin y Wang, 2011; Perissin, 2016). Implementa imágenes satelitales que se pueden tomar durante la noche o el día, así como que el proceso de adquisición no se ve afectado por las nubes. Además, se pueden emplear datos históricos y nuevos para definir el comportamiento completo de los puentes.

En la literatura científica se encuentran investigaciones que estudian estructuras en modo retrospectivo, consistiendo en procesar toda la información disponible hasta algunos días antes de que el puente sufriera un colapso total o parcial; Sosa y Bastos (2013) demostraron la capacidad de InSAR para detectar comportamientos anormales en el puente centenario de Hintze Ribeiro (Portugal) utilizando 5.5 años de información, donde la serie temporal en la dirección LOS presentó un rango de velocidad de -9.3 a -19.7 mm/año sobre el área de interés. Selvakumaran et al. (2018) propusieron un sistema de alerta basado en datos InSAR y un umbral de ± 3 desviación estándar. Se aplicó esta metodología considerando los desplazamientos del Puente Tadcaster debido a que uno de los pilares se derrumbó por el aumento de la carga del río. Milillo et al. (2019) y (2020) analizaron el comportamiento del puente Morandi utilizando datos de COSMO-SkyMed, Sentinel-1 y Envisat, que abarcan el período de 2009 a 2018. Los resultados basados en un enfoque InSAR no estándar presentaron desplazamientos anormales en el tablero cercano al elemento estructural que falló.

Por otro lado, existen investigaciones enfocadas en post-procesar la serie temporal InSAR. Xiong et al. (2021) analizaron el desplazamiento de la serie temporal del puente Hong Kong Zhuhai Macao aplicando una descomposición modal empírica (EMD), estimando el comportamiento estacional y de tendencia, correlacionando la información estacional con respecto a los datos de temperatura y empleando la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF) para determinar variaciones de movimientos. Ma et al. (2019) desarrollaron una prueba para definir los desplazamientos milimétricos del puente Jing-Shi HSR, comparando los resultados de InSAR con respecto a datos de nivelación para evaluar sus capacidades y la mejora lograda al aplicar filtros Gaussianos. Schlogl et al. (2020) propusieron una metodología para mejorar las series temporales de InSAR, que consistía en eliminar valores atípicos, suavizar los resultados, agrupar puntos con el mismo comportamiento, reducir los efectos producidos por el uso de imágenes adquiridas en diferentes direcciones, transformar los desplazamientos LOS en verticales y horizontal, y la obtención del comportamiento

estacional, de tendencia y ruido aleatorio. Huang et al. (2017) evaluaron InSAR para monitorear el puente ferroviario de alta velocidad Nanjing Dashengguan Yangtze River, calculando un modelo de regresión de los desplazamientos en la componente longitudinal y comparándolos con información estimada con base en sensores instalados en los pilares de la estructura. Cusson et al. (2018) evaluaron los desplazamientos InSAR producidos por efectos térmicos contra un Modelo de Elemento Finito, lo que expuso la capacidad de esta herramienta para el monitoreo estructural.

Adicionalmente, algunos investigadores buscan detectar diferentes tipos de daños en los puentes. Vadivel et al. (2020) utilizaron imágenes de COSMO-SkyMed para establecer los desplazamientos sufridos por dos estructuras. Los resultados mostraron tendencias con una velocidad media de -1.34 mm/año y -8.8 mm/año para los puentes Deokyang y Kimdaejung, respectivamente. Jung et al. (2019) estudiaron las deflexiones a largo plazo en dos puentes, Kimdaejung y Muyoung. Los resultados indicaron un aumento de la tendencia en los claros de los puentes, sin embargo, se descartaron los efectos de socavación porque no hubo desplazamientos en las pilas.

Por otra parte, existen investigaciones para definir o utilizar algunos umbrales de desempeño para encontrar una relación con daños. Qin et al. (2021) desarrollaron una evaluación de riesgo considerando algunos límites de desplazamiento, así como el conocimiento del comportamiento mecánico de las estructuras. Cusson et al. (2020) presentaron una metodología para establecer límites de comportamiento considerando los desplazamientos térmicos del puente para detectar áreas potencialmente afectadas por daños. La Universidad de Virginia y el Departamento de Transporte de Estados Unidos de América (2016) propusieron límites de desplazamientos verticales para los puentes, en el caso del umbral mensual, se estableció en 1.3 cm/mes, mientras que, el límite de velocidad anual media fue de 2.5 cm. Giordano et al. (2022) desarrollaron la metodología Análisis Satelital para una Detección Novedosa (SAND, por sus siglas en inglés), la cual se dividió en tres etapas: 1) estimar el valor medio de los desplazamientos LOS desde un conjunto de puntos dentro de la misma zona estructural; 2) reducir los impactos producidos por el medio ambiente; 3) descubrir daños utilizando gráficos de control.

Hasta el momento, aún existen algunos desafíos por resolver en la aplicación de InSAR en el área del SHM. Una de ellas es encontrar una forma simple y universal de responder si el desplazamiento de un puente está presentando un comportamiento normal. De esta manera, se puede desarrollar un sistema para la toma de decisiones y así mejorar el plan de inspección, mantenimiento, y rehabilitación. Por lo tanto, en esta sección se plantea una metodología alternativa para estimar un índice del estado del puente, es decir, un valor que represente el riesgo potencial de la estructura, considerando únicamente información histórica de InSAR y estadística. Este análisis se basa en calcular la probabilidad de obtener desplazamiento de mayor magnitud que los límites estimados durante un periodo de referencia.

El presente capítulo se divide en 3 secciones, la primera sección explica la metodología propuesta para la evaluación de riesgos de puentes usando la serie de tiempo InSAR. En la segunda sección se establecen los resultados obtenidos en el Puente El Carrizo y su interpretación en base a la metodología propuesta. La sección final es la conclusión de la etapa.

4.2. Metodología

4.2.1. Materiales

El lenguaje Python mediante la plataforma Jupyter fue empleado para llevar a cabo el análisis de las series de tiempo InSAR, debido a que es gratuito y contiene una gran diversidad de funciones disponibles. Las principales librerías fueron Numpy para cálculos utilizando vectores y matrices, matplotlib que proporciona diferentes métodos para graficar, y OS para acceder a la funcionalidad del sistema operativo.

4.2.2. Evaluación del riesgo con InSAR

Para este enfoque, el parámetro fundamental es el desplazamiento determinado por la metodología InSAR. Debido a que la frecuencia de muestreo de las imágenes satelitales (Sentinel-1) es de 6 a 12 días, los desplazamientos capturados se denominan semi-estáticos. Este tipo de comportamiento estructural puede ser producido por efectos lentos, tales como cambios de temperatura, socavación y pérdida de rigidez (Cusson et al., 2021; Giordano et al., 2022; Jung et al., 2019; Sousa y Bastos, 2013). Por otra parte, según los resultados de (Jung et al., 2019; Milillo et al., 2019; Milillo et al., 2020; Selvakumaran et al., 2018; Sousa y Bastos, 2013), los problemas relacionados con los dos últimos fenómenos mencionados (socavación y pérdida de rigidez) producen una tendencia en los desplazamientos a través del tiempo. Por lo tanto, luego de obtener los desplazamientos de la serie temporal, es necesario calcular la velocidad con base en la regresión lineal, la distribución estadística que mejor se ajuste a los datos, así como dos umbrales de desplazamientos. En cuanto a los resultados, es posible estimar el porcentaje de desplazamientos que superan los límites iniciales, es decir, la probabilidad de riesgo (P_R). Para el análisis del riesgo potencial del puente, se planteó simular el comportamiento de la estructura durante los próximos 10 años utilizando los parámetros de distribución y velocidad calculados, para determinar el valor P_R en este periodo. La relación de tiempo y P_R se denomina curva de fragilidad, la cual ayuda a estimar el índice de riesgo potencial para la estructura y de esta manera, decidir sobre una posible rehabilitación o cualquier acción que evite el aumento de daños. La Figura 4.1 muestra el diagrama de flujo de la metodología de evaluación de riesgos propuesta.

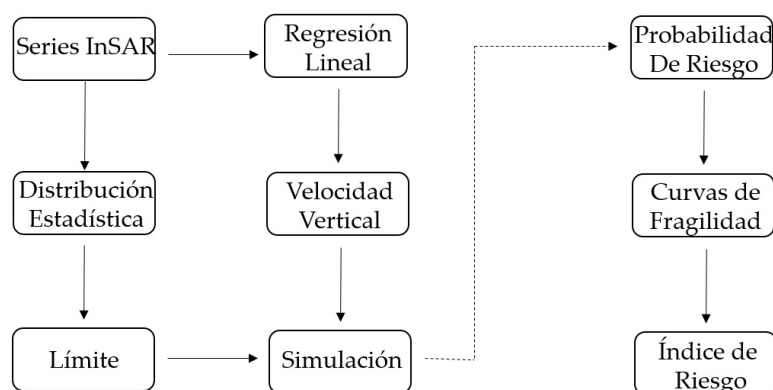


Figura 4.1: Metodología para calcular el índice de riesgo.

4.2.2.1. Cálculo de límites

La metodología propuesta sugiere determinar los desplazamientos del puente durante al menos 2 años para establecer valores de referencia de comportamiento típico. Es importante mencionar que en este período el comportamiento del puente puede verse afectado o no por algún tipo de daño. Para la explicación de esta metodología se considera un comportamiento simulado de un puente basado en un desempeño aproximado encontrado en (Selvakumaran et al., 2018). La serie temporal cubre datos de dos años en la dirección vertical con un valor máximo de 1.47 mm, un valor mínimo de -3.37 mm, una media igual a -0.6 mm y una desviación estándar de 1.02 mm. Los desplazamientos semi-estáticos producidos durante este período se deben ajustar a una distribución estadística según una prueba de chi-cuadrado. Posteriormente se define un umbral en base al 99.7% de los desplazamientos. En cuanto a la información simulada tomada como ejemplo, la distribución estadística fue normal y los límites iguales al valor medio (μ) ± 3 desviaciones estándar (σ). Los valores límite se establecen contemplando que, durante dos años, los desplazamientos del puente casi nunca los superan, aunque la estructura tuviera algunos problemas. Las Figuras 4.2 y 4.3 ilustran los desplazamientos y la distribución estadística resultante de la información simulada, respectivamente. En el caso de la Figura 4.4, se presentan los desplazamientos, con el límite superior igual a 2.46 mm, el límite inferior de -3.66 mm y la velocidad estimada de -0.2 mm/año.

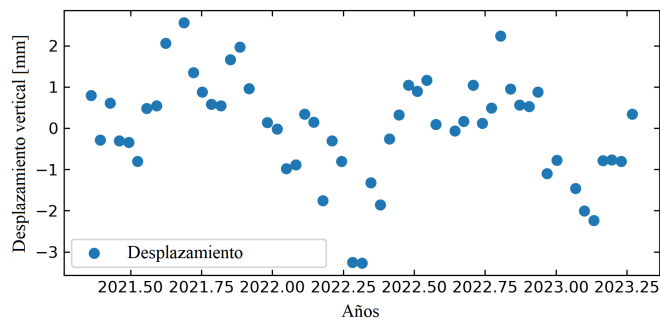


Figura 4.2: Desplazamiento simulado para explicación de la metodología.

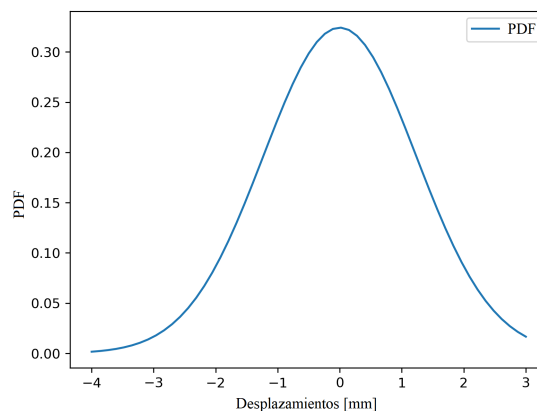


Figura 4.3: Distribución estadística de los desplazamientos simulados.

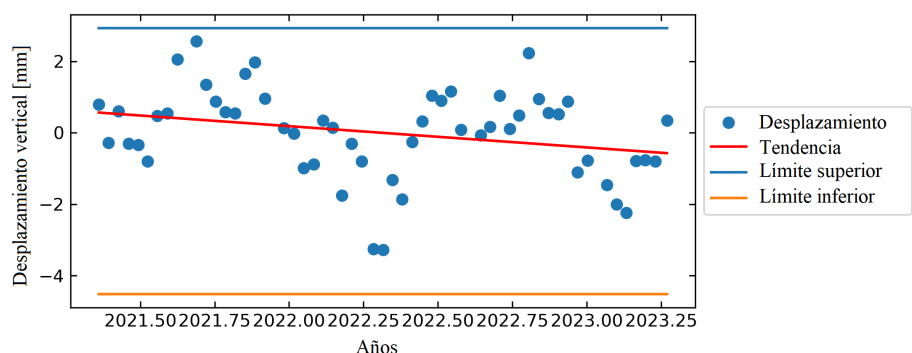


Figura 4.4: Desplazamiento simulado con sus límites de 3 sigmas.

4.2.2.2. Probabilidad de riesgo

En este punto, para los desplazamientos simulados, se debe definir la probabilidad de presentar desplazamientos fuera de los límites $\mu \pm 3\sigma$ (P_R), la cual se determina con base en (Nowak y Collins, 2012):

$$P_R = 1 - P(a < X \leq b) \quad (4.1)$$

Donde P_R es la probabilidad de presentar valores fuera de los límites a y b , que en este caso se definen considerando la distribución estadística que cubre el 99.7% de los datos, X son los desplazamientos, y $P(a < X \leq b)$ es la probabilidad de presentar una medida dentro de los umbrales planteados (a y b) que se puede expresar como:

$$P(a < X \leq b) = \int_b^a f_x(x) dx \quad (4.2)$$

Siendo $f_x(x)$ la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) calculada a partir de los desplazamientos. El valor de PDF se puede estimar con la siguiente ecuación, asumiendo una distribución normal:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] dx \quad (4.3)$$

$$-\infty < x < +\infty$$

Siendo σ_x y μ_x valores estadísticos como la desviación estándar y la media de los desplazamientos, respectivamente. Considerando las Ecuaciones 4.2 y 4.3, es posible establecer la probabilidad de obtener desplazamientos entre los dos umbrales como:

$$P(a < x \leq b) = \Phi \left(\frac{b - \mu_x}{\sigma_x} \right) - \Phi \left(\frac{a - \mu_x}{\sigma_x} \right) \quad (4.4)$$

Donde Φ es la Función de Densidad Acumulada (CDF, por sus siglas en inglés) considerando una distribución normal. Al final, el valor de P_R se puede expresar como:

$$P_R = 1 - \left(\Phi \left(\frac{b - \mu_x}{\sigma_x} \right) - \Phi \left(\frac{a - \mu_x}{\sigma_x} \right) \right) \quad (4.5)$$

4.2.2.3. Curva de fragilidad

En cuanto al rango de desplazamientos, el puente simulado muestra un comportamiento estable, sin embargo, la serie temporal presenta una tendencia negativa. En este caso, se propone simular 10 años de desplazamientos para calcular la curva de fragilidad. Para el proceso de simulación de los próximos años se contemplan los valores de la distribución estadística como media y desviación estándar de los desplazamientos. Posteriormente, los desplazamientos de simulación deben cumplir la condición de sumar o restar el desplazamiento acumulado por año en función de la velocidad. Entonces, en lugar de considerar solo los desplazamientos (componente vertical) como en la Ecuación 4.5, es necesario implementar la velocidad con su incertidumbre, la cual se desarrolla a través de una simulación Monte Carlo (Vázquez-Ontiveros et al., 2023). De esta forma, la condición de criterio para establecer la probabilidad de riesgo se define como:

$$\mu_x + 3\sigma_x < D + (V * tiempo) < \mu_x - 3\sigma_x \quad (4.6)$$

Siendo μ_x el valor medio de los desplazamientos medidos (según una distribución estadística), σ_x la desviación estándar de los mismos desplazamientos medidos, $\mu_x \pm 3\sigma_x$ los umbrales, D son los nuevos desplazamientos simulados con base en los parámetros estadísticos calculados con el comportamiento medido del puente, V la velocidad calculada a partir de la regresión lineal considerando una distribución normal, $tiempo$ el número del año simulado, $(V * tiempo)$ desplazamiento acumulado por año simulado, y $D + (V * tiempo)$ los desplazamientos simulados por cada año.

Para el cálculo de la probabilidad de riesgo se simularon los desplazamientos 100,000 veces por cada año, contando el número de veces que estuvieron fuera de los límites y dividiendo este valor por el total de las simulaciones. Al final, este proceso se repitió en cada uno de los 10 años simulados para crear la curva de fragilidad. La Figura 4.5 muestra un ejemplo general del significado de la curva de fragilidad de 10 años.

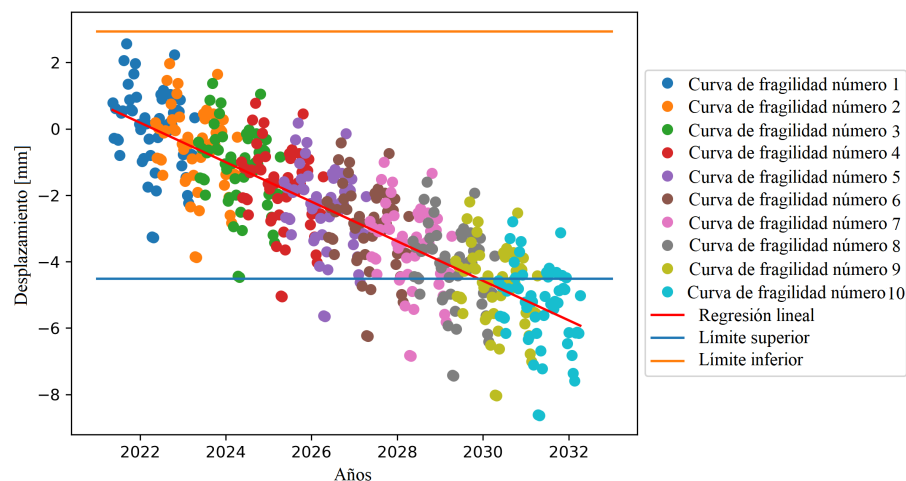


Figura 4.5: Ejemplo del concepto de probabilidad de riesgo.

En el caso de la Figura 4.6, se ilustra el P_R a 10 años para los datos simulados usados como ejemplo, donde se puede observar que el valor más alto de P_R es aproxi-

madamente 75 %. Esta curva de fragilidad está relacionada con la evolución del daño en la estructura, cuanto más rápido aumenta la probabilidad mayor es el riesgo del puente. Además, para contemplar otros escenarios como cuando el puente cambia repentinamente de velocidad. Las diferentes curvas de fragilidad se pueden calcular aumentando la velocidad de 1 a n veces. Así, se propuso un aumento de la velocidad a 10 veces, realizando el siguiente cambio en la Ecuación 4.7:

$$\mu_x + 3\sigma_x < D + (V * tiempo * I) < \mu_x - 3\sigma_x \quad (4.7)$$

Siendo I las veces que se incrementa la velocidad de desplazamiento.

La Figura 4.7 presenta las curvas de fragilidad de los desplazamientos tomados como ejemplo al aumentar la velocidad de 1 a 10 veces, donde se puede observar que a partir de la segunda curva de fragilidad los valores de P_R alcanzan valores superiores al 90 %.

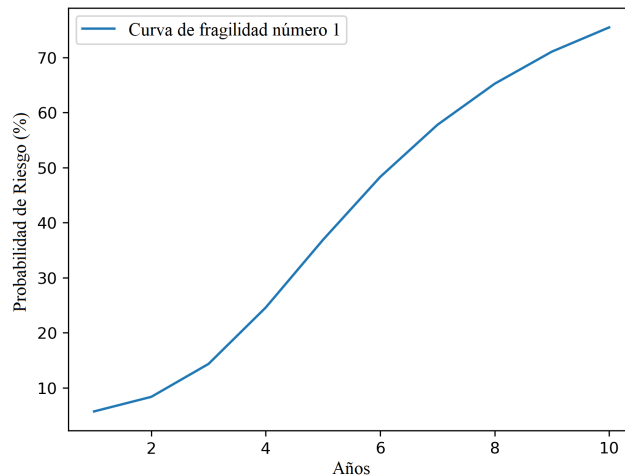


Figura 4.6: Curva de fragilidad.

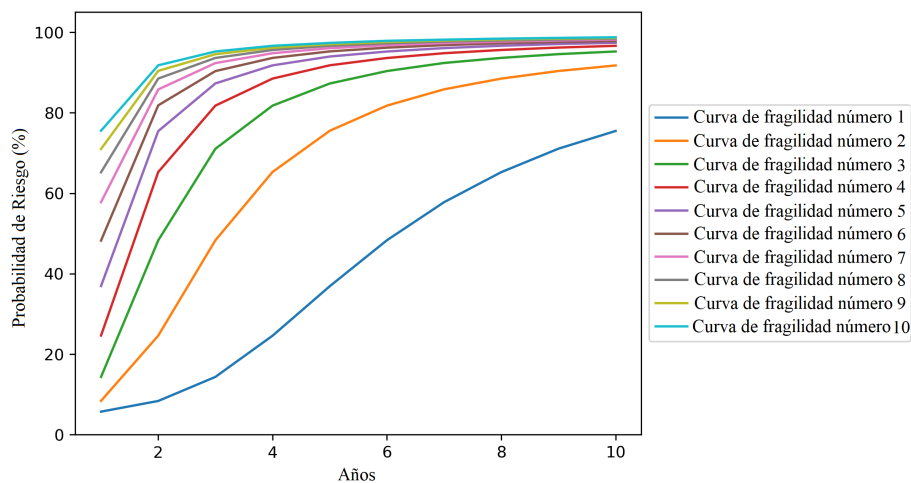


Figura 4.7: Curvas de fragilidad obtenidas al incrementar la velocidad de tendencia.

4.2.2.4. Índice de riesgo

Finalmente, con base en las 10 curvas de fragilidad estimadas, donde cada una cubre 10 años, se propone establecer un índice de riesgo. Este indicador se basa en dos parámetros, el primero considera la primera curva de fragilidad para determinar el riesgo potencial de la estructura cuando la velocidad se mantiene igual, y el resto de las curvas proporcionan el segundo parámetro, que representa cuánto debe aumentar la velocidad para conseguir un valor superior al 90 % de P_R . De esta forma, el responsable del puente puede evaluar cuando un cambio de velocidad representa un riesgo potencial. En el ejemplo, la probabilidad de riesgo calculada sin aumentar la velocidad fue de casi el 75 % durante los próximos 10 años, lo que permite definir que se están presentando algunos comportamientos anormales en la estructura. Además, si la velocidad aumenta dos o más veces, la probabilidad de que la estructura presente un comportamiento anormal sería casi del 100 %.

4.3. Resultados

4.3.1. Desplazamientos del puente

En el procesamiento InSAR se analizaron datos de enero de 2019 a septiembre de 2022 utilizando una resolución temporal de 12 días, dirección descendente, información del Satélite A y un área pequeña con un gráfico de conexión completo para la generación del interferograma. Los resultados mostraron información sobre 7 puntos dentro de la sección de doble voladizo del puente. La velocidad en la componente vertical fue de ± 0.5 mm/año y el rango de los desplazamientos acumulados fue de ± 1.5 mm (Figuras 3.12-3.18).

4.3.2. Evaluación de riesgo

Considerando los desplazamientos en dirección vertical del Punto número 1, se ajustó a una distribución de Laplace (Figuras 4.8 y 4.9). Además, el valor medio fue de 0.09 mm, la desviación estándar de 0.97, el límite superior de 2.82 y el límite inferior de -3.01. Sumando la velocidad de -0.17 mm/año con una desviación estándar de 0.09, se estima la probabilidad de riesgo en 10 años. La curva de fragilidad de estas simulaciones se presenta en la Tabla 4.1 y la Figura 4.10. En este caso, la mayor probabilidad de riesgo fue del 17.4 % en el año número 10, por lo demás, el valor mínimo fue el 1.49 %. En cuanto a los resultados se puede mencionar que el comportamiento de esta parte del Puente El Carrizo tiene un desempeño normal. Por otro lado, el riesgo cuando un desplazamiento cambia la velocidad inicial se calculó de acuerdo con la metodología propuesta. Por ejemplo, respecto al rendimiento del mismo punto, si la velocidad cambia de 1 a 10 veces, es decir, de -0.17 mm a -1.7 mm, resulta en un rango de valor de 1.49 % a 95.14 % de probabilidad de riesgo (Figura 4.11). En este sentido, es importante establecer como crítico un aumento de velocidad igual a 6 veces porque los desplazamientos podrían superar el 90 % de los límites iniciales.

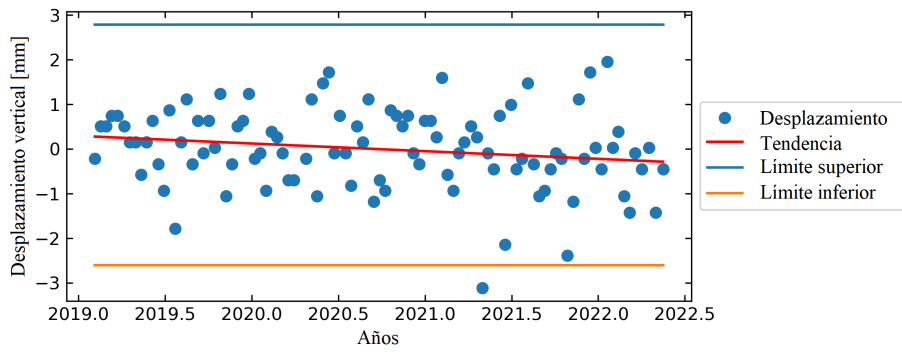


Figura 4.8: Desplazamiento del Punto número 1.

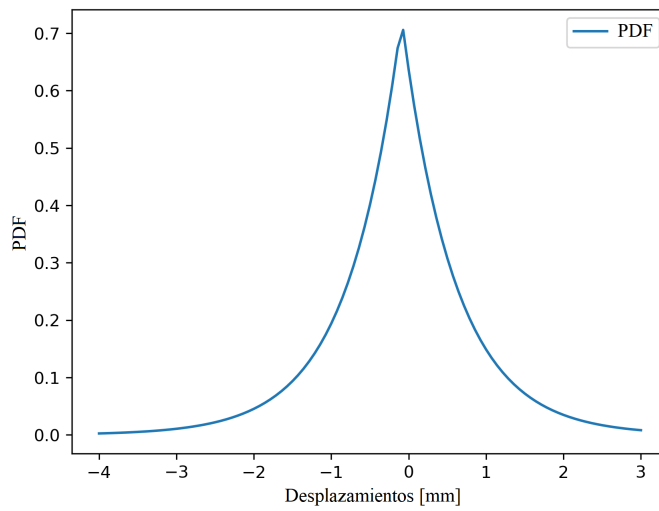


Figura 4.9: Ajuste de los desplazamiento pertenecientes al Punto número 1 considerando la Distribución Laplace.

Tabla 4.1: Valores de probabilidad de riesgo correspondientes a la primera curva de fragilidad del Punto número 1.

Año simulado	Probabilidad de riesgo (%)
1	1.49
2	1.68
3	2.02
4	2.57
5	3.36
6	4.74
7	6.64
8	9.41
9	13.06
10	17.4

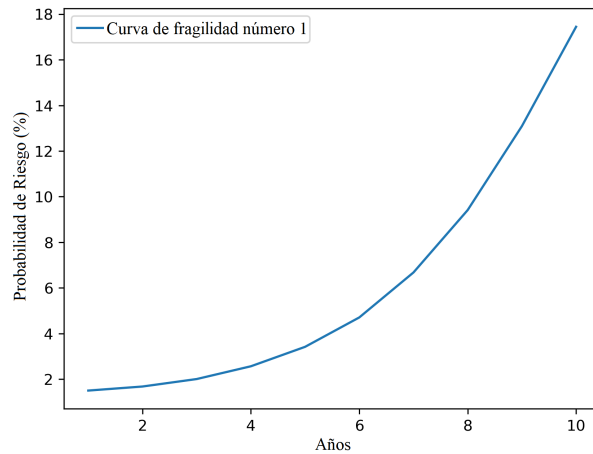


Figura 4.10: Primera curva de fragilidad resultante del Punto número 1.

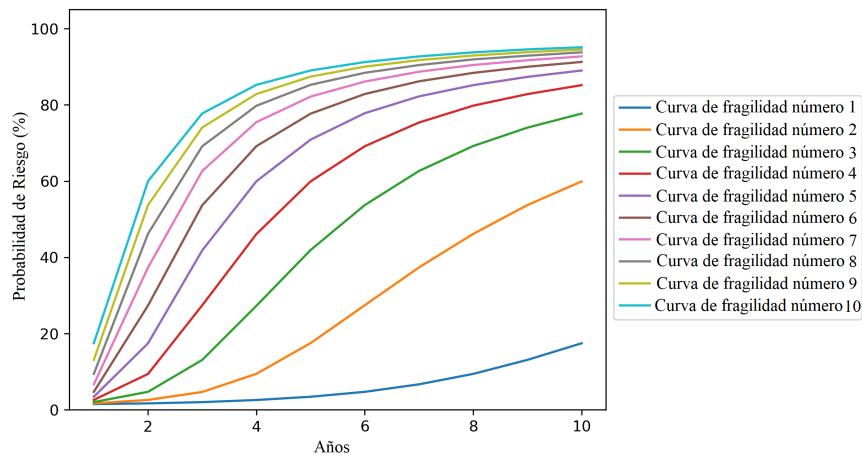


Figura 4.11: Curvas de fragilidad con incrementos de velocidad a partir del comportamiento resultante del Punto número 1.

Para el resto de los puntos se aplicó la metodología propuesta, por lo que, en la Tabla 4.2 se observan los resultados de los puntos presentados en la Figura 3.11. Esta información señala que, sin aumentar la velocidad, el promedio de P_R fue 11.76%, máximo valor de 20.23%, mínimo valor de 4.07% y una desviación estándar de 6.1%. Por otro lado, el incremento para lograr una probabilidad de riesgo superior al 90% fue de 6 veces en los Puntos número 1 y 2, para el Punto número 6 fue de 8 veces, y el resto de los puntos no lograron ese nivel de P_R . En general, estos resultados mostraron un bajo valor de riesgo que equivale a un desempeño estable de la sección de doble voladizo del Puente El Carrizo.

Tabla 4.2: Evaluación de riesgo en cada punto del puente.

Punto	Probabilidad de riesgo en el año número 10 (%)	Incremento en la velocidad para alcanzar 90% de P_R	Desviación estándar (mm)	Velocidad (mm/año)	Límite superior (mm)	Límite inferior (mm)
1	17.4	6	0.97	-0.17,0.09	2.82	-3.01
2	20.23	6	1.2	-0.22±0.13	3.7	-3.7
3	6.57	Ninguno	0.89	-0.06±0.09	2.7	-2.7
4	9.81	Ninguno	0.95	-0.11±0.09	2.7	-2.9
5	4.07	Ninguno	0.8	0.007±0.09	2.6	-2.6
6	16.02	8	0.96	-0.14±0.1	2.88	-2.88
7	8.25	Ninguno	0.92	-0.14±0.08	2.7	-2.8

4.3.3. Validación de resultados utilizando un Modelo de Elemento Finito

En el caso del Puente El Carrizo, debido al accidente que sufrió en el año 2018 y a su proceso de rehabilitación en el año posterior, se generó su modelo matemático. Dicho modelo consiste en 10281 nodos, 3532 elementos frame y 9463 elementos shell. En el lado izquierdo, junto a las vigas Nebraska las condiciones de frontera se consideraron como apoyos simples; mientras que, en el otro lado, sobre la parte atirantada, las condiciones de frontera en él fueron parcialmente restringidas a movimientos laterales. Además, el doble tramo en voladizo estaba formado por 2 vigas cajón, a las cuales, por diseño, se agregó una carga muerta de 100,000 kg en los extremos para mantener los cables de la estructura atirantada trabajando a tensión (Quintana et al., 2021). La Figura 4.12 presenta el FEM del Puente El Carrizo.

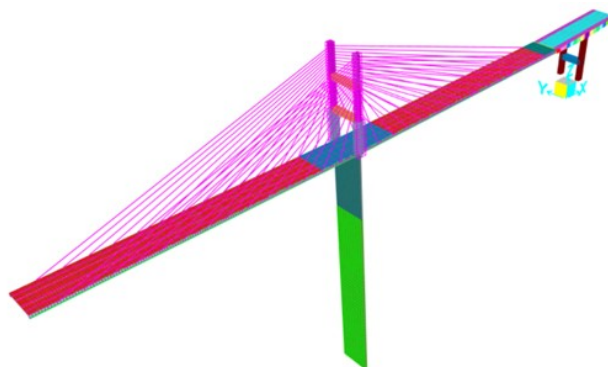


Figura 4.12: Modelo de Elemento Finito del Puente El Carrizo.

Considerando el Modelo de Elemento Finito, el valor actual de esfuerzo obtenido en la fibra superior en el área del apoyo (zona más crítica en el doble voladizo) fue de 2.59 MPa, lo cual significa que aún está soportando tensión. Al comparar el esfuerzo obtenido con respecto a los límites de servicio (3.13 MPa) y de ruptura (3.95 MPa) que indica la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés) (AASHTO, 2020), las diferencias fueron de 0.54 MPa y 1.36 MPa, respectivamente. Consecuentemente, se establece que el puente funciona dentro de un rango seguro para los usuarios. A partir de es-

ta información y con el objetivo de validar los resultados obtenidos a través de la metodología propuesta en este capítulo, los desplazamientos en el extremo del doble voladizo aledaño a la sección atirantada fueron calculados, contemplando los dos esfuerzos definidos en la fibra superior del apoyo (límite de esfuerzo y ruptura) y el límite estadístico propuesto. Los desplazamientos resultantes fueron -3.98 mm, -9.95 mm y -2.8 mm, correspondientes del límite de servicio, ruptura y el propuesto, respectivamente. Fundamentado en los desplazamientos obtenidos, la primera curva de fragilidad fue calculada, donde la máxima probabilidad de riesgo fue de 8.25% (límite 3σ), 1.8% (límite de servicio) y 0.35% (límite de ruptura). La Figura 4.13 ilustra los valores definidos de las primeras curvas de fragilidad. En el caso de los resultados establecidos con el límite de servicio, a los 10 años de simulación se alcanzó un valor de P_R igual a 1.8%, lo cual fue obtenido dentro del tercer y cuarto año de la simulación a partir del límite de 3σ . Por otro lado, analizando el límite de ruptura, no se alcanzó durante los diez años calculados, el valor de P_R que se obtuvo con el límite estadístico en el primer año. Por lo tanto, se puede plantear que el límite propuesto funciona como primera alarma de peligro cuando falta información estructural del puente.

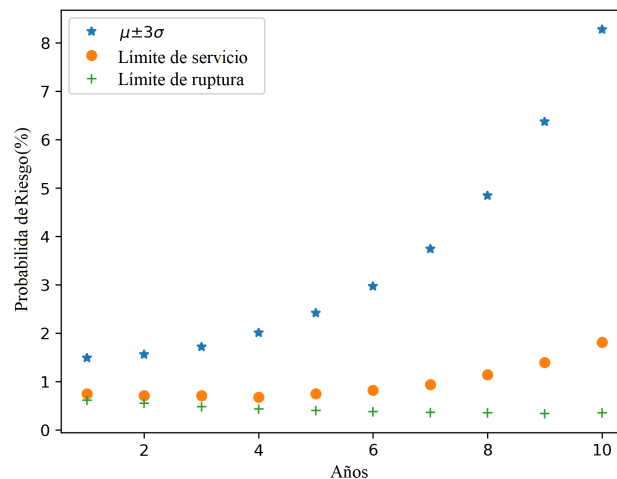


Figura 4.13: Comparación de la primera curva de fragilidad entre los límites de desplazamiento.

Continuando el análisis, al incrementar las velocidades de desplazamiento se determinaron las diferentes curvas de fragilidad mostradas en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 correspondientes al límite propuesto, de servicio y ruptura, respectivamente. El comportamiento entre las curvas de fragilidad calculadas mediante el límite 3σ y el de servicio son parecidos debido a que la diferencia entre ellos es de 1.18 mm. En el caso de las curvas de fragilidad obtenidas con el esfuerzo de ruptura, los valores son de menor magnitud por tener un límite de -9.95 mm.

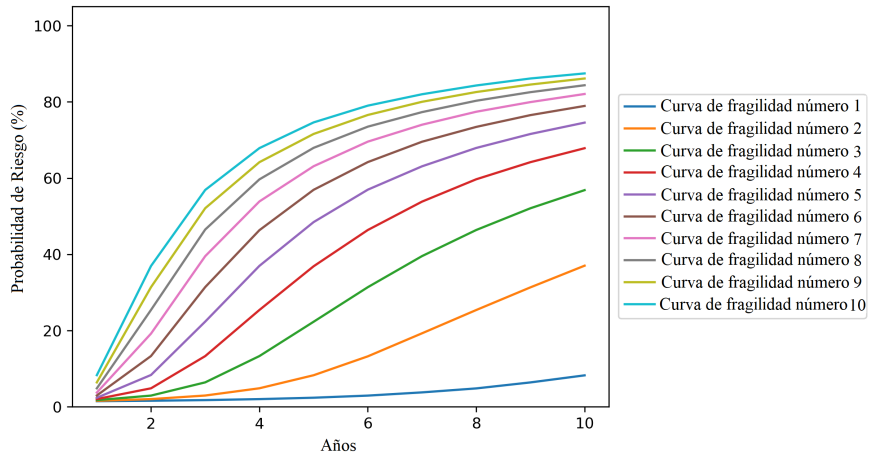


Figura 4.14: Curvas de fragilidad calculadas a partir del límite propuesto.

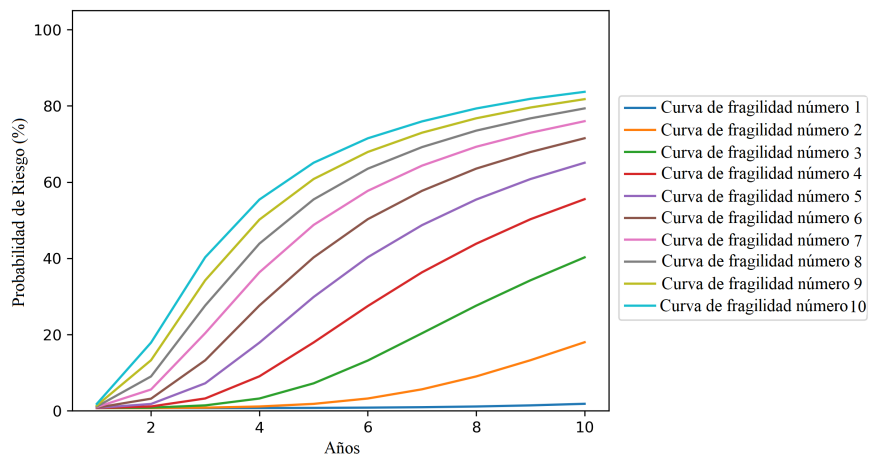


Figura 4.15: Curvas de fragilidad calculadas a partir del límite de servicio.

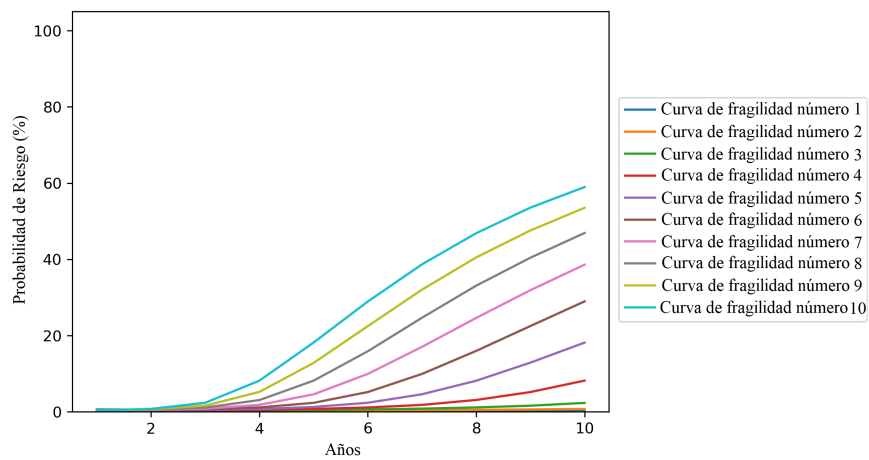


Figura 4.16: Curvas de fragilidad calculadas a partir del límite de ruptura.

4.4. Conclusiones y discusiones

En el presente capítulo se propuso una metodología para determinar los valores de riesgo potencial de los puentes, utilizando series de tiempo InSAR y análisis estadístico. Los resultados obtenidos en el Puente El Carrizo mostraron que, sin aumentar la velocidad, el promedio de P_R fue 11.76 %, máximo valor de 20.23 %, mínimo valor de 4.07 % y una desviación estándar de 6.1 %. Por otro lado, el incremento para lograr una probabilidad de riesgo superior al 90 % fue de 6 veces en los Puntos número 1 y 2, para el Punto número 6 fue de 8 veces, y el resto de los puntos no lograron ese nivel de P_R . Estas respuestas se validaron mediante un Modelo de Elemento Finito, el cual señaló que el esfuerzo actual en la zona más crítica del doble voladizo fue de 2.59 MPa con diferencias de 0.54 MPa y 1.36 MPa con respecto al límite de servicio y de ruptura, propuestos por AASHTO. A partir de estos esfuerzos y el límite estadístico propuesto se calcularon desplazamientos del extremo aledaño al sistema atirantado con el objetivo de establecer las curvas de fragilidad. Los desplazamientos fueron de -2.8 mm, -3.98 mm, y -9.95 mm, correspondientes a P_R de 8.25 %, 1.8 %, y 0.35 % relacionados al límite 3σ , de servicio y ruptura, respectivamente. Siguiendo con la misma evaluación, en el caso de los resultados establecidos con el límite de servicio, a los 10 años de simulación se alcanzó un valor de P_R igual a 1.8 %, lo cual fue obtenido dentro del tercer y cuarto año de la simulación a partir del límite de 3σ . Por otro lado, analizando el límite de ruptura, no se alcanzó durante los diez años calculados, el valor de P_R que se obtuvo con el límite estadístico en el primer año. Por lo tanto, se puede establecer que el límite propuesto funciona como primera alarma de peligro cuando falta información estructural del puente.

De esta forma se puede concluir que de acuerdo con la metodología propuesta el puente no presenta un comportamiento anormal sobre las áreas analizadas. Es importante resaltar que el valor de riesgo basado en la metodología cubre problemas relacionados con desplazamientos producidos por fenómenos lentos, como la socavación y la pérdida de rigidez.

4.5. Referencias

Acton, S. (2016). InSAR remote sensing for performance monitoring of transportation infrastructure at the network level.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). LRFD bridge design specifications (9 ed.)

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 40(11), 2375-2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792

Cusson, D., Trischuk, K., Hébert, D., Hewus, G., Gara, M., & Ghuman, P. (2018). Satellite-based InSAR monitoring of highway bridges: validation case study on the North Channel Bridge in Ontario, Canada. *Transportation Research Record*, 2672(45), 76-86. DOI: <https://doi.org/10.1177/036119811879501>

- Cusson, D., Rossi, C., & Ozkan, I. F. (2021). Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11, 189-204. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00446-9>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 38(5), 2202-2212. DOI: 10.1109/36.868878
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20. DOI: 10.1109/36.898661
- Giordano, P. F., Turksezer, Z. I., Previtali, M., & Limongelli, M. P. (2022). Damage detection on a historic iron bridge using satellite DInSAR data. *Structural Health Monitoring*, 21(5), 2291-2311. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921721105435>
- Huang, Q., Crosetto, M., Monserrat, O., & Crippa, B. (2017). Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 128, 204-211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.016>
- Jung, J., Kim, D. J., Palanisamy Vadivel, S. K., & Yun, S. H. (2019). Long-term deflection monitoring for bridges using X and C-band time-series SAR interferometry. *Remote Sensing*, 11(11), 1258. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11111258>
- Ma, P., Li, T., Fang, C., & Lin, H. (2019). A tentative test for measuring the sub-millimeter settlement and uplift of a high-speed railway bridge using COSMO-SkyMed images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 155, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.06.013>
- Milillo, P., Giardina, G., Perissin, D., Milillo, G., Coletta, A., & Terranova, C. (2019). Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, 11(12), 1403. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11121403>
- Milillo, P., Giardina, G., Perissin, D., Milillo, G., Coletta, A., & Terranova, C. (2020). Reply to Lanari, R., et al. comment on “pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: The morandi bridge, Genoa, Italy” by Milillo et al.(2019). *Remote Sensing*, 12(24), 4016. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12244016>
- Perissin, D., & Wang, T. (2011). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1), 271-280. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2160644

Perissin, D. (2016). Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. *Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications*, 145-176. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_8

Qin, X., Li, Q., Ding, X., Xie, L., Wang, C., Liao, M., ... & Xiong, S. (2021). A structure knowledge-synthetic aperture radar interferometry integration method for high-precision deformation monitoring and risk identification of sea-crossing bridges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103, 102476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102476>

Quintana, J. A., Carrión, F. J., Anaya, M., Guzmán, G. M., Hernández, J. A., Martínez, L. A., ... & Gasca, H. M. (2021, March). Monitoring and evaluation of a highway bridge during major rehabilitation. In *International Workshop on Civil Structural Health Monitoring* (pp. 271-287). Cham: Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-74258-4_19

Nowak, A., Collins, K. (2012). *Reliability of structures*, CRC Press.

Schlögl, M., Widhalm, B., & Avian, M. (2021). Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel-1. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 172, 132-146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.001>

Selvakumaran, S., Plank, S., Geiß, C., Rossi, C., & Middleton, C. (2018). Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73, 463-470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.004>

Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-13-659-2013>

Vadivel, S. K. P., Kim, D. J., & Kim, Y. C. (2020). Time-series InSAR Analysis and Post-processing Using ISCE-StaMPS Package for Measuring Bridge Displacements. *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(4), 527-534. DOI: <https://doi.org/10.7780/kjrs.2020.36.4.3>

Vázquez-Ontiveros, J. R., Ruiz-Armenteros, A. M., de Lacy, M. C., Gaxiola-Camacho, J. R., Anaya-Díaz, M., & Vázquez-Becerra, G. E. (2023). Risk Evaluation of the Sanalona Earthfill Dam Located in Mexico Using Satellite Geodesy Monitoring and Numerical Modeling. *Remote Sensing*, 15(3), 819. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15030819>

Xiong, S., Wang, C., Qin, X., Zhang, B., & Li, Q. (2021). Time-series analysis on persistent scatter-interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) derived displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A

observations. Remote Sensing, 13(4), 546. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13040546>

Capítulo 5. Monitoreo local de la fuerza de tensión en tirantes mediante cámara digital fija

5.1. Introducción

El mantenimiento y monitoreo de los puentes atirantados es vital para que lleven una operación adecuada mientras soportan cargas pesadas que continuamente afectan a la estructura. Los cables de un puente comúnmente presentan dos tipos de problemas, reducción del área de la sección transversal debido a corrosión y/o fractura, y deslizamiento de los torones dentro del anclaje. El último daño puede ser detectado midiendo los cambios en la fuerza de tensión que somete al tirante, relacionado a la variación en la frecuencia de vibración (Xia et al., 2021).

Los métodos convencionales para determinar la fuerza de tensión en cables implementan permeabilidad magnética, gatos hidráulicos/celdas de carga, y mediciones de vibración (Zhang et al., 2021). Los métodos de vibración consisten en obtener la frecuencia de vibración de cada tirante y relacionarla a la fuerza de tensión del tirante usando algunos parámetros del cable como el área de la sección transversal o el número de torones que son asociados con la masa por unidad de longitud. El sensor que usualmente se implementa en la medición de las vibraciones de los tirantes para estimar su fuerza de tensión es el acelerómetro (Cho et al., 2013; Zhao et al., 2017a). Este sensor proporciona información precisa, un amplio rango de muestreo, y un costo relativamente bajo para la mayoría de los usuarios. Su instalación puede ser definida tan simple como sujetar el dispositivo directamente a un elemento de la estructura. Sin embargo, algunas zonas de los cables en puentes son restringidas o presentan un difícil acceso para instalar el sensor de vibración y adquirir datos de diferentes locaciones, produciendo que este método se vuelva inconveniente para determinar la fuerza de tensión en la mayoría de las estructuras, particularmente en puentes atirantados. No obstante, con el actual incremento en la resolución en cámaras digitales y la asequibilidad, este instrumento brinda la oportunidad de medir las vibraciones remotamente sin la necesidad de tener contacto físico, implementándolo en conjunto con la técnica de visión por computadora.

Recientemente, visión por computadora ha sido utilizado con mayor frecuencia en el monitoreo de la salud estructural para analizar el comportamiento de las obras ingenieriles a partir de algún punto fijo (Feng et al., 2015; Ribeiro et al., 2014; Yu y Zhang, 2020) o desde varios puntos de vista montado una cámara en un UAV (Hosker et al., 2019; Khuc et al., 2020). En el caso del monitoreo por medio de una cámara

fija, Feng et al. (2017) estimaron la tensión de los cables implementando una metodología de visión por computadora durante la erección de un techo. Las diferencias resultantes entre la metodología propuesta y la lectura de la celda de carga estuvieron dentro del 5.6%. Xu et al. (2018) realizaron mediciones de desplazamiento de múltiples objetivos usando un sistema de visión. Esto se validó mediante ensayos en puentes peatonales atirantados para determinar la deformación del tablero y la vibración del cable, comparando sus resultados con los datos obtenidos a partir de acelerómetros. Yang et al. (2019) propusieron un enfoque de procesamiento para obtener el parámetro modal completo de la vibración del cable. Esto se logró utilizando un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado y grabaciones de video de los cables. Du et al. (2020) compararon el desempeño de dos técnicas de imagen digital diferentes (procesamiento de imagen digital y correlación de imagen digital) en términos de rendimiento en el control de la tensión del cable frente a la aceleración. Jana y Nagarajaiah (2021) presentaron una metodología para monitorear la fuerza de tensión del cable con una cámara portátil en movimiento. El desplazamiento de la cámara se determinó siguiendo algunos puntos del tablero y pila del puente. La variación máxima fue del 6.69% de la tensión media debido a las condiciones ambientales durante la estimación en tiempo real.

Hasta este punto, las metodologías enumeradas recopilaban datos fuera de la estructura o en condiciones ideales en el laboratorio para determinar la tensión de tirantes. Otros trabajos también propusieron métodos de medición sobre el puente, Kim et al. (2013) desarrollaron una técnica de procesamiento de imágenes para monitorear continuamente puentes atirantados, obteniendo diferencias de tensión dentro del 5% respecto a la fuerza de la tensión de diseño. En este caso, la cámara se instaló en la pila del puente, que es una zona estable, pero de difícil acceso. Kim y Kim (2013) propusieron un enfoque para corregir el movimiento de la cámara, basado en un punto estable fuera del puente. Se utilizó la metodología denominada como coincidencia en el valor de referencia y una estimación de subpíxeles, recopilando datos del puente mientras se ve afectado por la vibración ambiental. Zhao et al. (2017b) propusieron una metodología basada en una adquisición manual de datos utilizando un teléfono inteligente. El método fue validado con un error por debajo del 5% en un puente peatonal excitado. Además, la investigación afirma que es necesario resolver algunos desafíos, como el desarrollo de la campaña de medición en un puente atirantado de grandes dimensiones y siendo afectado por carga vehicular. Lee et al. (2022) crearon un enfoque alternativo de medición del desplazamiento del cable basado en visión que puede capturar información cuando la cámara se fija dentro de un rango corto al costado del cable. Ma et al. (2022) evaluaron las correcciones del movimiento de la cámara con un sistema inercial contra la metodología que implementa un punto estable lejos de la cámara. La validación se realizó en el laboratorio y en un puente peatonal, el cual fue excitado artificialmente.

En este capítulo se propone implementar solo un enfoque de coincidencia de plantillas para determinar los desplazamientos de los cables y reducir el movimiento de la cámara en función de un punto estable lejos de la posición del instrumento. Según Ma et al. (2022), este método no elimina el movimiento completo de la cámara; sin embargo, en la presente investigación se realizó una evaluación para establecer las discrepancias producidas por el movimiento de cámara remanente en términos de

frecuencia.

Con respecto al caso de la estimación de la fuerza de tensión usando UAV, Tian et al. (2021) propusieron un método que reduce el desplazamiento del UAV combinando desplazamientos relativos y diferencias de frecuencia. En el caso de Zhang et al. (2022), los autores aplicaron un algoritmo de aprendizaje profundo para eliminar los elementos de fondo en las imágenes, así como un método de descomposición de modos para aislar la vibración del cable de los movimientos del UAV. Ambos casos resolvieron el problema en las mediciones dentro o fuera del puente, que es una de las principales ventajas del UAV. Sin embargo, según el modelo de vibración de cuerda, aún se necesita conocer la masa por unidad de longitud y la longitud del cable para determinar el valor de la fuerza de tensión. Por lo tanto, Jo et al. (2021) presentaron un enfoque para estimar la fuerza de tensión de los cables utilizando el pandeo de estos elementos de acuerdo con la teoría del cable parabólico. Estos valores se midieron empleando una cámara instalada fuera del puente. Basándose en una imagen, se determinó la fuerza de tensión, sin embargo, la implementación de un valor promedio de varias imágenes aumenta la precisión de los resultados. Por lo tanto, el manuscrito enfatiza que un minuto es suficiente para desarrollar las mediciones. Las principales diferencias entre la metodología propuesta en este capítulo y la última descrita son: (1) la adquisición de las imágenes fue sobre la estructura; (2) no se instalaron marcadores artificiales en los cables; (3) no es necesario medir algunos parámetros mecánicos de los cables; (4) fue desarrollado para ser implementado cuando el puente se ve afectado por la carga de tráfico.

En general, los métodos sin contacto descritos para la estimación de la tensión se basan en información sobre la masa y la longitud de cada cable, y la recopilación de datos sobre una posición ideal fuera del puente. En esta investigación, se valida un enfoque alternativo para determinar la fuerza de tensión de los cables sin requerir los parámetros mecánicos directos de los cables. Adicionalmente, se complementó con una metodología de visión por computadora que utiliza una cámara instalada en un trípode dentro de la estructura del puente (siendo afectado por las cargas de los vehículos), la cual graba un video de un cable a la vez para estimar la tensión de los cables en el post-procesamiento. El contexto del desarrollo de esta metodología proviene del estudio de caso del puente sobre el Río Papaloapan en México, que se ha medido varias veces a lo largo de los años mediante el uso de métodos de contacto como el gato hidráulico y los acelerómetros; sin embargo, la información sobre los parámetros físicos de cada cable no está disponible.

5.2. Puente Río Papaloapan

La estructura seleccionada para ejecutar las pruebas de la metodología propuesta fue el Puente Río Papaloapan, localizado en Cosamaloapan, Veracruz. Este puente cuenta con 112 tirantes divididos en 8 semi-arpas, donde cada semi-arpa tiene 14 tirantes, la denominación de los tirantes inicia del 1 (más corto) hasta el 14 (más largo) (Figura 5.1). Se decidió trabajar en esta estructura ya que tiene una gran cantidad de datos de tensión directa medida con gato hidráulico y de tensión indirecta obtenida a través de mediciones realizadas con acelerómetro. En la Tabla 5.1, se presenta el promedio de las frecuencias de los cinco primeros modos de vibrar por tirante de las

8 semi-arpas.

A partir de la Tabla 5.1 se definió que la frecuencia de medición necesaria para obtener los datos de tensiones (basados en los cinco primeros modos de vibrar) en el Puente Río Papaloapan es de 60 fotogramas por segundo (fps) o mayor.



Figura 5.1: Puente Río Papaloapan.

Tabla 5.1: Promedio de los cinco primeros modos de vibrar pertenecientes a los cables del Puente Río Papaloapan.

Tirante	Frecuencia Fundamental (Hz)	1er armónico (Hz)	2do armónico (Hz)	3er armónico (Hz)	4to armónico (Hz)
1	7.50	14.63	21.71	29.25	36.19
2	5.39	10.57	15.56	20.86	26.37
3	4.54	8.97	13.30	17.59	21.87
4	3.62	7.19	10.69	14.16	17.66
5	2.97	5.91	8.81	11.66	14.53
6	2.58	5.14	7.67	10.17	12.69
7	2.30	4.57	6.83	9.06	11.31
8	2.12	4.22	6.31	8.38	10.43
9	1.90	3.80	5.68	7.55	9.40
10	1.78	3.54	5.30	7.04	8.74
11	1.61	3.21	4.80	6.39	7.96
12	1.51	3.01	4.52	6.01	7.47
13	1.35	2.71	4.06	5.41	6.74
14	1.16	2.32	3.47	4.63	5.78

5.3. Metodología

5.3.1. Materiales

Los equipos utilizados para calcular la tensión de tirantes de puentes fueron una cámara de video, y un acelerómetro para validar la información resultante. La cámara implementada es parte del celular iPhone 12 pro con una frecuencia máxima de

muestreo de 60 fps y resolución espacial de 4k. Por otro lado, el acelerómetro utilizado fue de la marca Lord MicroStrain modelo G-Link-LXRS con precisión de 10 *mg* y frecuencia máxima de muestreo de 512 Hz (Microstrain, 2022). Las características principales de la cámara se describen con detalle en la Tabla 5.2 (Support Apple, 2022).

Tabla 5.2: Características del instrumento empleado en las campañas de medición.

Instrumento	Resolución video	Distancia focal	F#	Tamaño del sensor
Iphone 12 pro	3840 × 2160 píxeles	26 mm	1.6	56.6 mm

5.3.2. Estimación de la tensión de los tirantes sin medición de los parámetros mecánicos

Parte del monitoreo local propuesto consiste en determinar las tensiones que afectan los tirantes de los puentes. Esta sección se enfoca en describir la validación del procesamiento para calcular la tensión de los tirantes sin implementar valores de masa y longitud (considerando la teoría de vibración de una cuerda en modo lineal).

La ventaja del procesamiento es una simplificación al efectuar una primera medición simultáneamente entre una evaluación directa (gato hidráulico) y otra indirecta (video cámara/acelerómetro), de la fuerza de tensión. La primera campaña de medición permite caracterizar los valores de masa y longitud del tirante a través de una constante, su valor se deduce a partir de la Ecuación 5.1 (Zhang et al., 2021), lo cual da lugar a la Expresión matemática 5.2 (Martínez et al., 2019).

$$T = 4ml^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 \quad (5.1)$$

Siendo T la fuerza de tensión, m es el valor de la masa por unidad de longitud, l es la longitud del tirante, y f_n es la frecuencia del modo de vibrar n .

$$TD = fn^2 * \frac{2l^2 * m}{n^2} = C * fn^2 \quad (5.2)$$

Donde TD es la tensión directa, n número del modo del vibrar, y C constante. Con esto se evitan las dificultades de definir el valor de la masa y longitud de cada uno de los tirantes, por lo que, en las siguientes mediciones la constante no cambia, solamente el valor del promedio de las frecuencias de vibrar.

$$TI = C * fp^2 \quad (5.3)$$

Donde TI es la tensión indirecta, fp es el promedio de las frecuencias de los modos de vibrar. En el caso de las frecuencias de los modos de vibrar, éstas se determinan a través de video-imágenes, lo cual tiene la ventaja de no requerir contacto con el elemento de interés y puede llegar a ser más económico que utilizar acelerómetros.

La manera en que se definen las frecuencias de los tirantes es por medio de un algoritmo donde el primer paso es medir desplazamientos en pixeles, el segundo es definir los desplazamientos en el dominio de la frecuencia, y por último, se buscan las frecuencias de los modos de vibrar del tirante.

Debido a que en la metodología se plantea calcular la tensión indirectamente a partir de 3 mediciones directas e independientes que contienen errores (Medición de la tensión directa, frecuencia promedio inicial y frecuencia promedio posterior), el valor resultante también es afectado por estas deficiencias, es decir, se involucra una propagación de errores. Para calcular el efecto que tienen los errores de las mediciones en el resultado final de la tensión indirecta se utiliza la siguiente ecuación (Ghilani, 2017):

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\delta z}{\delta x_1} * \sigma_{x1}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta x_2} * \sigma_{x2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta z}{\delta x_n} * \sigma_{xn}\right)^2} \quad (5.4)$$

Donde σ_z es la desviación estándar, $\frac{\delta z}{\delta x_1}$ es la derivada parcial de z respecto a x_1 y σ_x es la desviación estándar de la medición.

La tensión indirecta se calcula multiplicando la constante obtenida en la primera iteración con el promedio de las frecuencias obtenidas en las siguientes mediciones del tirante, es decir, que la Ecuación 5.3 se puede describir igual que la Ecuación 5.5.

$$TI = \frac{MD}{fp^2} * fps^2 \quad (5.5)$$

Siendo TI tensión indirecta, MD medición directa de la tensión, fp promedio de la frecuencia inicial y fps promedio de la frecuencia posterior. Para conocer la manera en que se propagan los errores, es necesario aplicar la Ecuación 5.4 a la Función descrita en 5.5, lo cual se presenta en la Ecuación 5.6.

$$STI = \sqrt{\left(\frac{fps^2}{fp^2}\right)^2 * (SMD)^2 + \left(\frac{-2 * MD * fps^2}{fp^3}\right)^2 * (Sfp)^2 + \left(\frac{2 * fps * MD}{fp^2}\right)^2 * (Sfps)^2} \quad (5.6)$$

Con la ecuación anterior se puede establecer que el segundo y tercer término de la suma son de mayor magnitud que el primero, por lo que, la precisión con la que se mide la tensión directa no necesita ser tan alta como al determinar el promedio de las frecuencias. Adicionalmente, se puede definir que entre mayor sea la constante, mayor tiene que ser el grado de precisión con el que se determine el promedio de frecuencias. En las Figuras 5.2 y 5.3, se muestra la propagación de errores en los Tirantes 1 y 14, respectivamente, demostrando que el tirante más corto tiene mayor tolerancia de errores que los elementos de mayor longitud, además, se puede observar que cuando el promedio de las frecuencias es menor en las mediciones posteriores al cálculo de la constante, la propagación de errores es menor que cuando el promedio de las frecuencias posterior es mayor. Los errores aún se pueden disminuir al utilizar un promedio de la constante, cambiando la Ecuación 5.6 a la 5.7. En la Figura 5.4 se modela la propagación de errores empleando un promedio de la constante utilizando desde 1 hasta 5 elementos, al aumentar los elementos con los que se produce el promedio de la constante, la propagación de errores disminuye.

$$STI = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{fps^2}{(i) * (fp(i))^2}\right)^2 * \sigma(MD(i))^2 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{-MD(i) * fps^2}{(fp(i))^3} * \frac{2}{(i)}\right)^2 * \sigma(fp(i))^2 + 2 * fps * \sum_{i=1}^n \frac{MD(i)}{(fp(i))^2 * (i)}} \quad (5.7)$$

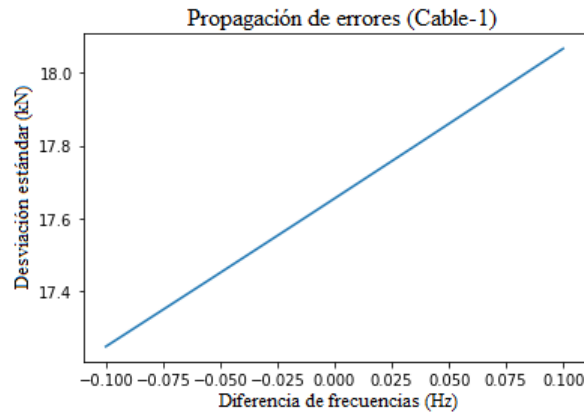


Figura 5.2: Comportamiento de la desviación estándar del Tirante 1.

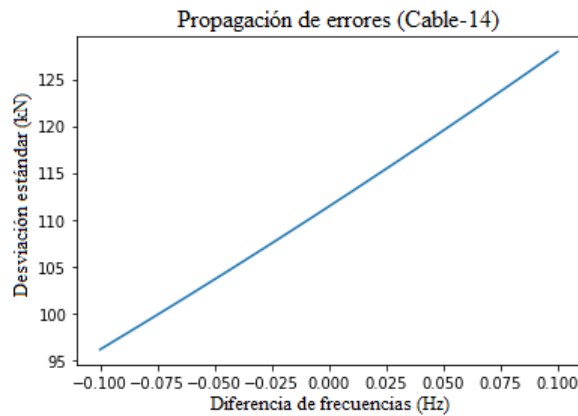


Figura 5.3: Comportamiento de la desviación estándar del Tirante 14.

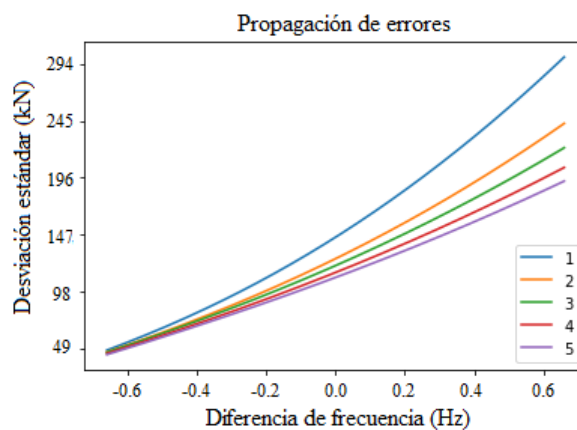


Figura 5.4: Comportamiento de la desviación estándar al utilizar el promedio de la constante del Tirante 1.

A partir de las mediciones históricas del Puente Río Papaloapan se determinó el efecto que tiene la propagación de errores para la tensión indirecta obtenida en diciembre del 2021 (utilizando acelerómetros) de los tirantes de la Semi-arpa 1, los resultados se comparan con respecto a límites de diseño y proyecto. De acuerdo a la

Figura 5.5, al mantener una desviación estándar dentro del 5% del total de tensión en todos los tirantes es suficiente para obtener un resultado confiable. Para lograr el valor de 5%, la tensión directa debe ser medida con ± 9.8 kN y la determinación del promedio de frecuencias dentro de ± 0.02 Hz, por lo que, el tiempo necesario de medición es de 2 minutos para tener una resolución en el dominio de la frecuencia igual a 0.008 Hz de acuerdo con la Ecuación 5.8 (NTI Audio, 2024).

$$df = \frac{fs}{Bl} = \frac{fs}{fs * tm} = \frac{1}{tm} \quad (5.8)$$

Donde df es la resolución en frecuencias, fs es la frecuencia de muestreo, Bl la cantidad de muestras utilizadas, y tm es el tiempo de medición. En la Figura 5.6 se describe la relación entre la desviación estándar y el porcentaje de tensión que representa para los tirantes de la Semi-arpa 1.

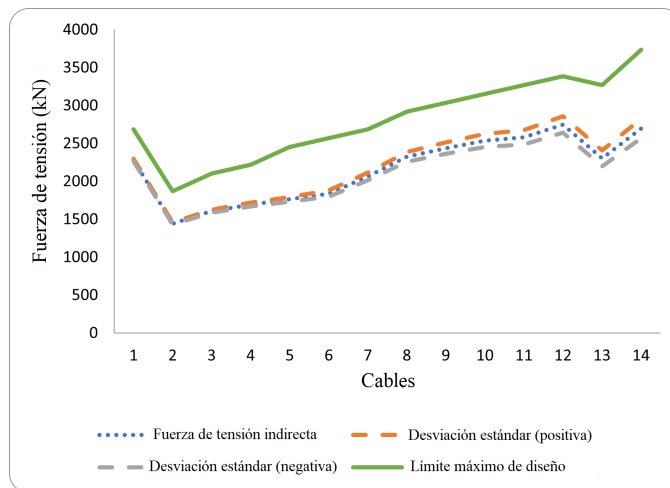


Figura 5.5: Desviación estándar, tensión indirecta y tensión máxima de los tirantes correspondientes a la Semi-arpa 1.

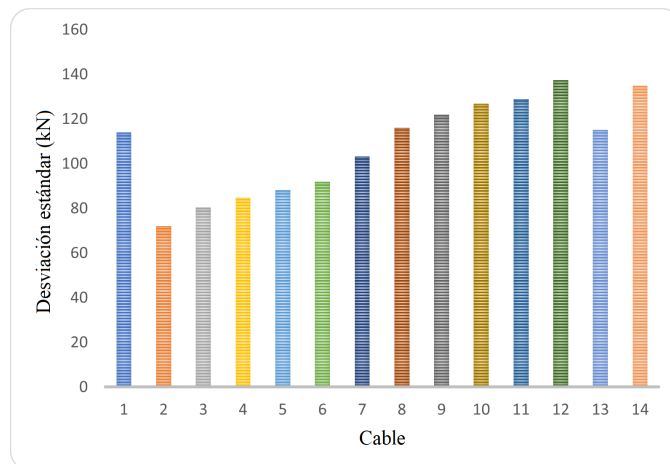


Figura 5.6: Relación tirante y desviación estándar (Semi-arpa 1).

5.3.3. Visión por computadora

La metodología de visión por computadora se empleó como una alternativa para determinar la fuerza de tensión de los cables pertenecientes a puentes debido a su ventaja para adquirir datos de forma remota, siendo descrita detalladamente en la Figura 5.7.

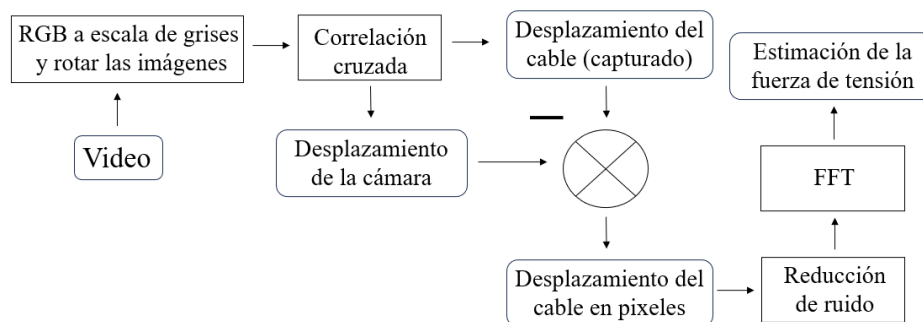


Figura 5.7: Metodología para determinar la tensión de los tirantes mediante visión por computadora.

Inicialmente, la metodología requiere un paso de calibración para calcular los parámetros intrínsecos y coeficientes de distorsión de la cámara con el objetivo de compensar las deformaciones de la imagen causadas por el sensor de la cámara y sus elementos ópticos. La calibración se realizó tomando varias fotografías de una mesa de ajedrez desde diferentes posiciones. Posteriormente, el segundo paso del algoritmo es cambiar las imágenes de formato RGB (rojo, azul, verde) a escala de grises y rotarla a su posición normal respecto al eje del sensor de la cámara, buscando una posición horizontal o vertical del cable. Se utilizó la transformación de Affine (Weisstein, 2024) para rotar las imágenes, considerando los ángulos de inclinación de diseño de cada cable. El tercer paso es establecer dos puntos de interés como plantillas para determinar los desplazamientos mediante correlación cruzada. En este caso, la metodología implementada fue la correlación cruzada normalizada, que se representa como (Dong y Catbas, 2021):

$$\alpha_{ncorr(x,y)} = \frac{\sum_{x',y'} (T(x',y') * I(x+x',y+y'))}{\sqrt{\sum_{x',y'} [T(x',y')]^2 * \sum_{x',y'} [I(x+x',y+y')]^2}} \quad (5.9)$$

Siendo $\alpha_{ncorr(x,y)}$ la correlación cruzada normalizada (valores de 0 a 1), I es la intensidad de una sección de la imagen en escala de grises que se compara con la plantilla, T es la intensidad de la imagen de la plantilla en escala de grises y $(x,y) - (x',y')$ son las coordenadas de las regiones de búsqueda en las imágenes.

A través de una rápida inspección visual, se seleccionan dos puntos. El primero debe ser un elemento destacado dentro del cable, por ejemplo, un tornillo, un alambre o una mancha. En el caso del segundo, debe ser un elemento estable fuera del puente y lo más cerca posible de la estructura. El elemento no debe presentar desplazamientos durante la sesión de registro, por ejemplo, un árbol o una montaña. Las

dos plantillas elegidas determinan los desplazamientos del cable y el desplazamiento de la cámara, capturados en unidades de píxeles, respectivamente.

Para calcular la tensión del cable de forma indirecta es necesario conocer la frecuencia de sus modos de vibración en el eje transversal del cable, que se mide a partir de sus desplazamientos en un periodo determinado. En el método propuesto, una cámara instalada en un trípode en el puente graba un video de un cable en movimiento. El desplazamiento capturado, CD , es una suma de los movimientos producidos por la cámara y las oscilaciones del cable, que se describe en la Ecuación 5.10.

$$CD = CAMD + CABD \quad (5.10)$$

Donde CD es el desplazamiento capturado, $CAMD$ son los desplazamientos producidos por la cámara y $CABD$ es el desplazamiento del cable.

Los desplazamientos de un puente son el resultado de la combinación de varios factores, siendo el movimiento natural del puente y la carga aplicada (tráfico o peatones) los factores que más contribuyen al mismo. El desplazamiento producido por el comportamiento natural del puente depende de las características de la estructura, por ejemplo, como el Puente Río Papaloapan es atirantado, sus desplazamientos son relativamente grandes con bajas frecuencias, mientras tanto, la carga de tráfico induce desplazamientos con altas frecuencias. Además de este rango de frecuencias, el trípode de la cámara también añade movimientos a los desplazamientos registrados. Entonces, la Ecuación 5.10 se puede modificar como:

$$CD = (ND + ID) + TD + CABD \quad (5.11)$$

Donde ND es un movimiento natural, ID son los desplazamientos inducidos, TD es el movimiento producido por el trípode y $CABD$ es el desplazamiento del cable.

Como se mencionó anteriormente, durante la determinación del desplazamiento del cable, es necesario obtener el movimiento que sufre el cable con respecto a un elemento inmóvil (es decir, los desplazamientos de la cámara). Como resultado se obtuvieron cuatro arreglos de desplazamiento, dos para los movimientos de cámara (X_m, Y_m) y dos para los desplazamientos de cable (X_c, Y_c). El método de correlación cruzada devuelve la posición de las coordenadas en píxeles; por lo tanto, las cuatro matrices están en las mismas unidades. En este caso, no se requiere una transformación del desplazamiento de píxeles a milímetros, ya que la frecuencia del modo de vibrar puede obtenerse a partir de la información en píxeles.

Considerando los errores generados por el cálculo del desplazamiento a partir de la correlación cruzada, es conveniente actualizar la Ecuación 5.11 como:

$$CD = (ND + ID + TD) + CABD + ECAB \quad (5.12)$$

Donde $ECAB$ es el error correspondiente a la metodología utilizada durante la determinación del desplazamiento del cable. Luego, los desplazamientos de la cámara se restan al desplazamiento capturado como:

$$CD - (ND + ID + TD + EB) = CABD + ECAB - EB \quad (5.13)$$

Donde EB es el error relacionado con la determinación del movimiento de la cámara. La resta del desplazamiento aparente de la cámara al desplazamiento capturado da como resultado el comportamiento del puente más una combinación de

errores debido al método de visión artificial. Comúnmente, este tipo de error está relacionado con la distancia de separación de la cámara-objeto, la dinámica de seguimiento del puente y la estimación de los parámetros intrínsecos de la cámara (Xu et al., 2018). Según Yu et al. (2017), se recomienda restar el valor medio y la tendencia de cada serie temporal. Además, en algunos casos, se podrían detectar datos atípicos estableciendo un umbral de 3σ e interpolarlos.

Los últimos pasos son aplicar un filtro pasa altas como el de Butterworth, así como el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés). De esta forma, la vibración definida por los desplazamientos podría analizarse en el dominio de la frecuencia. Como consecuencia de errores de medición y desplazamientos remanentes del puente, es normal que algunas zonas de las gráficas presenten ruido, y la frecuencia del modo de vibrar varíe.

Cuando la frecuencia de vibrar se extrae de los resultados de FFT, la fuerza de tensión debe calcularse de acuerdo con la metodología validada en la Sección 5.3.2, la cual indica que la constante (definida a priori) multiplica el valor de la frecuencia dando como resultado la fuerza de tensión (kN). Para mejorar la precisión de la metodología, se implementa el promedio de las primeras cinco frecuencias naturales del cable.

5.4. Prueba de validación de la metodología para el cálculo de tensión en tirantes

En la historia del Puente Río Papaloapan se han realizado varias mediciones simultáneas entre gato hidráulico y acelerómetros. Debido a esto, la metodología para determinar la fuerza de tensión sin parámetros mecánicos de los cables podría validarse utilizando el historial de mediciones de frecuencia de cada cable. Para este ensayo se analizaron 13 cables aleatorios, la Tabla 5.3 presenta la posición del cable y semi-arpa. En estos casos, la constante, C (Ecuación 5.3), fue un valor promedio calculado con información de 2016 a 2021. El número de elementos empleados para calcular el valor promedio constante es diferente para cada cable debido a su información histórica.

El ensayo de validación consistió en calcular la fuerza de tensión indirecta de los 13 cables descritos en Tabla 5.3 usando la Ecuación 5.3, lo que significa que el valor promedio constante debe ser multiplicado por la nueva estimación de frecuencia de vibración obtenida por acelerómetros. Para obtener el valor de la frecuencia, se utilizó un promedio de las primeras cinco frecuencias naturales del cable. Al final, la fuerza de tensión indirecta se comparó con la fuerza de tensión directa determinada por el gato hidráulico.

Las mediciones se desarrollaron durante la noche de las 23:00 a las 03:00 horas, mientras el puente estaba cerrado al tráfico vehicular. Los datos de aceleración se registraron con una frecuencia de muestreo de 128 Hz durante 2 minutos. Después de eso, la frecuencia de los primeros cinco modos de vibración de cada cable es analizado mediante la Transformada Rápida de Fourier seguido de la identificación del máximo pico de intensidad en el espectro. Finalmente, se calculó el promedio de las frecuencias detectadas y multiplicó por sus correspondientes constantes. Por otro lado, el gato hidráulico determinó directamente la fuerza de tensión en tres tiempos

Tabla 5.3: Cables analizados durante la prueba de validación.

Posición del cable	Semi-arpa
1	1
8	1
1	2
1	3
6	3
12	3
1	4
6	4
14	4
7	6
14	7
1	8
14	8

diferentes, cuyo valor promedio se consideró como referencia.

La comparación entre medidas directas e indirectas se presenta en la Tabla 5.4, donde el porcentaje de diferencia media es de 1.28% y la desviación estándar de 1.1%. El valor máximo de diferencia es de 3.44% correspondiente al Cable en posición 6 de la Semi-arpa número 3, mientras que el valor mínimo es de 0.05% correspondiente al Cable en posición 14 de la Semi-arpa número 7. De acuerdo con los resultados, esta metodología proporciona la estimación de la fuerza de tensión indirectamente del cable dentro del 5% de diferencia (previamente estimado) con respecto a la metodología de referencia utilizada para la calibración de constantes.

Tabla 5.4: Comparación de los resultados de tensión obtenidos mediante acelerómetro y gato hidráulico.

Posición del cable	Semi-arpa	Fuerza de tensión indirecta (kN)	Fuerza de tensión directa (kN)	Límite máximo de diseño	Diferencia absoluta (kN)	Diferencia (%)
1	1	2435.3	2410.8	2685.2	24.500	1.02
8	1	2316.72	2342.2	2920.4	25.480	1.09
1	2	2090.34	2146.2	2567.6	55.860	2.60
1	3	1996.26	1940.4	2567.6	55.860	2.88
6	3	1845.34	1911	2567.6	65.660	3.44
12	3	3005.66	3008.6	3273.2	2.940	0.10
1	4	2167.76	2195.2	2685.2	27.440	1.25
6	4	1971.76	1960	2567.6	11.760	0.60
14	4	2582.3	2538.2	3733.8	44.100	1.74
7	6	1953.14	1930.6	2802.8	22.540	1.17
14	7	2029.58	2028.6	3498.6	0.980	0.05
1	8	2268.7	2283.4	2685.2	14.700	0.64
14	8	2673.44	2675.4	3733.8	1.960	0.07

5.5. Prueba con mesa vibratoria

Con el propósito de crear y optimizar el algoritmo que permite determinar tensión de tirantes basados en video-imágenes, se realizaron pruebas controladas en una mesa vibratoria. Las frecuencias a la que se configuró las vibraciones verticales de la mesa fueron 11.31, 12.69, 14.53, 17.66, 21.87 y 26.37 Hz. En cada frecuencia, se desarrollaron 3 sesiones de 2 minutos cada una, con una resolución de 3840 x 2160 pixeles y 60 fps. Los resultados de las pruebas se compararon directamente con la frecuencia a la cual se configuró la mesa vibratoria, este proceso se desarrolló empleando una cámara fija (iPhone). Los resultados de la prueba señalan que la metodología propuesta presenta un Error Medio Cuadrático de aproximadamente 0.002 Hz, máxima diferencia de 0.0046 Hz (0.03%), mínima discrepancia de 0 Hz, promedio de 0.0019 Hz (0.01%), y una desviación estándar de 0.0012 Hz (0.009%). Lo cual, de acuerdo con lo mencionado es suficiente para no superar un 5% de la tensión total como propagación de errores (Tabla 5.5). Figura 5.8 ilustra el experimento en laboratorio con la mesa de vibración.

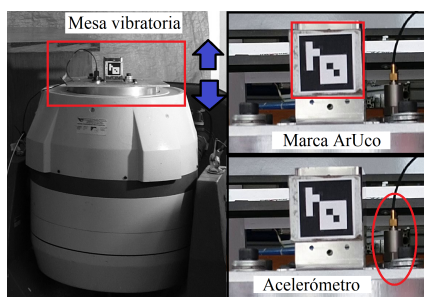


Figura 5.8: Experimento en laboratorio con la mesa de vibración y cámara fija.

Tabla 5.5: Resultados de la prueba controlada utilizando mesa vibratoria y cámara fija.

Prueba cámara	Frecuencia excitación (Hz)	Frecuencia resultante (Hz)	Diferencia (Hz)	Diferencia (%)
1	11.31	11.308	0.002	0.0176
2	11.31	11.3075	0.0025	0.0221
3	11.31	11.31	0	0
4	12.69	12.692	0.002	0.0157
5	12.69	12.6854	0.0046	0.0362
6	12.69	12.6927	0.0027	0.021
7	14.53	14.5286	0.0014	0.009
8	14.53	14.5268	0.0032	0.022
9	14.53	14.5306	0.0006	0.0041
10	17.66	17.6594	0.0006	0.003
11	17.66	17.6605	0.0005	0.002
12	17.66	17.6625	0.0025	0.014
13	21.87	21.8731	0.0031	0.014
14	21.87	21.8716	0.0016	0.007
15	21.87	21.8701	0.0004	0.0004
16	26.37	26.3729	0.0029	0.01
17	26.37	26.3726	0.0026	0.009
18	26.37	26.3689	0.0011	0.004

5.6. Aplicación en el Puente Río Papaloapan

El Puente Río Papaloapan cuenta en la parte lateral con zonas peatonales, que permiten realizar la medición sin contacto, de forma segura. Para validar la calidad de la metodología propuesta en campo, se propusieron 2 pruebas, la primera tuvo el objetivo de evaluar los valores de tensión obtenidos mediante la cámara respecto a las mediciones directas realizadas por gatos hidráulicos, y la segunda, analizar el desempeño de la cámara en términos de frecuencias de vibrar respecto a un acelerómetro. Durante la primera campaña de medición se utilizó el iPhone instalado en un trípode, acelerómetros y un gato hidráulico. En este caso, las mediciones a través del gato hidráulico fueron desarrolladas y proporcionadas por CAPUFE. Los tirantes fueron seleccionados de acuerdo con el plan de mantenimiento del Puente Río Papaloapan (Tabla 5.6).

Tabla 5.6: Cables analizados durante la primera campaña de medición en el Puente Río Papaloapan.

Posición del cable	Semi-arpa
8	1
1	1
1	3
6	3
12	3
14	5
7	6
14	7
14	8
6	4
14	4

La segunda campaña de medición se basó en medir con el iPhone montado en un trípode al mismo tiempo que un acelerómetro. Los Cables estudiados se encontraban en las posiciones 14, 12, 10, 8, 6, 5, 4 y 2 de la Semi-arpa número 2. De esta manera, los elementos seleccionados fueron una muestra representativa del resto del comportamiento de los cables dentro del puente.

En todas las mediciones, se adjuntó un acelerómetro a los cables mediante una correa (Figura 5.9) con una frecuencia de muestreo de 128 Hz, cuyas lecturas se utilizaron como referencia al evaluar las frecuencias de los modos de vibrar calculadas con el método sin contacto propuesto.

5.6.1. Resultados de la primera campaña de medición

La primera campaña de medición se realizó en la madrugada, es decir, bajo condiciones de poca iluminación, los instrumentos empleados fueron una cámara de video, acelerómetro y gato hidráulico. En este experimento se utilizó la cámara con una resolución de 4k y una adquisición de 60 cuadros por segundo. La cámara se instaló en un trípode, se colocó a 70 centímetros aproximadamente del tirante y las mediciones se hicieron con tráfico vehicular aleatorio. El acelerómetro midió a 128 Hz simultáneamente con la cámara, pero el gato hidráulico recolectó dos minutos

antes de la prueba ya que necesitaba tener el tráfico cerrado en su totalidad. Los resultados se resumen en las Tablas 5.7-5.9, en la primera se comparan las tensiones obtenidas con la cámara y el acelerómetro calculando el promedio de las frecuencias con 5 modos de vibrar, donde los tirantes más cortos (Tirante 1) dieron discrepancias de 207 kN (8.5 %) y 92 kN (4.6 %), sin embargo, considerando el resto de información, la mínima diferencia de 3.95 kN (0.002 %), promedio de 48.75 kN (2.0353 %), desviación estándar de 61.7 kN (2.56 %) y Error Medio Cuadrático de 76.4 kN. La segunda Tabla compara las tensiones calculadas por la cámara y el acelerómetro, pero en el proceso matemático se utilizó el mismo número de modos de vibrar, reduciendo el porcentaje de diferencia en la mayoría de los casos, máxima discrepancia de 92 kN (3 %), mínima de 0.7 kN (0.04 %), promedio de 21.5 kN (0.87 %), desviación estándar de 25.5 kN (0.89 %) y Error Medio Cuadrático de 98.8 kN; esto indica que la cámara puede detectar con precisión el valor de las frecuencias con la desventaja de no poder apreciar en todos los casos los 5 modos de vibrar. En la última Tabla, se comparó la tensión proporcionada por la cámara y el gato hidráulico, donde 8 de 10 tirantes tienen discrepancias dentro de la tolerancia buscada, mientras que los otros dos cables, presentan errores de 230.6 kN (9.5 %) y 154 kN (7.9 %) debido a que son los tirantes más cortos, teniendo menores magnitudes de vibración y altas frecuencias. En promedio las diferencias fueron de 69.5 kN, desviación estándar igual a 74.04 kN y un Error Medio Cuadrático de 98.8 kN. Es importante resaltar que las mediciones fueron llevadas a cabo en la noche y con muy poca iluminación, a pesar de eso, la mayoría de los resultados cumplen con la tolerancia.



Figura 5.9: Instrumentación durante pruebas en campo.

Tabla 5.7: Resultados obtenidos en la primera campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (5 modos de vibrar).

Tirante	Diferencia (%)	Diferencia (kN)
S1T8	0.711	16.3758
S1T1	8.547	207.9952
S3T1	4.643	92.9334
S3T6	0.856	15.8172
S3T12	3.079	92.2376
S5T14	0.274	8.2908
S6T7	0.002	3.9592
S7T14	1.863	38.0044
S8T14	0.531	14.1806
S4T6	0.392	7.7322
S4T14	1.49	38.759

Tabla 5.8: Resultados obtenidos en la primera campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (n modos de vibrar).

Tirante	Diferencia (%)	Diferencia (kN)
S1T8	0.711	16.3758
S1T1	0.578	15.1704
S3T1	1.242	25.6956
S3T6	0.042	0.784
S3T12	3.079	92.2376
S5T14	0.188	5.6938
S6T7	0.462	8.967
S7T14	1.863	38.0044
S8T14	0.532	14.1806
S4T6	0.393	7.742
S4T14	0.482	12.6616

Tabla 5.9: Resultados obtenidos en la primera campaña de medición empleando cámara fija y gato hidráulico.

Tirante	Diferencia (%)	Diferencia (kN)
S1T8	1.038	24.059
S1T1	9.567	230.6626
S3T1	7.937	154.0168
S3T6	2.498	47.7456
S3T12	2.637	79.3604
S6T7	0.35	6.7914
S7T14	0.013	26.7736
S8T14	0.815	21.8148
S4T6	0.001	2.1658
S4T14	3.999	101.4986

5.6.2. Resultados de la segunda campaña de medición

Los siguientes resultados se obtuvieron en el Puente Río Papaloapan durante la prueba de campo descrita. De la Figura 5.10 a la 5.16 se ilustra la comparación entre la cámara (línea roja) y el acelerómetro (línea azul) en el dominio de la frecuencia con amplitud normalizada. La frecuencia de los diferentes modos de vibración se calculó aplicando FFT a las oscilaciones capturadas de los cables, como se describe en la Sección 5.3.3. De los resultados en cifras, la amplitud de la frecuencia fundamental determinada por el método sin contacto para los Cables 14, 12, 10 y 8 es demasiado grande para distinguir otras frecuencias. Sin embargo, esto es solo un efecto de la escala gráfica y esta información se puede recuperar aplicando un filtro adecuado en el dominio de la frecuencia. En cuanto a los resultados de los Cables de las posiciones 6, 5, 4 y 2, presentan un ruido residual en un rango de 9 Hz en el eje de frecuencia. Considerando la frecuencia del ruido, probablemente este sea producido por el movimiento del puente (desplazamientos inducidos) y del trípode.

Las Tablas 5.10 y 5.11 presentan las frecuencias muestreadas extraídas de las Figuras 5.10 a 5.16, y la estimación de la fuerza de tensión. Adicionalmente, la Tabla 5.12 compila los resultados obtenidos, donde las mayores diferencias de tensión se encontraron en los Cables S2T4 y S2T2 posición con 1.5 % y 3.2 %, respectivamente. Esto podría deberse al límite de resolución de la cámara ya que los desplazamientos de los cables eran menores que su resolución espacial. La diferencia mínima corresponde al Cable en la posición 12 con 0.015 %, el valor medio del porcentaje de discrepancia fue 0.77 % y la desviación estándar igual a 1.14 %. Por otro lado, la evaluación de las frecuencias de vibrar arrojó un valor máximo de diferencia igual a 0.06 Hz, mínimo de -0.0409 Hz, promedio de 0.0035 Hz, desviación estándar de 0.0182 Hz y Error Medio Cuadrático de 0.0181 Hz.

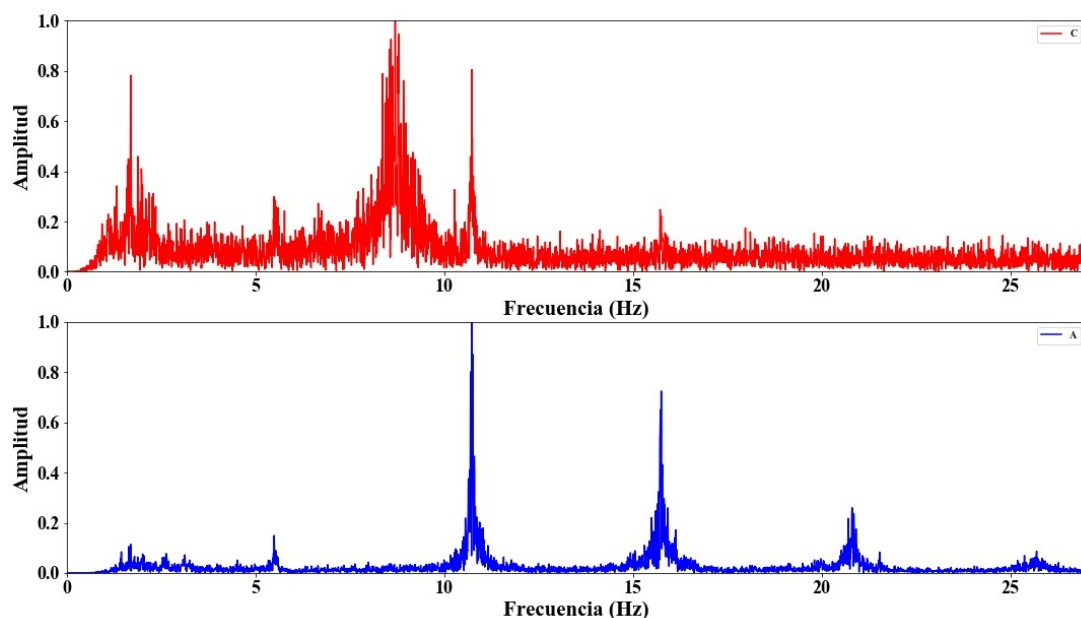


Figura 5.10: Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T2S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).

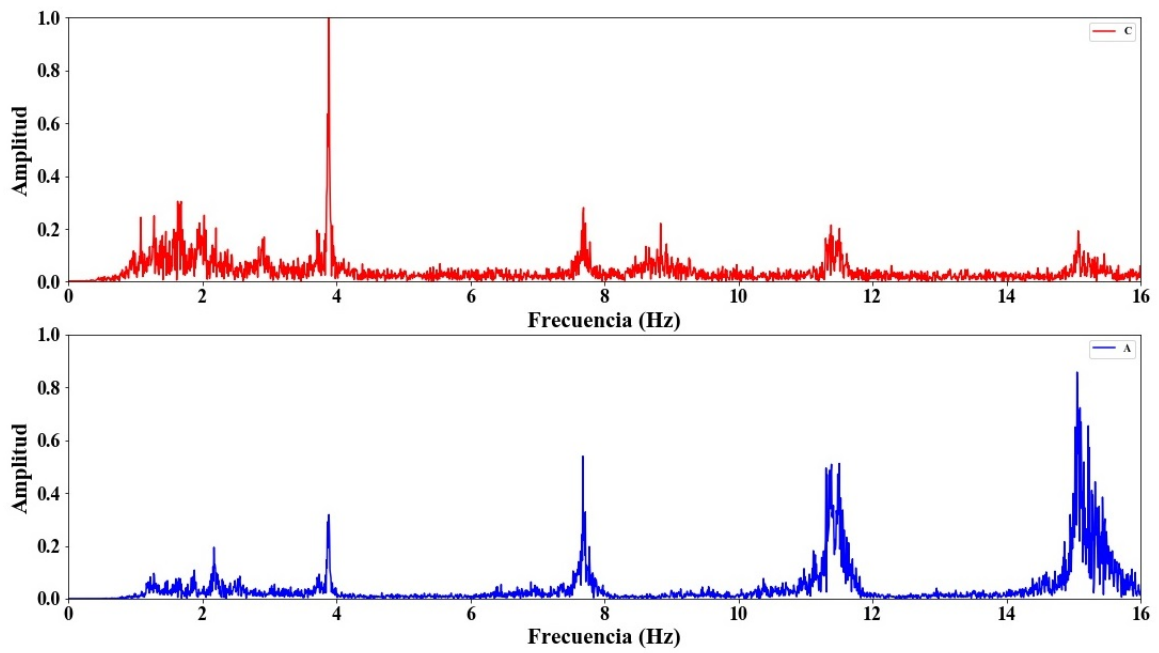


Figura 5.11: Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T4S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).

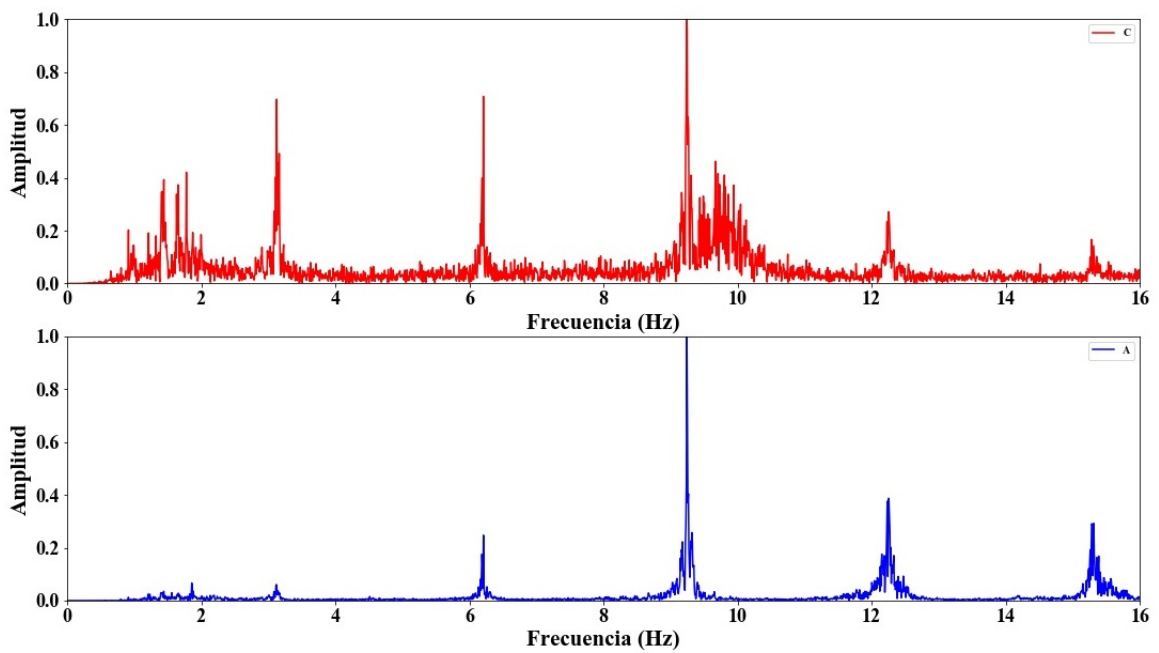


Figura 5.12: Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T5S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).

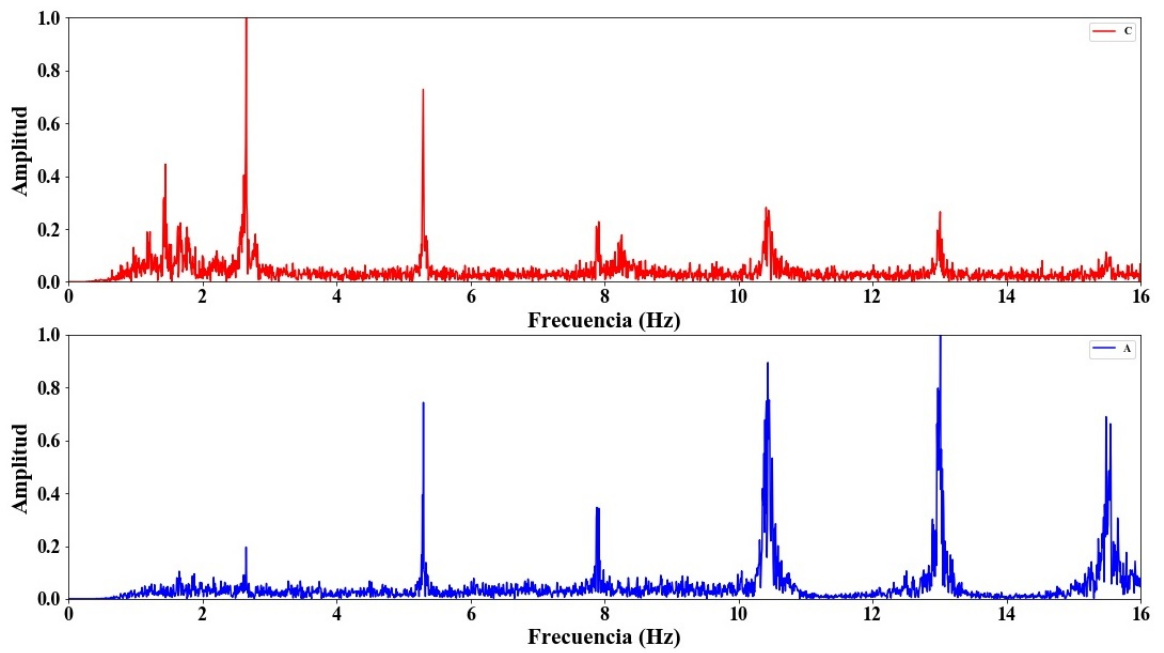


Figura 5.13: Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T6S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).

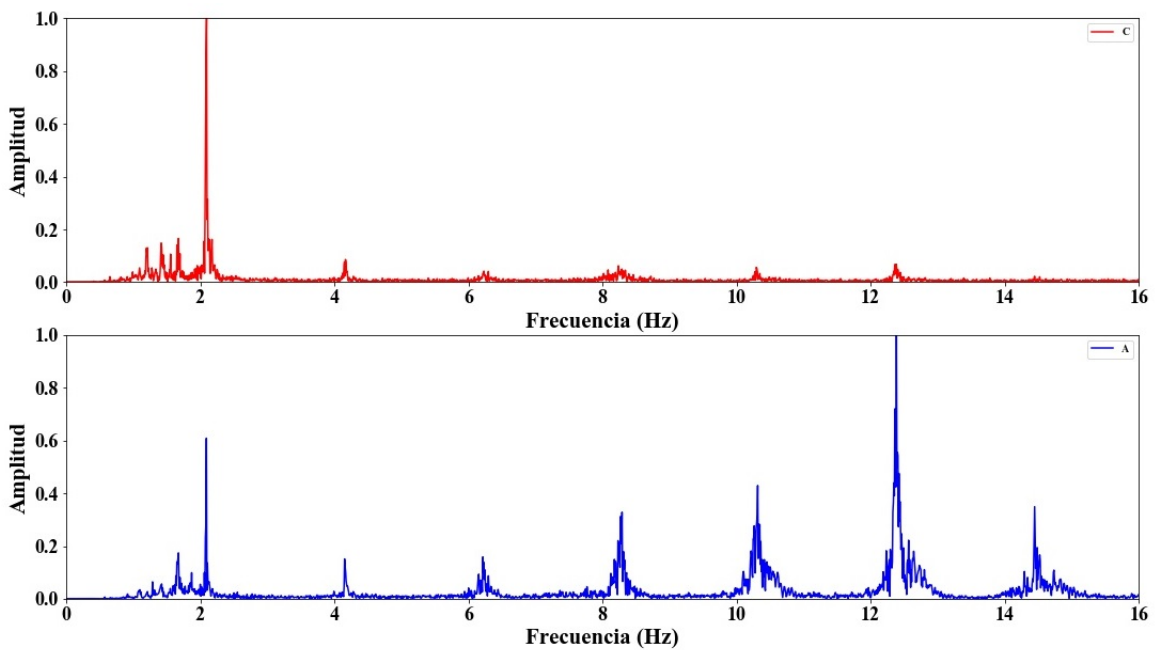


Figura 5.14: Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T8S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).

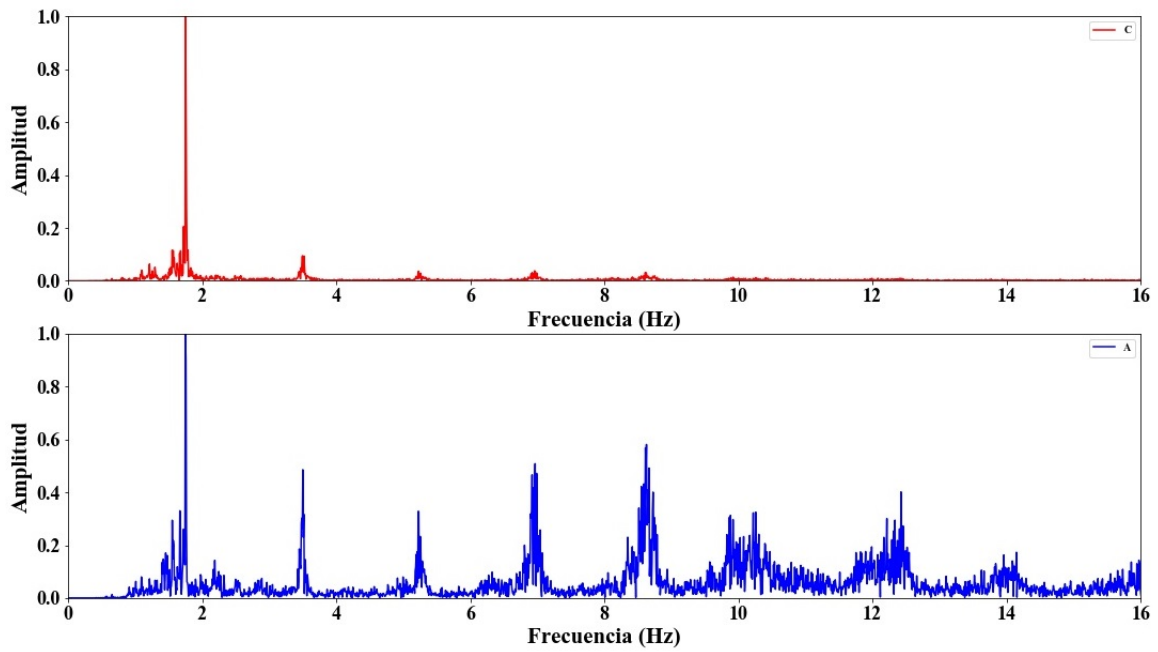


Figura 5.15: Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T10S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).

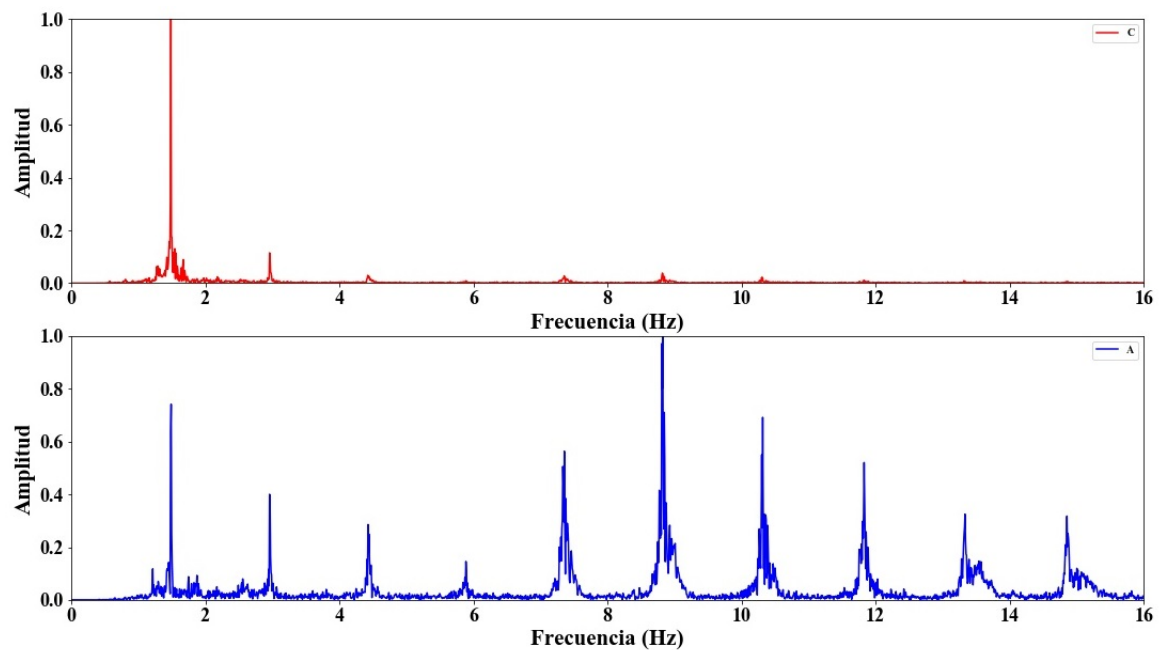


Figura 5.16: Resultado en el dominio de la frecuencia correspondiente al Cable T12S2 (Rojo=Cámara, Azul=Acelerómetro).

Tabla 5.10: Resultados obtenidos en la segunda campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (primer segmento).

Tirante 14 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	1.1066	2.2059	3.3126	4.4629	5.4749	1.1041	2162.2
Acelerómetro	1.1063	2.2055	3.3190	4.4029	5.4719	1.1003	2147.1
Tirante 12 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	1.4869	2.959	4.4239	-	7.3535	1.4748	2794.5
Acelerómetro	1.48294	2.9658	4.4339	5.88727	7.35538	1.4750	2794.9
Tirante 10 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	1.7527	3.4981	5.2214	6.9594	8.6238	1.7370	2636.4
Acelerómetro	1.75105	3.49455	5.2305	6.90607	8.60428	1.73243	2622.4
Tirante 8 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	2.0940	4.1659	6.2305	8.2364	10.2936	2.0680	2313.9
Acelerómetro	2.0915	4.1679	6.2215	8.2676	10.2758	2.06829	2314.7
Tirante 6 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	2.6544	5.2945	7.9130	10.4096	13.0067	2.6185	2013.8
Acelerómetro	2.65236	5.2975	7.89204	10.4505	12.9727	2.61767	2012.9

Tabla 5.11: Resultados obtenidos en la segunda campaña de medición empleando cámara fija y acelerómetros (segundo segmento).

Tirante 5 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	3.1258	6.2077	9.2384	12.2471	15.2778	3.07312	1994.0
Acelerómetro	3.13029	6.20854	9.24217	12.2312	15.2797	3.07279	1993.3
Tirante 4 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	3.8909	7.6866	11.3798	15.0656	-	3.8022	1982.5
Acelerómetro	3.88985	7.69211	11.3776	15.0631	18.5735	3.77308	1952.1
Tirante 2 Semi-arpa 2							
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)	Promedio (Hz)	Resultado (kN)
Cámara fija	5.4917	10.7268	15.7127	-	-	5.3218	1261.2
Acelerómetro	5.49044	10.7236	15.7143	20.7931	25.8352	5.23711	1221.0

Tabla 5.12: Resumen de los resultados determinados en la segunda campaña de medición utilizando cámara fija y acelerómetro.

Posición del cable	Número de modo de vibrar	Desviación estándar (Hz)	Diferencia entre el valor medio (Hz)	Diferencia en tensión (kN)	Diferencia en tensión (%)
14	5	0.0301	0.0037	15.1	0.704
12	4	0.0074	0.0002	0.4	0.015
10	5	0.0288	0.00457	13.9	0.532
8	5	0.0185	0.00029	0.8	0.035
6	5	0.0286	0.00083	0.8	0.044
5	5	0.0085	0.00033	0.7	0.036
4	4	0.0037	0.0291	30.4	1.558
2	3	0.0026	0.0846	40.1	3.292

5.7. Conclusiones y discusiones

En este capítulo se validó una metodología alternativa para estimar la fuerza de tensión indirecta de cables en puentes atirantados sin conocer a priori el área de la sección transversal, que es el número de torones que están asociados a la masa por unidad de longitud; pero contemplando datos históricos de tensión directa y frecuencias de vibración de los cables. Además, la metodología se complementó con un enfoque de visión por computadora para desarrollar mediciones remotas. En general, este método consiste en grabar con una cámara un video corto de los cables (con el tráfico de vehículos) desde una cierta distancia y luego analizar los desplazamientos en el dominio de frecuencia para recuperar las oscilaciones por segundo de los modos de vibrar. A continuación, se presenta la lista de conclusiones obtenidas:

- El enfoque para la estimación de la fuerza de tensión se validó utilizando datos históricos y comparando el rendimiento con acelerómetros y datos de gatos hidráulicos del Puente Río Papaloapan. Los resultados arrojaron un porcentaje de diferencia dentro del 3.5 %, lo que indica que el enfoque para la estimación de la fuerza de tensión podría usarse como un método alternativo para monitorear las condiciones de los puentes atirantados. Es importante mencionar que la desviación estándar de la estimación de tensión indirecta depende de la precisión de la medición de referencia y de la estimación de frecuencia.
- Los resultados de la prueba controlada señalan un Error Medio Cuadrático de aproximadamente 0.002 Hz, máxima diferencia con respecto a las frecuencias de referencia de 0.0046 Hz (0.03 %), mínima discrepancia de 0 Hz, promedio de 0.0019 Hz (0.01 %), y una desviación estándar de 0.0012 Hz (0.009 %).
- En la primera campaña realizada sobre el Puente Río Papaloapan, se compararon las tensiones obtenidas con la cámara y el acelerómetro calculando el promedio de las frecuencias con 5 modos de vibrar, donde los tirantes más cortos (Tirante 1) dieron discrepancias de 207 kN (8.5 %) y 92 kN (4.6 %), sin embargo, considerando el resto de información, la mínima fue de 3.95 kN (0.002 %), promedio de 48.75 kN (2.0353 %), desviación estándar de 61.7 kN (2.56 %)

y Error Medio Cuadrático de 76.4 kN. Comparando las tensiones calculadas por la cámara y el acelerómetro, pero considerando el mismo número de modos de vibrar en el proceso matemático se redujo el porcentaje de diferencia en la mayoría de los casos, máxima discrepancia de 92 kN (3%), mínima de 0.7 kN (0.04%), promedio de 21.5 kN (0.87%), desviación estándar de 25.5 kN (0.89%) y Error Medio Cuadrático de 32.5 kN; esto indica que la cámara puede detectar con precisión el valor de las frecuencias con la desventaja de no poder apreciar en todos los casos los 5 modos de vibrar. En el último análisis, se comparó la tensión proporcionada por la cámara y el gato hidráulico, donde 8 de 10 tirantes tienen discrepancias dentro de la tolerancia buscada, mientras que los otros dos cables, presentan errores de 230.6 kN (9.5%) y 154 kN (7.9%) debido a que son los tirantes más cortos, teniendo menores magnitudes de vibración y altas frecuencias. En promedio las diferencias fueron de 69.5 kN, desviación estándar igual a 74.04 kN y un Error Medio Cuadrático de 98.8 kN. Es importante resaltar que las mediciones fueron llevadas a cabo en la noche y con muy poca iluminación, a pesar de eso, la mayoría de los resultados cumplen con la tolerancia.

- De acuerdo con los resultados obtenidos durante la segunda campaña de medición, las mayores diferencias de tensión entre el acelerómetro y la cámara fue en los Cables S2T4 y S2T2 con 1.5% y 3.2%, respectivamente. Esto podría deberse al límite de resolución de la cámara ya que los desplazamientos de los cables eran menores que su resolución espacial. Aparte de eso, la diferencia mínima corresponde al Cable en la posición 12 con 0.015%, el valor medio del porcentaje de discrepancia fue 0.77% y la desviación estándar igual a 1.14%. Por otro lado, la evaluación de las frecuencias de vibrar arrojó un valor máximo de diferencia igual a 0.06 Hz, mínimo de -0.0409 Hz, promedio de 0.0035 Hz, desviación estándar de 0.0182 Hz y Error Medio Cuadrático de 0.0181 Hz.
- Así mismo, la metodología complementada mediante visión por computadora logró registrar información (con tránsito vehicular) de cables de puentes de difícil acceso para dispositivos de medición por contacto. Haciéndose necesaria únicamente la estimación de la fuerza de tensión directa mediante un instrumento convencional como son los gatos hidráulicos. Además de esto, la visión por computadora brinda a los usuarios las ventajas de reducción de costos, facilidad de operación y una campaña de medición más segura, ya que no es necesario acceder a los cables, es decir, se pueden registrar datos de forma remota.
- Considerando todas las pruebas realizadas implementando la cámara fija, se concluye que el método indirecto para estimar la fuerza de tensión de cables en puentes atirantados puede ser utilizado como método de inspección alternativo cuando no se disponga de información sobre los parámetros mecánicos de los cables.
- En esta investigación, la distancia cámara-objetivo implementada fue de aproximadamente 70 centímetros. Sin embargo, dependiendo de las características

del cable, aún podría brindar resultados precisos incluso si la distancia es mayor. En el caso de necesitar más precisión, se podría mejorar incrementando la resolución de la imagen o utilizando un algoritmo que permita obtener una resolución al subpixel.

5.8. Referencias

Cho, S., Yim, J., Shin, S. W., Jung, H. J., Yun, C. B., & Wang, M. L. (2013). Comparative field study of cable tension measurement for a cable-stayed bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 18(8), 748-757. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000421](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000421)

Dong, C. Z., & Catbas, F. N. (2021). A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels. *Structural Health Monitoring*, 20(2), 692-743. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921720935585>

Du, W., Lei, D., Bai, P., Zhu, F., & Huang, Z. (2020). Dynamic measurement of stay-cable force using digital image techniques. *Measurement*, 151, 107211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107211>

Feng, M. Q., Fukuda, Y., Feng, D., & Mizuta, M. (2015). Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response. *Journal of Bridge Engineering*, 20(12), 04015023. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000747](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000747)

Feng, D., Scarangelo, T., Feng, M. Q., & Ye, Q. (2017). Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor. *Measurement*, 99, 44-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.020>

Ghilani, C. D. (2017). *Adjustment computations: spatial data analysis*. John Wiley & Sons.

Hoskere, V., Park, J. W., Yoon, H., & Spencer Jr, B. F. (2019). Vision-based modal survey of civil infrastructure using unmanned aerial vehicles. *Journal of Structural Engineering*, 145(7), 04019062. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002321)

Jana, D., & Nagarajaiah, S. (2021). Computer vision-based real-time cable tension estimation in Dubrovnik cable-stayed bridge using moving handheld video camera. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(5), e2713. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2713>

Jo, H. C., Kim, S. H., Lee, J., Sohn, H. G., & Lim, Y. M. (2021). Sag-based cable tension force evaluation of cable-stayed bridges using multiple digital images. *Measurement*, 186, 110053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110053>

Khuc, T., Nguyen, T. A., Dao, H., & Catbas, F. N. (2020). Swaying displacement

measurement for structural monitoring using computer vision and an unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 159, 107769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107769>

Kim, S. W., Jeon, B. G., Kim, N. S., & Park, J. C. (2013). Vision-based monitoring system for evaluating cable tensile forces on a cable-stayed bridge. *Structural Health Monitoring*, 12(5-6), 440- 456. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921713500513>

Kim, S. W., & Kim, N. S. (2013). Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing. *NDT & e International*, 59, 25-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.05.002>

Lee, G., Kim, S., Ahn, S., Kim, H. K., & Yoon, H. (2022). Vision-based cable displacement measurement using side view video. *Sensors*, 22(3), 962. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22030962>

Ma, Z., Choi, J., & Sohn, H. (2022). Noncontact cable tension force estimation using an integrated vision and inertial measurement system. *Measurement*, 199, 111532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111532>

Martínez, A., Carrion, F., Quintana, J., Hernandez, J., Gasca, H., Hernandez, A., ... & Valenzuela, I. (2019). Assessment for indirect vs direct methods to know the tension of cables in stayed bridges. In Proc., IABSE-SMIS 2nd Bridge Engineering Workshop. Queretaro, Mexico: Mexican Group of The International Association for Bridge and Structural Engineering.

Microstrain, (2022, April 10). G-Link -LXRS Low-cost Integrated Accelerometer Node. Disponible en línea: <https://www.microstrain.com/wireless-sensors/g-link>.

NTI Audio, (2024). Fast Fourier Transformation FFT - Basics. Disponible en línea: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>

Ribeiro, D., Calçada, R., Ferreira, J., & Martins, T. (2014). Non-contact measurement of the dynamic displacement of railway bridges using an advanced video-based system. *Engineering Structures*, 75, 164-180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.051>

Support Apple, (2022, April 1). iPhone 12 Pro - Technical Specifications. Disponible en línea: https://support.apple.com/kb/SP831viewlocale_en_US&locale_es_ES.

Tian, Y., Zhang, C., Jiang, S., Zhang, J., & Duan, W. (2021). Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(1), 73-88. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12567>

Weisstein, Eric W. (2024). Affine Transformation. From MathWorld—A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/AffineTransformation.html>

Xia, Z., Lin, Y., Wang, Q., & Fan, Q. (2021). Damage detection method for cables based on the change rate of wavelet packet total energy and a neural network. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(3), 593-608. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00471-2>

Xu, Y., Brownjohn, J., & Kong, D. (2018). A non- contact vision- based system for multipoint displacement monitoring in a cable- stayed footbridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(5), e2155. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2155>

Yang, Y., Sanchez, L., Zhang, H., Roeder, A., Bowlan, J., Crochet, J., Charles, F. & Mascareñas, D. (2019). Estimation of full- field, full- order experimental modal model of cable vibration from digital video measurements with physics- guided unsupervised machine learning and computer vision. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(6), e2358. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2358>

Yu, J., Zhu, P., Xu, B., & Meng, X. (2017). Experimental assessment of high sampling- rate robotic total station for monitoring bridge dynamic responses. *Measurement*, 104, 60-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.014>

Yu, S., & Zhang, J. (2020). Fast bridge deflection monitoring through an improved feature tracing algorithm. *Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(3), 292-302. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12499>

Zhang, L., Qiu, G., & Chen, Z. (2021). Structural health monitoring methods of cables in cable- stayed bridge: A review. *Measurement*, 168, 108343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108343>

Zhang, C., Tian, Y., & Zhang, J. (2022). Complex image background segmentation for cable force estimation of urban bridges with drone- captured video and deep learning. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(4), e2910. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2910>

Zhao, X., Han, R., Yu, Y., Hu, W., Jiao, D., Mao, X., ... & Ou, J. (2017a). Smartphone- based mobile testing technique for quick bridge cable- force measurement. *Journal of Bridge Engineering*, 22(4), 06016012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001011](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001011)

Zhao, X., Ri, K., & Wang, N. (2017b). Experimental verification for cable force estimation using handheld shooting of smartphones. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/5625396>

Capítulo 6. Monitoreo local de la fuerza de tensión en tirantes mediante cámara digital instalada sobre un UAV

6.1. Introducción

Como se mencionó en el Capítulo 5, en el campo del monitoreo de puentes atirantados, es necesario evaluar constantemente la fuerza de tensión que afecta a cada uno de los cables debido a que la mayoría de las cargas en la estructura son soportadas por ellos. La pérdida de fuerza de tensión es indicativa de daño estructural, por ejemplo, falla del torón, pérdida de rigidez de la viga e inclinación de la columna. Actualmente, existen diferentes metodologías para estimar la fuerza de tensión, como el método del manómetro, de flujo magnético y utilizando las frecuencias de vibrar (Zhang et al., 2021). Sin embargo, comúnmente, este tipo de medidas requieren la instalación de sensores conectados directamente al cable, lo que no siempre es posible debido a su difícil acceso. Por lo tanto, se han desarrollado varios enfoques basados en visión por computadora utilizando cámaras fijas (Du et al., 2020; Feng et al., 2017; Jana y Nagarajaiah, 2021; Kim et al., 2013; Lee et al., 2022; Xu et al., 2018; Yang et al., 2019) o montadas en un UAV (Hoskere et al., 2019; Khuc et al., 2020; Tian et al., 2021; Yoon et al., 2018; Zhang et al., 2022) para medir de forma remota.

En el caso de los enfoques aplicados usando UAV para SHM debido a su ventaja de no solicitar un punto fijo para posicionar la cámara, Yoon et al. (2018) desarrollaron un método para medir el desplazamiento de estructuras usando UAV, el cual consta de tres secciones, determinar desplazamientos relativos sin marcadores, estimar el movimiento de la cámara y recuperar el desplazamiento absoluto de la estructura. Además, Hoskere et al. (2019) propusieron un enfoque para definir frecuencias naturales y modos de vibrar para estructuras civiles, donde la principal característica de estas metodologías es la implementación de marcadores fiduciales para rastrear los cables y calcular los desplazamientos correspondientes. Khuc et al. (2020) llevaron a cabo una metodología alternativa para determinar los desplazamientos de una estructura, implementando un elemento de fondo, detección de bordes y transformada de Hough para eliminar el movimiento del UAV.

Por otro lado, trabajos específicos donde se empleó un UAV para determinar la fuerza de tensión de los cables en base al establecimiento de frecuencias de vibración fueron los siguientes: Tian et al. (2021) propusieron un método donde se implemen-

taron diferencias de frecuencia y desplazamientos relativos. Zhang et al. (2022), formularon un algoritmo de aprendizaje profundo para eliminar los elementos de fondo en las imágenes, determinaron los desplazamientos relativos y aplicaron un método de descomposición de modos para separar los movimientos producidos por el UAV y la vibración del cable. Al final, la diferencia entre las frecuencias naturales se usó para calcular la fuerza de tensión. Estas dos investigaciones resolvieron el problema de determinar la fuerza de tensión de los cables utilizando un UAV, sin embargo, existen otras alternativas a brindar. En primer lugar, la aplicación directa de la frecuencia fundamental, ambos implementan diferencias entre frecuencias naturales, y uno de ellos enfatizó que la determinación de la frecuencia fundamental del cable a partir del video capturado por UAV es una tarea difícil. Adicionalmente, las metodologías fueron relativamente complicadas, lo que dificultaba su replicación para personal en el campo de SHM no expertos en la tecnología de visión por computadora. Por lo tanto, el objetivo principal de este capítulo es establecer una metodología alternativa para estimar la fuerza de tensión del cable utilizando UAV y visión por computadora. En este caso, un modelo simplificado que es capaz de definir la frecuencia fundamental fue propuesto para este proceso, teniendo la posibilidad de evitar la calibración de la cámara. De igual forma, es necesario denotar que la metodología propuesta fue validada en pruebas de laboratorio y aplicada en el Puente Río Papaloapan sobre 6 cables de la Semi-arpa número 2.

Este capítulo está dividido en 4 secciones, la primera define la metodología propuesta para estimar la fuerza de tensión de los cables; la sección número dos describe las pruebas de validación en laboratorio y campo; la tercera sección establece los resultados de las campañas de medición; la sección final explora la conclusión obtenida durante la presente investigación.

6.2. Metodología

6.2.1. Materiales

El instrumento utilizado en este capítulo fue un UAV Phantom 4 pro comercial de la empresa Dajiang Innovation (DJI), cuyas características son (Support for DJI, 2024):

- Peso de 1,388 g contando la batería y las hélices.
- Altura máxima de vuelo sobre el nivel del mar de 6000 m.
- Resistencia al viento máxima de 10 *m/s*.
- Tiempo de vuelo de 30 minutos.
- Video con resolución de 4k a 60 fps.

6.2.2. Determinación de la fuerza de tensión con UAV

El principal problema al implementar el UAV para recolectar los videos es su inestabilidad, sin embargo, cuenta con la ventaja de tener acceso a zonas aisladas. Por lo tanto, el algoritmo generado para determinar las tensiones con una cámara fija

no funciona al aplicarlo a datos adquiridos mediante un UAV. Consecuentemente, se tuvieron que llevar a cabo una serie de modificaciones y pruebas. El nuevo algoritmo contempla las funciones de coincidencia de plantilla (template matching), y flujo óptico de Lucas Kanade (optical flow). La primera etapa después de grabar el video es transformar las imágenes de RGB a escala de grises y rotarlas de manera paralela al eje horizontal. Como parte del segundo paso, los desplazamientos de un punto representativo dentro del tirante son determinados usando valores de correlación cruzada obtenidos por el algoritmo de coincidencia de plantilla. Posteriormente, la mayoría de los desplazamientos de frecuencias bajas son extraídos usando un filtro pasa bajas. Después, una zona de interés sobre la imagen que contenga el mismo elemento representativo del cable es analizado en cada cuadro. Es necesario mencionar que la zona es ajustada usando los desplazamientos de frecuencias bajas previamente calculados. De esta forma, el área seleccionada cubre el cable en todo el video para así poder definir el desplazamiento de varios puntos a través del algoritmo de flujo óptico. Finalmente, la función FFT es aplicada al desplazamiento resultante en el dominio del tiempo, y la tensión de los tirantes es estimada considerando la teoría de vibración de cuerda.

Debido a que para cada tirante se recolecta un video relativamente corto de aproximadamente 2 minutos con un UAV a una distancia menor a 4 metros, un modelo simplificado para la estimación de la tensión en tirantes es propuesto. En este modelo se contempla que la mayoría de los desplazamientos horizontales y verticales son reducidos durante la segunda y tercera sección del procesamiento. Estos efectos pueden ser estimados a partir de determinar el movimiento respecto a un punto fijo de referencia. Sin embargo, en este caso es considerado emplear el mismo punto de interés dentro del tirante con el objetivo de reducir los desplazamientos del UAV. Estas correcciones asumen que al capturar el video, el plano de la imagen es aproximadamente perpendicular al del cable. Por lo tanto, los desplazamientos determinados en los pasos posteriores son únicamente afectados por los movimientos de rotación del UAV, en la componente frontal, y los horizontales/verticales restantes. Adicionalmente, se propone no implementar el proceso de calibración de la cámara porque la frecuencia de vibración del cable puede ser estimado en píxeles y la distorsión de las imágenes se considera como despreciable en el centro del plano de la imagen. Por lo que, los desplazamientos definidos pueden ser establecidos con la siguiente ecuación:

$$CD = DC + HE + DE + EM + EA \quad (6.1)$$

Siendo CD el desplazamiento capturado, DC el desplazamiento real del cable, HE son vibraciones producidos por los movimientos del UAV, DE efectos generados por la deformación en las imágenes, EM efectos creados por el error en la determinación del desplazamiento del cable, y EA otros errores restantes. Debido a que el objetivo es determinar la frecuencia de los desplazamientos, la función FFT es aplicada a los desplazamientos en el dominio del tiempo. Por lo que, descomponiendo el desplazamiento capturado en las señales que lo forman, es posible determinar la frecuencia de vibración del cable medido.

De todo el algoritmo, la sección más relevante es reducir los desplazamientos de bajas frecuencias producidas por el UAV, por lo tanto, un área de interés que cubre algunos elementos del cable debe ser extraída para determinar sus movimientos en

cada cuadro del video, en este caso, la metodología implementada fue correlación cruzada normalizada (Ecuación 5.9). Sabiendo que la mayoría de los desplazamientos de bajas frecuencias son producidos por el UAV, el video es analizado una segunda vez. Sin embargo, en este caso, la zona de la imagen seleccionada que incluye el cable es ajustada de acuerdo con los cambios del UAV detectados por el algoritmo de coincidencia de plantilla y el filtro de media móvil (Figura 6.1). Por lo que, el área de interés siempre cubre los elementos representativos del cable, lo cual hace posible la implementación del algoritmo de flujo óptico representado con la siguiente expresión (OpenCV, 2024):

$$I(x, y, t) = I(x, dx + y, dy + t, dt) \quad (6.2)$$

Siendo $I(x, y, t)$ la intensidad del pixel, dx desplazamiento en la componente horizontal, dy desplazamiento en la componente vertical, t el tiempo y dt tiempo entre imágenes consecutivas. Utilizando la aproximación de la serie de Taylor y reduciendo algunos términos, se obtiene la siguiente ecuación:

$$f_x u + f_y v + f_t = 0 \quad (6.3)$$

Donde $f_x = \frac{\partial f}{\partial x}$; $f_y = \frac{\partial f}{\partial y}$; $f_t = \frac{\partial f}{\partial t}$; $u = \frac{\partial x}{\partial t}$; $v = \frac{\partial y}{\partial t}$

Los valores u y v se encuentran mediante la metodología de Lucas Kanade con la siguiente solución:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i f_{xi}^2 & \sum_i f_{xi} f_{yi} \\ \sum_i f_{xi} f_{yi} & \sum_i f_{yi}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sum_i f_{xi} f_{ti} \\ -\sum_i f_{yi} f_{ti} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

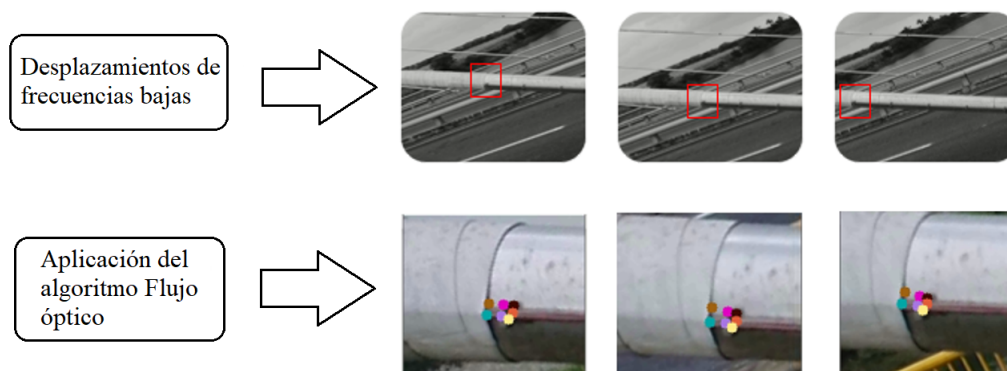


Figura 6.1: Corrección de los desplazamientos del UAV.

Posteriormente, se aplicó el algoritmo FFT para transformar los desplazamientos del dominio del tiempo al de la frecuencia. Debido a que todavía están involucrados algunos desplazamientos de baja frecuencia del UAV, se puede aplicar un filtro pasa alta o de bandas de frecuencias. En este punto, la frecuencia de los modos de vibración requeridos se puede definir e introducir la Ecuación 5.1.

6.3. Estabilidad UAV

Para determinar la estabilidad del UAV, se desarrollaron dos pruebas en laboratorio, en la primera al UAV se le colocó un acelerómetro y se voló siendo afectado por viento; por otro lado, en la segunda prueba se repitió el mismo procedimiento, pero sin exponer al UAV con la carga lateral (Figura 6.2 y 6.3). Los resultados de evaluar la estabilidad indican que en un rango de frecuencias desde 0 hasta 256 Hz, volando el UAV en condiciones con y sin viento, para las tres coordenadas (X, Y, Z), se observan tres áreas de ruido (Figura 6.4, 6.5, 6.6), al inicio de la gráfica, de 80 a 120 Hz, y de 180 a 230 Hz. Adicionalmente, se determinó el efecto que produce la inestabilidad del UAV, pero a los desplazamientos calculados a través de videoimágenes (Figura 6.7 y 6.8), los cuales se ven de 0 a 0.5 Hz (Figura 6.9 y 6.10) en un rango de 0 a 30 Hz.



Figura 6.2: UAV con acelerómetro montado en parte superior.



Figura 6.3: Prueba del UAV siendo afectado por viento.

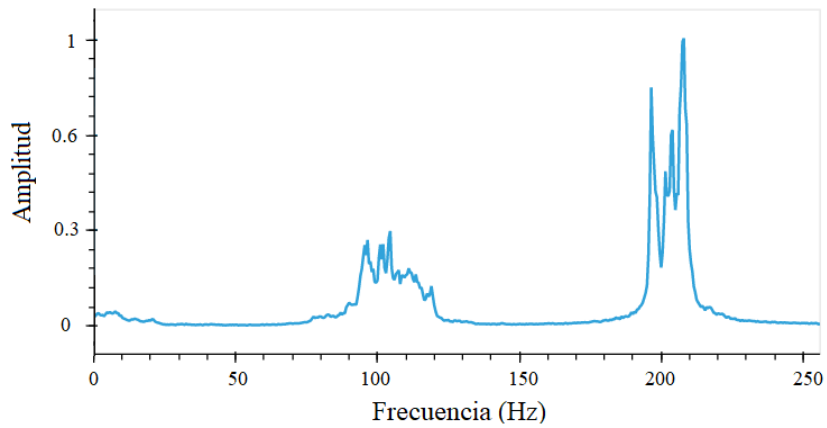


Figura 6.4: Aceleración en el dominio de la frecuencia resultante por la inestabilidad del UAV en el eje x.

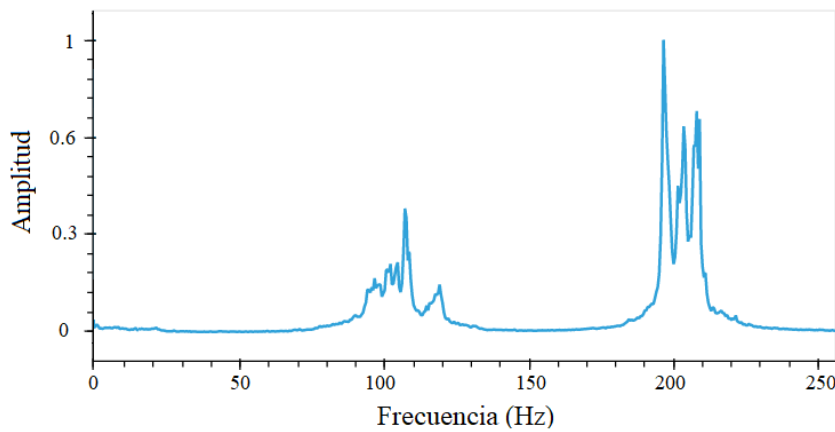


Figura 6.5: Aceleración en el dominio de la frecuencia resultante por la inestabilidad del UAV en el eje y.

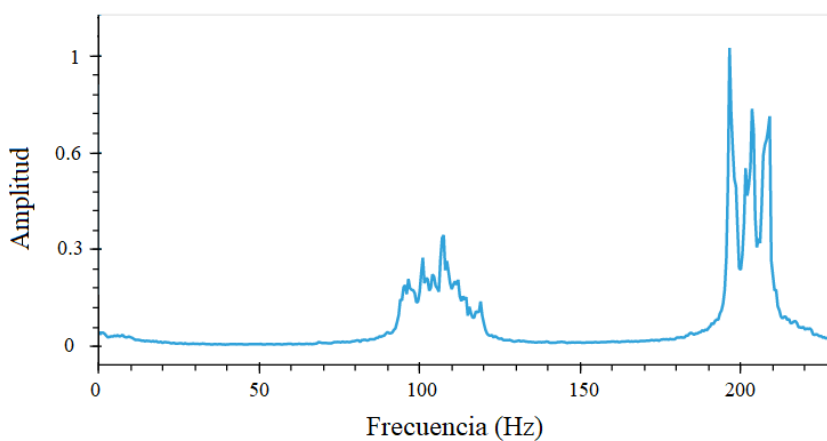


Figura 6.6: Aceleración en el dominio de la frecuencia resultante por la inestabilidad del UAV en el eje z.

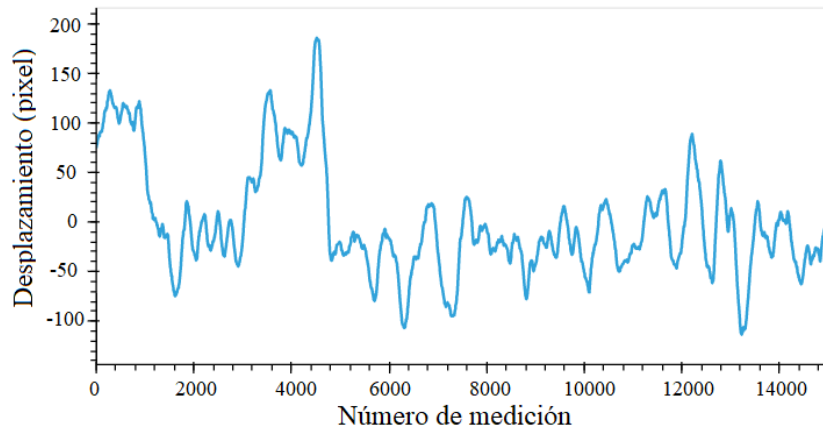


Figura 6.7: Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje x.

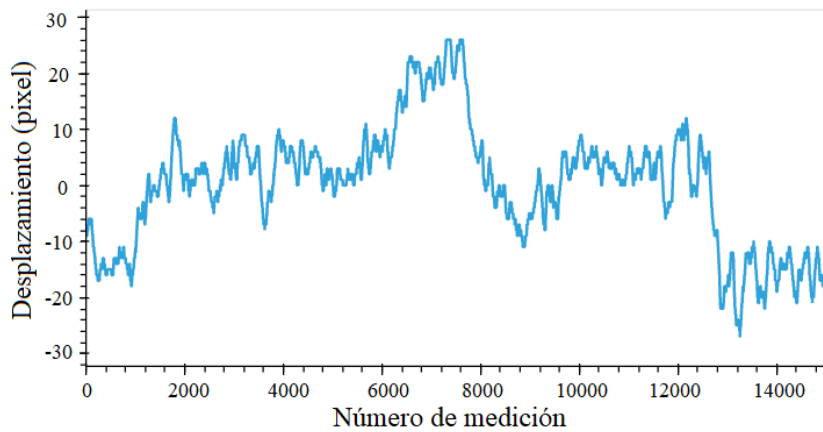


Figura 6.8: Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje z.

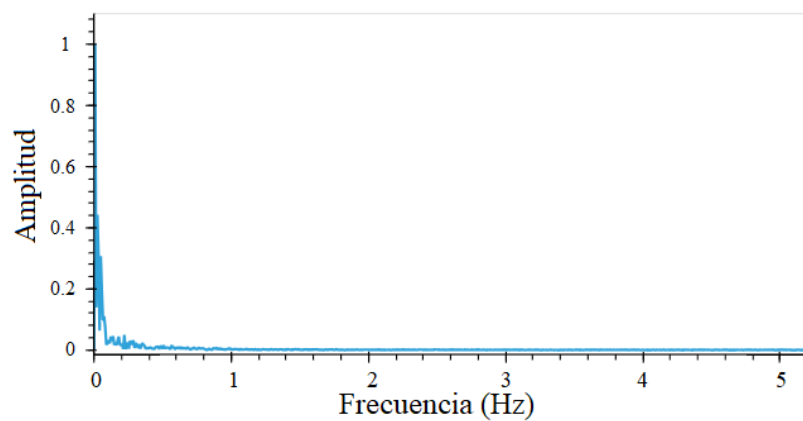


Figura 6.9: Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje x (dominio de la frecuencia).

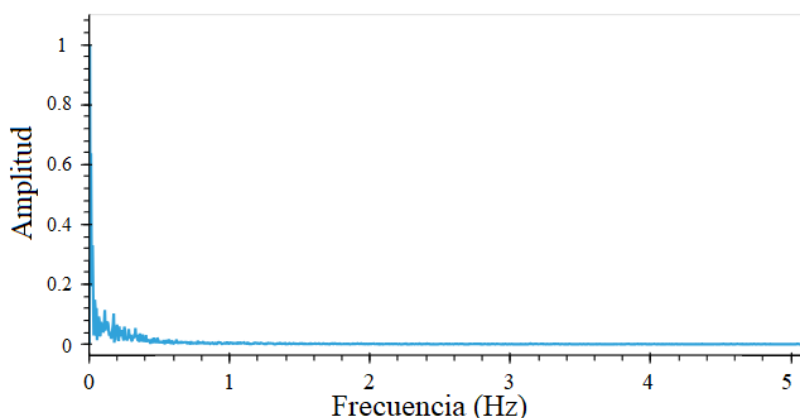


Figura 6.10: Desplazamiento resultante por la inestabilidad del UAV en el eje z (dominio de la frecuencia).

6.4. Pruebas de validación con mesa vibratoria

Con el propósito de optimizar el algoritmo que permite determinar tensión de tirantes basados en video-imágenes, se realizaron pruebas controladas en una mesa vibratoria. Las frecuencias a la que se configuró las vibraciones verticales de la mesa fueron 11.31, 12.69, 14.53, 17.66, 21.87 y 26.37 Hz. En cada frecuencia, se desarrollaron 3 sesiones de 2 minutos cada una, donde los resultados de las pruebas se compararon directamente con la frecuencia a la cual se configuró la mesa vibratoria. Este proceso se desarrolló de dos maneras: (1) se grabaron 9 videos de dos minutos con el UAV fijo; (2) se capturaron 18 videos de dos minutos con el UAV volando. El primer experimento se realizó para detectar problemas de la cámara; en tanto, el segundo tuvo como objetivo probar la metodología en un ambiente controlado. Para facilitar el procesamiento de los videos, se adhirió a la mesa un marcador ArUco de 4x4 centímetros (Figura 6.11). Los videos se grabaron con una frecuencia de muestreo de 60 fps, un tamaño de imagen de 3840 x 2160 pixeles utilizando el UAV a una distancia de separación de entre 2 y 4 metros. La Tabla 6.1 presenta los resultados de la primera prueba donde la diferencia máxima con respecto a la frecuencia de la mesa vibratoria establecida fue de 0.0036 Hz (0.02%), la mínima fue de 0.001 Hz (0.0079%) y el valor promedio de las 9 variaciones calculadas fue de 0.0021 Hz. No se encontraron problemas durante la primera campaña de medición; sin embargo, se detectó que, aunque el UAV estaba fijo la cámara presentaba algunos movimientos. Las Figuras 6.12 y 6.13 ilustran un ejemplo del desplazamiento producido por el movimiento de la cámara del UAV en el dominio del tiempo y la frecuencia, respectivamente. Estos desplazamientos estaban entre ± 7 pixeles y contribuyen al ruido en las frecuencias más bajas. En las Figuras 6.14 y 6.15 se presenta un ejemplo del desplazamiento resultante (UAV fijo) de la metodología propuesta en el dominio del tiempo y la frecuencia, respectivamente.

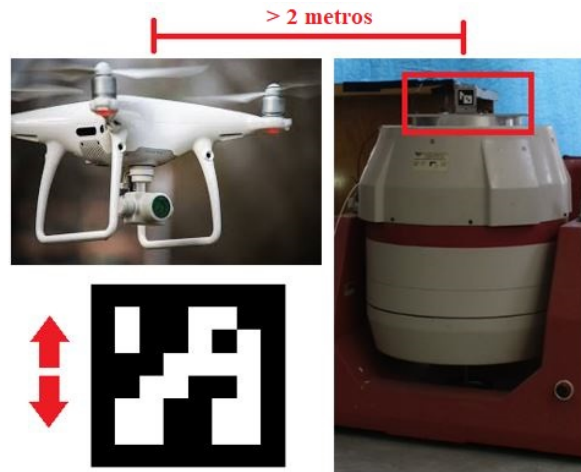


Figura 6.11: Pruebas controladas con la mesa vibratoria y el UAV.

Tabla 6.1: Resultados determinados en la prueba controlada implementando mesa vibratoria y UAV fijo.

Número de la pruebas	Frecuencia configurada (Hz)	Frecuencia resultante (Hz)	Diferencia absoluta (Hz)	Diferencia absoluta (%)
1	11.31	11.3074	0.0026	0.023
2	11.31	11.3134	0.0034	0.0301
3	11.31	11.3126	0.0026	0.023
4	12.69	12.6908	0.0008	0.0063
5	12.69	12.691	0.001	0.0079
6	12.69	12.6888	0.0012	0.0095
7	14.53	14.5266	0.0034	0.0234
8	14.53	14.5311	0.0011	0.0076
9	14.53	14.5264	0.0036	0.0248

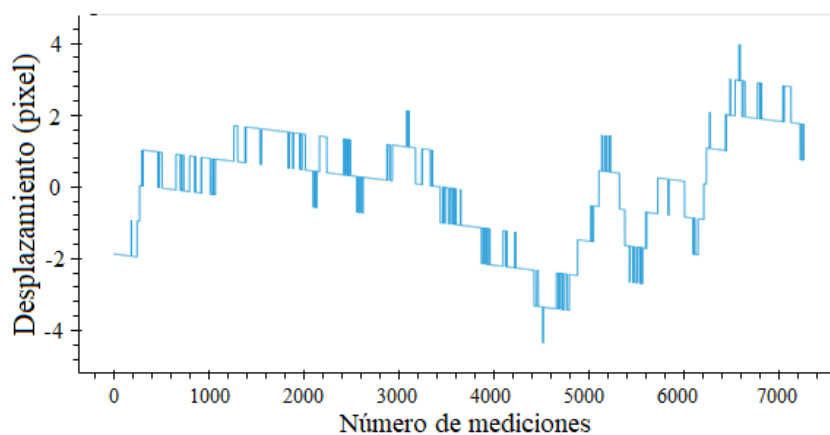


Figura 6.12: Ruido producido por la cámara del UAV.

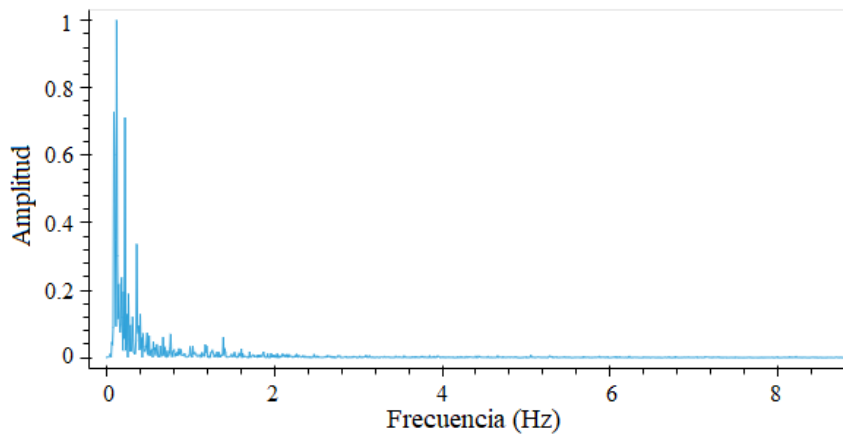


Figura 6.13: Ruido producido por la cámara del UAV (dominio de la frecuencia).

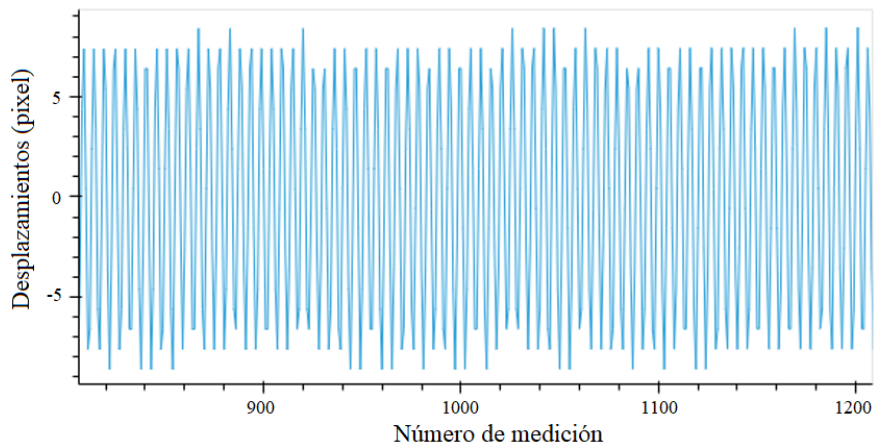


Figura 6.14: Desplazamiento de la mesa vibratoria capturada por el UAV fijo.

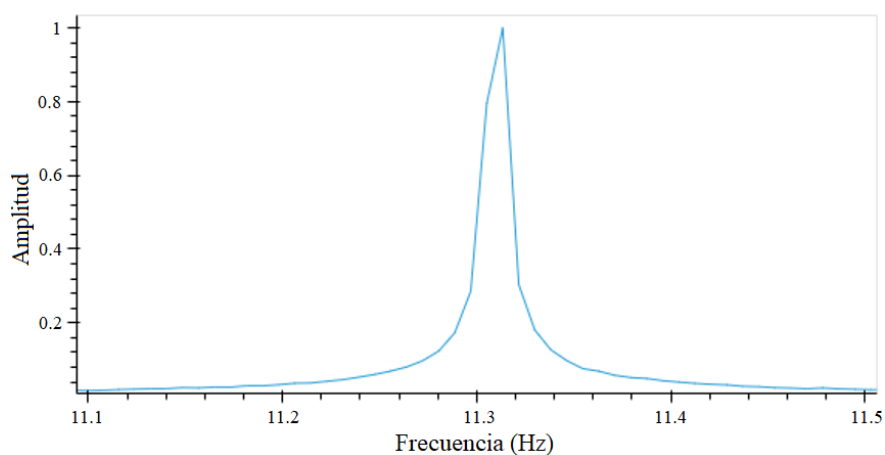


Figura 6.15: Desplazamiento de la mesa vibratoria capturada por el UAV fijo (dominio de la frecuencia).

Para la segunda prueba, los resultados se muestran en la Tabla 6.2, donde la diferencia máxima en frecuencia fue de 0.0033 Hz (0.029%), la diferencia mínima

fue de 0.0009 Hz (0.008 %), la desviación estándar fue de 0.009 Hz, el Error Medio Cuadrático fue de 0.0024 Hz y el promedio fue de 0.0022 Hz. Lo que confirma una buena concordancia entre la frecuencia establecida de la mesa vibratoria y los desplazamientos detectados por la cámara del UAV. Las Figuras 6.16 y 6.17 ilustran un ejemplo de desplazamientos capturados afectados por el movimiento del UAV en el dominio del tiempo y la frecuencia, respectivamente. Por otro lado, las Figuras 6.18 y 6.19 muestran un ejemplo de los desplazamientos finales (captados a través del UAV en vuelo) de la mesa vibratoria en el dominio del tiempo y la frecuencia, respectivamente.

Tabla 6.2: Resultados determinados en la prueba controlada implementando mesa vibratoria y UAV volando.

Número de la pruebas	Frecuencia configurada (Hz)	Frecuencia resultante (Hz)	Diferencia absoluta (Hz)	Diferencia absoluta (%)
1	11.31	11.3109	0.0009	0.008
2	11.31	11.3133	0.0033	0.0292
3	11.31	11.3091	0.0009	0.008
4	12.69	12.6912	0.0012	0.0095
5	12.69	12.6917	0.0017	0.0134
6	12.69	12.692	0.002	0.0158
7	14.53	–	–	–
8	14.53	14.5331	0.0031	0.0213
9	14.53	14.5279	0.0021	0.0145
10	17.66	17.6622	0.0022	0.0125
11	17.66	17.6559	0.0041	0.0232
12	17.66	17.6573	0.0027	0.0153
13	21.87	21.8671	0.0029	0.0133
14	21.87	21.8731	0.0031	0.0142
15	21.87	21.8678	0.0022	0.01
16	26.37	26.3686	0.0014	0.005
17	26.37	26.3719	0.0019	0.007
18	26.37	26.3673	0.0027	0.01

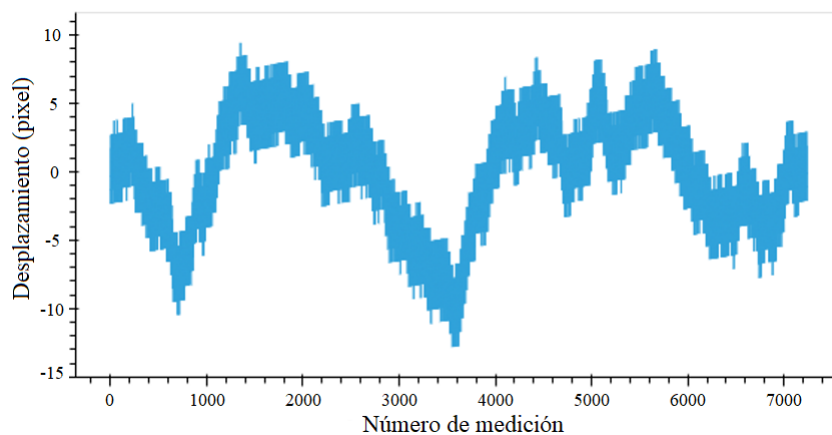


Figura 6.16: Desplazamientos de la mesa vibratoria capturados por el UAV volando.

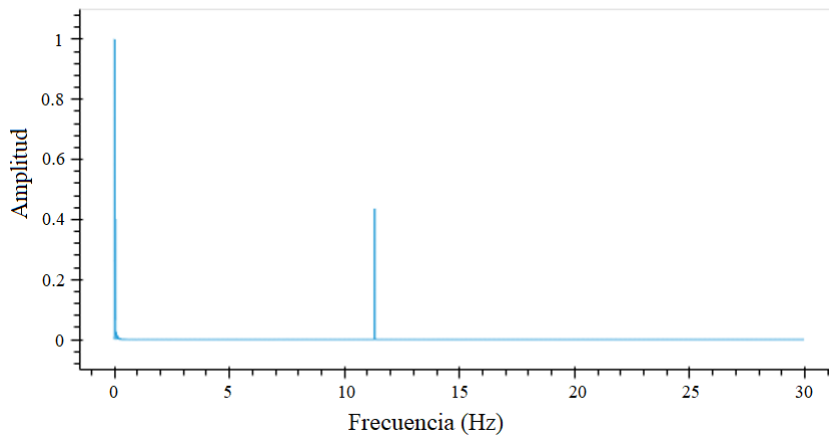


Figura 6.17: Desplazamientos de la mesa vibratoria capturados por el UAV volando (dominio de la frecuencia).

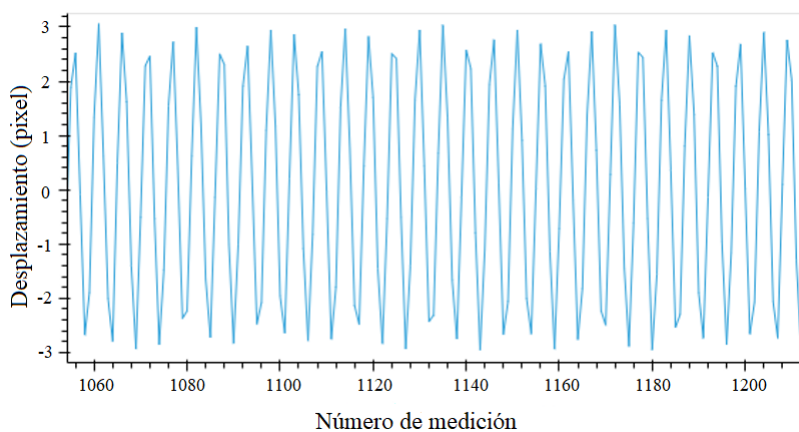


Figura 6.18: Desplazamientos de la mesa vibratoria utilizando las correcciones propuestas.

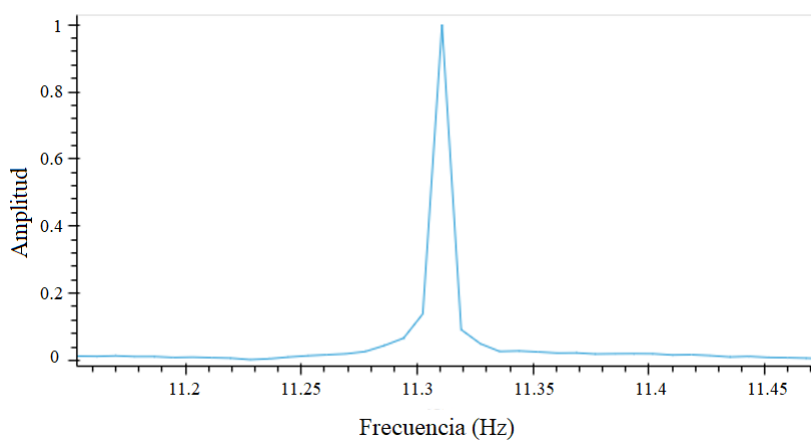


Figura 6.19: Desplazamientos de la mesa vibratoria utilizando las correcciones propuestas (dominio de la frecuencia).

Los ensayos experimentales en laboratorio verificaron la capacidad de la metodología desarrollada para determinar frecuencias de vibración dentro de un 0.029 % de diferencia respecto a la frecuencia de referencia configurada en la mesa vibratoria.

6.5. Resultados en el Puente Río Papaloapan

La campaña de medición se realizó comparando la información del UAV y un acelerómetro. Se analizaron 6 tirantes de la Semi-arpa 2 del Puente Río Papaloapan, el Cable 14, 12, 10, 6, 5 y 4. Las condiciones ambientales para realizar las mediciones con la cámara y el UAV fueron idóneas, cada prueba duró 2 minutos, los instrumentos adquirieron información en el mismo lapso con frecuencias de muestreo de 60 cuadros por segundo para la cámara del UAV y 128 Hz para el acelerómetro. Es importante mencionar, que el puente estuvo siendo afectado por carga vehicular en el transcurso de las pruebas de medición.

Las Figuras 6.20-6.24 ilustran los resultados de aplicar la metodología de visión por computadora a datos recolectados por el UAV y las Tablas 6.3-6.4 muestran las diferencias entre este instrumento y el acelerómetro. Los resultados indican que se encontraron dos modos de vibrar para los Cables números 14, 12 y 5, mientras que, para los Cables número 10 y 4 solo se estimó la frecuencia fundamental. En el caso del Cable número 6, no se definieron frecuencias debido a problemas durante la captura del video y la gráfica que ilustra el comportamiento del Cable número 5, es el resultado más ruidoso debido a una mala calidad de video. La comparación de la frecuencia fundamental proporcionada por ambos instrumentos se establece con la máxima diferencia de 0.03061 Hz (0.9778 %) en el Cable número 5, en tanto que el mínimo valor se calculó de 0.00105 Hz (0.059 %) en el Cable número 10, y el Error Medio Cuadrático obtenido fue de 0.0139 Hz. Estas diferencias representan valores en la fuerza de tensión de 40.7 kN (1.96 %), 3.3 kN (0.123 %) y 19.1 kN, respectivamente. Además de la comparación entre los resultados del UAV y del acelerómetro, se evaluó la fuerza de tensión estimada con respecto al umbral máximo de diseño para cada cable. El Cable número 14 tenía una fuerza de tensión del 37.6 % por debajo del límite máximo de diseño; los números de Cable 12, 10 y 5 están entre el 13 % y el 15 %; finalmente, el Cable número 4 presentó una menor diferencia de 6.4 % (Tabla 6.5). Debido al valor actual de la fuerza de tensión de los cables, la tolerancia de error es menor para los cables más cortos.

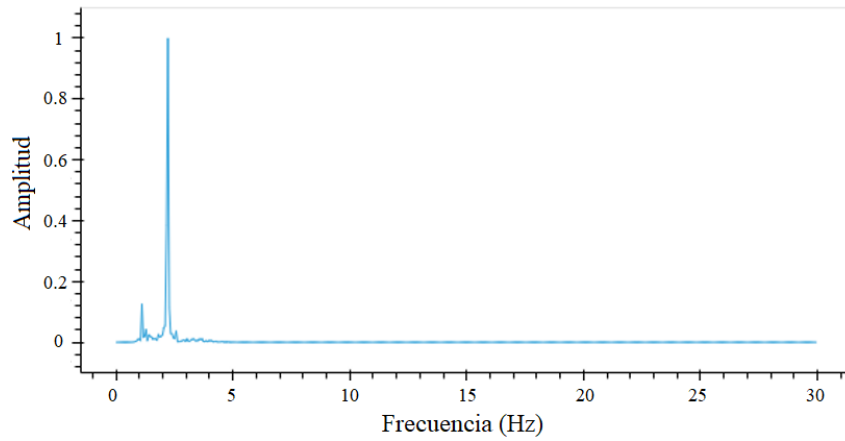


Figura 6.20: Resultados dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 14.

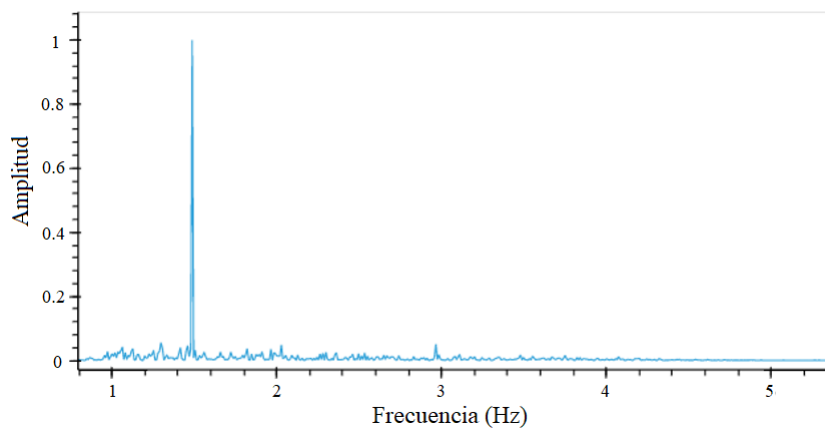


Figura 6.21: Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 12.

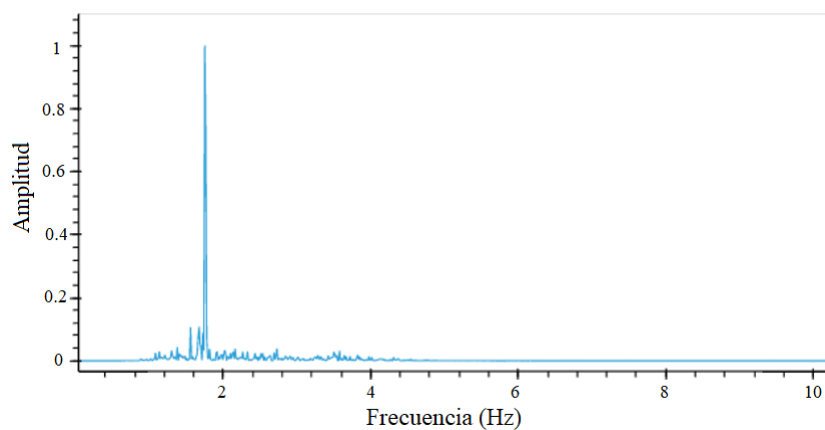


Figura 6.22: Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 10.

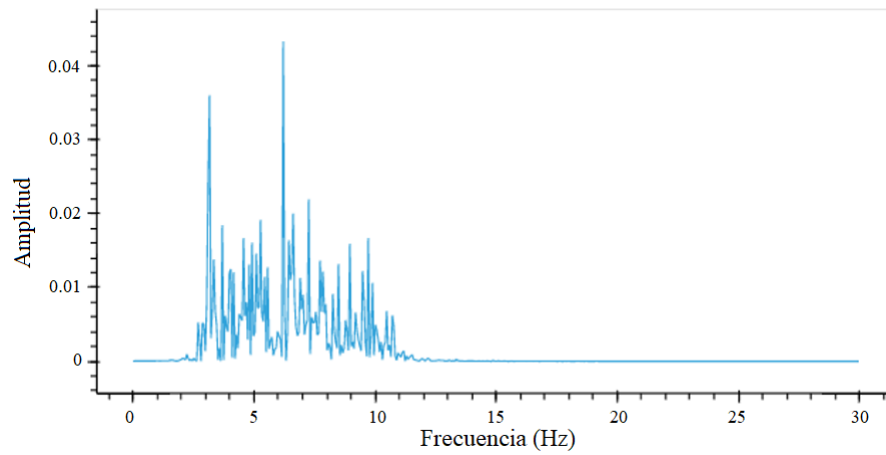


Figura 6.23: Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 5.

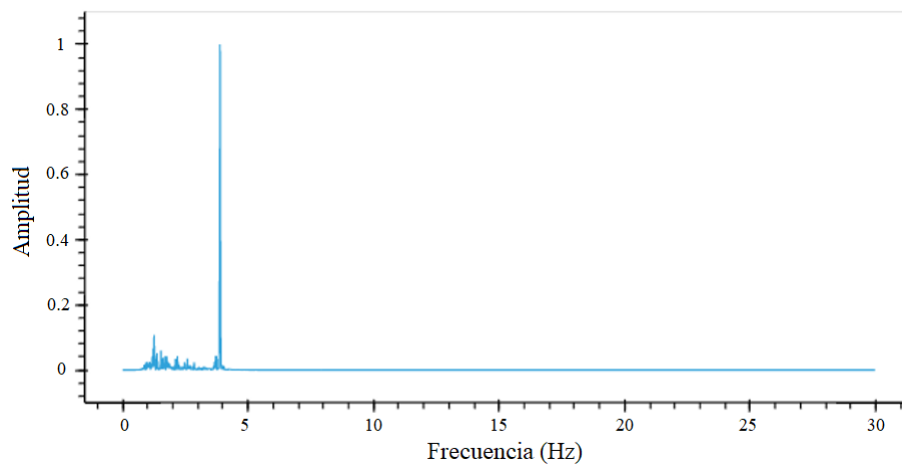


Figura 6.24: Resultados en el dominio de la frecuencia correspondientes al Tirante 4.

Tabla 6.3: Comparación de los resultados obtenidos sobre el Puente Río Papaloapan implementando UAV y acelerómetro.

Tirante	Diferencia (kN)	Diferencia (%)
14	10.8	0.497
12	4.8	0.169
10	3.3	0.123
6	–	–
5	40.7	1.967
4	4	0.192

Tabla 6.4: Resultados obtenidos sobre el Puente Río Papaloapan implementando UAV y acelerómetro.

Tirante 14 Semi-arpa 2					
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)
UAV	1.1091	2.2071	-	-	-
Acelerómetro	1.1063	2.2055	3.3190	4.4029	5.4719
Tirante 12 Semi-arpa 2					
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)
UAV	1.486	2.9654	-	-	-
Acelerómetro	1.48294	2.9658	4.4339	5.88727	7.35538
Tirante 10 Semi-arpa 2					
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)
UAV	1.75	-	-	-	-
Acelerómetro	1.75105	3.49455	5.2305	6.90607	8.60428
Tirante 6 Semi-arpa 2					
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)
UAV	-	-	-	-	-
Acelerómetro	2.65236	5.2975	7.89204	10.4505	12.9727
Tirante 5 Semi-arpa 2					
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)
UAV	3.1609	6.2047	-	-	-
Acelerómetro	3.13029	6.20854	9.24217	12.2312	15.2797
Tirante 4 Semi-arpa 2					
Instrumento	1 (Hz)	2 (Hz)	3 (Hz)	4 (Hz)	5 (Hz)
UAV	3.8861	-	-	-	-
Acelerómetro	3.88985	7.69211	11.3776	15.0631	18.5735

Tabla 6.5: Comparación de los resultados obtenidos sobre el Puente Río Papaloapan implementando UAV y la tensión máxima de diseño.

Tirante	Diferencia (kN)	Diferencia (%)
14	1317	37.6
12	443.1	13.5
10	479.7	15.2
6	-	-
5	340.4	13.8
4	143.9	6.4

6.6. Conclusiones y discusiones

En este trabajo se propuso una metodología alternativa para estimar la fuerza de tensión de cables en puentes atirantados utilizando video capturado por un UAV, así

como análisis de visión por computadora. En general, las principales características de esta metodología son: (1) omitir el proceso de calibración; (2) no utilizar un punto fijo de referencia; (3) aplicar los algoritmos de coincidencia de plantilla y de flujo óptico.

La metodología se probó primero en el laboratorio y luego en algunos de los cables del Puente Río Papaloapan. En el ensayo de laboratorio se utilizó una mesa vibratoria para producir desplazamiento vertical de acuerdo con unas frecuencias configuradas. En este caso, la diferencia media entre los resultados obtenidos por UAV y la frecuencia configurada fue de 0.0022 Hz, el máximo de 0.0033 Hz, el mínimo de 0.0009 Hz, la desviación estándar de 0.009 Hz y el Error Medio Cuadrático de 0.0024 Hz. Confirmando que en un entorno controlado el UAV puede determinar la frecuencia con precisión. Por otro lado, se evaluaron 6 cables de diferentes longitudes (desde 106 hasta 37 metros) en el Puente Río Papaloapan. La evaluación de la frecuencia fundamental obtenida por el UAV y el acelerómetro mostró una diferencia máxima de 0.03061 Hz (0.9778 %) en el Cable número 5, una mínima de 0.00105 Hz (0.059 %) en el Cable número 10 y un Error Medio Cuadrático de 0.0139 Hz. Estas discrepancias ocasionaron errores en la fuerza de tensión de 40.7 kN (1.96 %), 3.3 kN (0.123 %) y 19.1 kN, respectivamente. Estos resultados fueron menos precisos que los definidos en el laboratorio, pero se concluye que la metodología propuesta funciona para el monitoreo continuo de la fuerza de tensión en puentes atirantados, utilizando UAV. Al comparar los valores de tensión estimados por el UAV con respecto a los valores máximos de diseño, se encontró que el Cable número 14 tenía diferencia del 37.6 %, los Cable número 12, 10 y 5 están entre el 13 % y el 15 %, mientras que, el Cable número 4 presentó una menor diferencia de 6.4 %. Por lo que, se puede concluir que todos los tirantes evaluados se encuentran en un estado adecuado de operación. Sin embargo, debido a que el umbral máximo de fuerza de tensión de diseño del Cable número 4 está cerca de su valor medido, la tolerancia al error es menor. Por tal motivo, un trabajo futuro es optimizar el algoritmo para detectar más modos de vibración en estos cables cortos.

Finalmente, se concluye que a pesar de que la metodología propuesta obtuvo resultados precisos, existen las siguientes limitantes a considerar:

- Duración de batería entre 15 y 25 minutos.
- El UAV tiene una máxima tolerancia a una velocidad del viento de 10 *m/s*.
- Vehículos de carga emiten ráfagas de viento que pueden desestabilizar al UAV.
- El costo computacional durante el procesamiento de los videos es alto debido a que se realiza una doble lectura a cada imagen.

6.7. Referencias

Du, W., Lei, D., Bai, P., Zhu, F., & Huang, Z. (2020). Dynamic measurement of stay-cable force using digital image techniques. *Measurement*, 151, 107211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107211>

Feng, D., Scarangelo, T., Feng, M. Q., & Ye, Q. (2017). Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor. *Measurement*, 99, 44-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.020>

Hoskere, V., Park, J. W., Yoon, H., & Spencer Jr, B. F. (2019). Vision-based modal survey of civil infrastructure using unmanned aerial vehicles. *Journal of Structural Engineering*, 145(7), 04019062. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002321)

Jana, D., & Nagarajaiah, S. (2021). Computer vision-based real-time cable tension estimation in Dubrovnik cable-stayed bridge using moving handheld video camera. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(5), e2713. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2713>

Khuc, T., Nguyen, T. A., Dao, H., & Catbas, F. N. (2020). Swaying displacement measurement for structural monitoring using computer vision and an unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 159, 107769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107769>

Kim, S. W., Jeon, B. G., Kim, N. S., & Park, J. C. (2013). Vision-based monitoring system for evaluating cable tensile forces on a cable-stayed bridge. *Structural Health Monitoring*, 12(5-6), 440-456. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475921713500513>

Lee, G., Kim, S., Ahn, S., Kim, H. K., & Yoon, H. (2022). Vision-based cable displacement measurement using side view video. *Sensors*, 22(3), 962. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22030962>

OpenCV, (2024). Optical flow. Disponible en línea: <https://docs.opencv.org/4.x/d4/dee/tutorial/opticalflow.html>

Support for DJI, (2024, Enero 17). Phantom 4 Pro - Technical Specifications. Disponible en línea: <https://www.dji.com/mx/support/product/phantom-4-pro>

Tian, Y., Zhang, C., Jiang, S., Zhang, J., & Duan, W. (2021). Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(1), 73-88. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12567>

Xu, Y., Brownjohn, J., & Kong, D. (2018). A non-contact vision-based system for multipoint displacement monitoring in a cable-stayed footbridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(5), e2155. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2155>

Yang, Y., Sanchez, L., Zhang, H., Roeder, A., Bowlan, J., Crochet, J., Charles, F. & Mascareñas, D. (2019). Estimation of full-field, full-order experimental modal model of cable vibration from digital video measurements with physics-guided unsupervised machine learning and computer vision. *Structural Control and Health Monitoring*

ring, 26(6), e2358. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2358>

Yoon, H., Shin, J., & Spencer Jr, B. F. (2018). Structural displacement measurement using an unmanned aerial system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(3), 183-192. DOI: <https://doi.org/10.1111/mice.12338>

Zhang, L., Qiu, G., & Chen, Z. (2021). Structural health monitoring methods of cables in cable-stayed bridge: A review. *Measurement*, 168, 108343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108343>

Zhang, C., Tian, Y., & Zhang, J. (2022). Complex image background segmentation for cable force estimation of urban bridges with drone-captured video and deep learning. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(4), e2910. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2910>

Capítulo 7. Monitoreo local para determinar frecuencias de vibrar del tablero a partir de una cámara digital fija

7.1. Introducción

Durante la evaluación de los puentes, comúnmente se realizan pruebas estáticas y dinámicas, en este tipo de análisis se colocan instrumentos sobre puntos estratégicos de la estructura con la finalidad de adquirir su respuesta al ser afectada por una carga vehicular conocida. Al final de las pruebas, un Modelo de Elemento Finito se calibra a partir de los resultados obtenidos con los sensores para evaluar el comportamiento de acuerdo con los códigos de diseño. Principalmente los sensores que se utilizan son los acelerómetros, no obstante, el procesamiento de video-imágenes puede ser empleado. Es por esto, que se propone aplicar la metodología de visión por computadora para calcular las frecuencias de vibrar del tablero de los puentes. Hasta este momento se ha descrito la metodología para determinar la tensión de los tirantes basado en mediciones de vibración, las cuales fungen como fundamento para determinar el comportamiento dinámico del tablero (Sección 5.3.3). La diferencia entre ambos procesos es que para determinar las frecuencias de los modos de vibrar del tablero no es necesario rotar las imágenes ni llevar a cabo el cálculo de tensión después de aplicar la Transformada Rápida de Fourier. La estimación de las frecuencias de vibrar se validó en el Puente El Carrizo con carga aleatoria considerando como referencia información proveniente de un acelerómetro.

7.2. Metodología

7.2.1. Materiales

La cámara que se empleó fue proveniente del iPhone 12 pro, cuyas características se expresan a continuación (Support Apple, 2022): 1) Distancia focal de 26 mm; 2) tamaño de sensor 56.6mm x 42.3 mm; 3) resolución 3840 x 2160 pixeles.

A partir de la información del sensor se estableció el desplazamiento mínimo detectable considerando el nivel del pixel. La relación entre la distancia cámara objeto de interés se presenta en la Ecuación 7.1 (Hecht, 2016).

$$hi = \frac{(df * ho)}{(df - do)} \quad (7.1)$$

Donde df es la distancia focal, do es la distancia entre la cámara y el objeto de interés, mientras que ho es el tamaño real del objeto.

Utilizando la Ecuación 7.1, se puede conocer la magnitud de los desplazamientos en el plano de la imagen. Considerando que el teorema de Nyquist-Shannon establece el límite mínimo detectable es igual a dos veces el tamaño del pixel, siendo éste calculado mediante la Ecuación 7.2 en función de la resolución de la imagen ($pixel_{num}$) y el tamaño del dispositivo de carga acoplada (CCD_{tam}) (Teledyne, 2024).

$$PT = \frac{CCD_{tam}}{pixel_{num}} \quad (7.2)$$

De esta forma se estableció que el desplazamiento mínimo detectable cumple con una relación de 2.7×10^{-5} m en cada 0.20 m. Por lo que, al instalar la cámara a 1 metro de distancia el desplazamiento mínimo que se puede distinguir es 0.000135 m.

7.2.2. Extracción de las frecuencias de los modos de vibrar

La metodología para establecer las frecuencias de los modos de vibrar en el tablero de un puente se basa en la Sección 5.3.3 con algunas variaciones, por lo que la Figura 7.1 muestra el diagrama de flujo de los pasos necesarios para este tipo de evaluaciones.

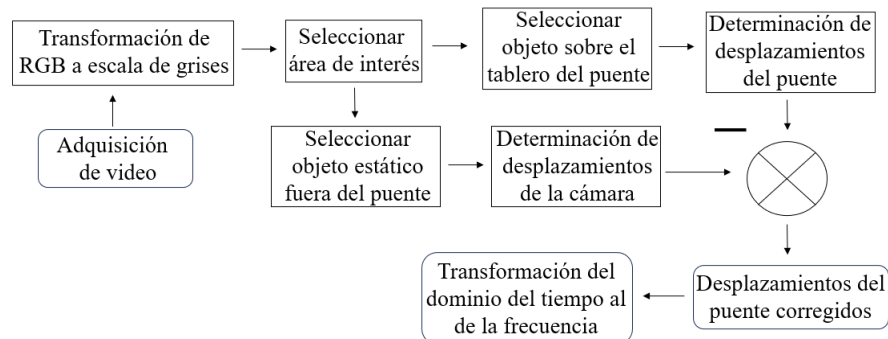


Figura 7.1: Diagrama de flujo para determinar las frecuencias de los modos de vibrar.

En este caso, la metodología consiste en 8 pasos: 1) Adquisición del video con una frecuencia de muestreo de 30 Hz, distancia menor a 1 metro entre la cámara y el objetivo, colocación de marco ArUco en la zona de interés, y tiempo de adquisición mayor a 2 minutos. 2) Transformación de RGB a escala de grises. 3) Disminuir el área de evaluación recortando las imágenes a una porción en particular. 4) Identificar una imagen de referencia para el objetivo dentro y fuera del puente. 5) Mediante correlación cruzada detectar la posición de los objetivos dentro y fuera del puente, en cada una de las imágenes. 6) Determinar los desplazamientos resultantes del puente y de la cámara (en píxeles). 7) Reducir los desplazamientos producidos por la inestabilidad de la cámara. 8) Aplicar la Transformada Rápida de Fourier e identificar las frecuencias que son excitadas por la carga vehicular.

7.3. Campaña de medición en el Puente El Carrizo

Debido a que en la Sección 5.5, se llevó a cabo la evaluación del algoritmo bajo condiciones controladas se decidió aplicar directamente la metodología en una situación real sobre el Puente El Carrizo. El experimento consistió en colocar una marca ArUco sobre el parapeto dentro de la sección atirantada cerca de la junta en el lado de aguas arriba. Las mediciones se realizaron en condiciones ambientales ideales, la carga vehicular fue aleatoria, el video fue adquirido durante 10 minutos con una resolución de 3840 x 2160 pixeles a una distante cámara-objetivo menor a 1 metro y la frecuencia de muestreo fue de 30 Hz. Al mismo tiempo se recolectaron los cambios de aceleración grabando 68 datos por segundo. La Figura 7.2 presenta la instalación de la cámara sobre el puente durante la campaña de medición.



Figura 7.2: Prueba para determinar la frecuencia de vibrar del tablero.

Posteriormente a las mediciones sobre el puente, se ingresó el video en el algoritmo descrito en la Figura 7.1 obteniendo 6 frecuencias asociadas a los modos de vibrar longitudinales del Puente El Carrizo. La Figura 7.3 muestran los desplazamientos del puente en pixeles, mientras que la Figura 7.4 ilustra las frecuencias de vibrar definidas a través de visión por computadora.

En el caso de la Tabla 7.1 se presentan las discrepancias entre las frecuencias de vibrar obtenidas con la cámara y el acelerómetro. Los resultados señalan un promedio de las diferencias de 0.0192 Hz (1.4%), máxima diferencia de 0.0781 Hz (4.1%), mínimo valor de 0.0006 Hz (0.078%), desviación estándar de 0.0296 Hz (1.4%) y Error Medio Cuadrático de 0.0331 Hz. Los modos de vibrar identificados fueron el primero, segundo, tercero, cuarto, sexto y séptimo. En el caso del quinto modo de vibrar, no se apreció información relacionada a este elemento.

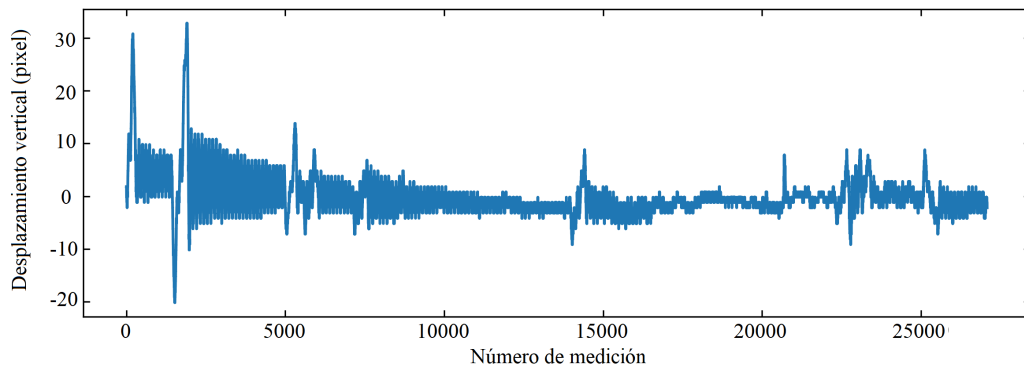


Figura 7.3: Desplazamientos de la sección atirantada del Puente El Carrizo (píxeles).

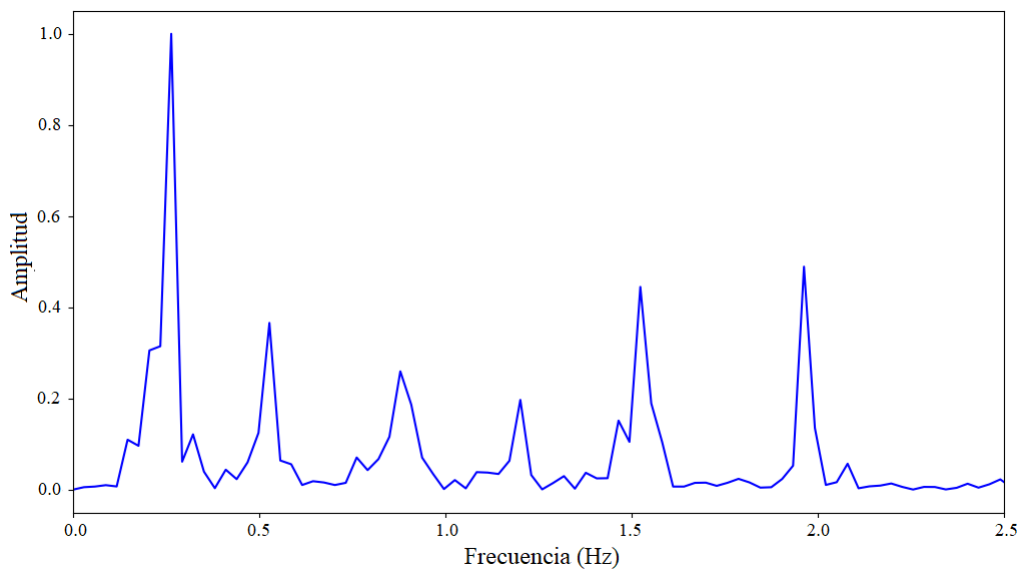


Figura 7.4: Frecuencias de vibrar de la sección atirantada del Puente El Carrizo.

Tabla 7.1: Evaluación entre las frecuencias de vibrar definidas entre la cámara y el acelerómetro.

Modo	Frecuencia acelerómetro (Hz)	Frecuencia cámara fija (Hz)	Diferencia (Hz)	Diferencia (%)
1	0.2692	0.2663	0.0029	1.08
2	0.5643	0.5615	0.0028	0.49
3	0.7754	0.7748	0.0006	0.08
4	1.185	1.2015	0.0165	1.39
5	1.306	-	-	-
6	1.5118	1.5264	0.0146	0.97
7	1.885	1.9631	0.0781	4.14

7.4. Validación con Modelo de Elemento Finito

Comúnmente, a partir de los resultados de las pruebas estáticas y dinámicas se calibra el Modelo de Elemento Finito para evaluarlo posteriormente de acuerdo con los diferentes códigos de diseño. En este caso, el modelo del Puente El Carrizo fue

calibrado usando información del comportamiento dinámico del puente adquirido por acelerómetros. Este es un proceso iterativo donde las propiedades mecánicas, áreas y momentos de inercia de los elementos estructurales del puente se ajustan en cada ciclo hasta que las diferencias en las frecuencias de los modos de vibrar obtenidas con el modelo y las medidas en el puente sean despreciables en términos prácticos (Quintana et al., 2021).

La Tabla 7.2 muestra que el modelo calibrado tiene un promedio de diferencia con respecto al acelerómetro de 6.6 %, máximo valor de 10.7 %, mínimo de 1.8 %, y una desviación estándar de 3.3 %. Al considerar estas magnitudes de discrepancia entre el modelo calibrado y el acelerómetro, se comprueba que las frecuencias obtenidas a través de la metodología de visión por computadora son lo suficientemente precisas para ser implementadas en el proceso de calibración del modelo matemático.

Tabla 7.2: Evaluación entre las frecuencias de vibrar definidas entre el Modelo de Elementos Finito y el acelerómetro.

Modo	Frecuencia acelerómetro (Hz)	Frecuencia modelo (Hz)	Diferencia (%)
1	0.2692	0.28	4.01
2	0.5643	0.6132	8.67
3	0.7754	0.7898	1.86
4	1.185	1.0849	8.45
5	1.306	1.1942	8.56
6	1.5118	1.3674	9.55
7	1.885	1.9676	4.38
8	2.4623	2.5342	2.92
9	3.45	3.0801	10.72

7.5. Conclusiones

En el séptimo capítulo del presente trabajo de investigación se propuso utilizar el algoritmo de visión por computadora previamente desarrollado para determinar las frecuencias de los modos de vibrar del tablero de un puente. El hecho de que el tablero del puente sea un elemento estructural más complejo que un tirante, produce que la extracción de las frecuencias de vibrar contenga un mayor grado de dificultad, por lo que se planteó llevar a cabo una prueba de validación en el Puente El Carrizo siendo afectado por carga vehicular aleatoria. En el experimento se utilizó un acelerómetro midiendo durante el mismo periodo que la cámara de video, obteniendo un promedio de discrepancias igual a 0.0192 Hz (1.4 %), máxima diferencia de 0.0781 Hz (4.1 %), mínimo valor de 0.0006 Hz (0.078 %), y desviación estándar de 0.0296 Hz (1.4 %). A través de la cámara de video se pudieron encontrar características de 6 modos de vibrar, el primero, segundo, tercero, cuarto, sexto y séptimo. Es importante mencionar que el Modelo de Elemento Finito puede ser calibrado mediante 2 o 3 frecuencias asociadas a los modos de vibrar. Por otro lado, el porcentaje de diferencia entre el modelo matemático y la información adquirida en campo (acelerómetro) fue en promedio de 6.6 %, máximo valor de 10.7 %, mínimo de 1.8 %, y

una desviación estándar de 3.3 % (Quintana et al., 2021). Al analizar las variaciones respecto al modelo calibrado se concluye que la precisión de la metodología desarrollado con base en visión por computadora es lo suficiente preciso para resolver esta problemática.

La metodología propuesta en este capítulo tiene la destreza de identificar las frecuencias de los modos de vibrar, sin embargo, como trabajo futuro es necesario la mejora del algoritmo para determinar la frecuencia de vibrar de varios puntos separados con algunos metros de distancia, de esta forma se puede calcular el modo de vibrar y no solamente su frecuencia.

7.6. Referencias

Hecht, E. (2016). *óptica*. Addison-Wesley.

Quintana, J. A., Carrión, F. J., Anaya, M., Guzmán, G. M., Hernández, J. A., Martínez, L. A. & Gasca, H. M. (2021, March). Monitoring and evaluation of a highway bridge during major rehabilitation. In *International Workshop on Civil Structural Health Monitoring* (pp. 271-287). Cham: Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-74258-4_19.

Support Apple, (2022, April 1). iPhone 12 Pro - Technical Specifications. Disponible en línea: https://support.apple.com/kb/SP831viewlocale_en_US&locale_es_ES.

Teledyne, (2024). Pixel Size and Camera Resolution. Disponible en línea: <https://www.princetoninstruments.com/learn/camera-fundamentals/pixel-size-and-camera-resolution>.

Capítulo 8. Conclusiones del monitoreo estructural basado en mediciones remotas

8.1. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se propuso desarrollar una metodología basada en percepción remota para el monitoreo de la salud estructural de los puentes pertenecientes a la Red Federal de Carreteras en México. Dicha metodología contempló tres secciones, la primera basada en un monitoreo global utilizando InSAR; la segunda es un análisis estadístico de las series temporales obtenidas mediante imágenes satelitales con el objetivo de determinar el momento adecuado para transitar de la evaluación global a la local; la última sección es el monitoreo local usando visión por computadora para examinar parámetros dinámicos de las estructuras. Al llevar a cabo cada fragmento mencionado de la investigación se llegó a la siguiente lista de conclusiones:

- Evaluando las capacidades de la metodología InSAR para el monitoreo de la salud estructural de los puentes a través de una prueba controlada, utilizando una antena reflejante que continuamente sufría cambios en su posición vertical, se determinaron diferencias con respecto a valores de referencia, con un promedio de 0.8 mm, máxima discrepancia de 2.1 mm, mínima magnitud de -1.4 mm, desviación estándar de 1.2 mm y Error Medio Cuadrático de 1.36 mm. Por otro lado, aplicando la metodología en el Puente El Carrizo, las velocidades encontradas fueron de ± 0.5 mm y desplazamientos acumulados de ± 2 milímetros, siendo calificado como un comportamiento estable. Por lo tanto, se pudo validar que InSAR cuenta con la capacidad de determinar desplazamientos en el rango de lo milimétrico, pero con algunas limitantes. En el mismo sentido, la desventaja más relevante fue una carencia en la cantidad de puntos reflejantes resultantes, esto es propiciado por la resolución de las imágenes utilizadas y se puede solucionar implementando imágenes comerciales o colocando antenas reflejantes sobre los puntos de mayor relevancia en la estructura. Consecuentemente, se concluye que InSAR puede implementarse como una herramienta viable como complemento de las inspecciones visuales durante la primera etapa de evaluación y monitoreo de la salud estructural de los puentes.
- En el Capítulo 4, se desarrolló una metodología con el objetivo de establecer magnitudes de desplazamientos consideradas de riesgo, empleando como

parámetro inicial series de tiempo InSAR. Los resultados mostraron que la mayor probabilidad de riesgo simulando en 10 años con una velocidad constante sobre 7 puntos localizados en el doble voladizo del Puente El Carrizo, fue inferior al 20%, lo cual es un valor relativamente bajo. Por otro lado, en la mayoría de los casos a pesar del aumento en la velocidad de desplazamiento desde 2 hasta 10 veces, la probabilidad de riesgo no alcanzó niveles superiores al 90%. Por lo que, se concluye que, de acuerdo con la metodología propuesta, el puente no presenta un comportamiento anormal sobre las áreas analizadas. En este caso, el valor de riesgo basado en la metodología cubre problemas relacionados con desplazamientos producidos por fenómenos lentos, como la socavación y la pérdida de rigidez. De esta manera, se puede estimar el riesgo de los puentes y tomar la decisión de realizar el monitoreo local.

- Se utilizó una metodología para estimar indirectamente la fuerza de tensión de cables en puentes, sin necesidad de tener información sobre el área de la sección transversal relacionada al valor de masa por unidad de longitud. Sin embargo, se deben contemplar datos históricos de tensión directa y frecuencias de vibración de los cables. Además, se incorporó la tecnología de visión por computadora para desarrollar mediciones remotas. Esta propuesta para la estimación de la fuerza de tensión se validó utilizando datos históricos al comparar los resultados con la información, obtenida mediante acelerómetros y gatos hidráulicos, en el Puente Río Papaloapan. Los resultados proporcionaron una diferencia dentro del 3.5%, lo que indica que el enfoque planteado puede usarse para supervisar el desempeño de los puentes atirantados cuando no se disponga de información sobre los parámetros mecánicos de los cables. Además de esto, la tecnología de visión por computadora brinda a los usuarios ventajas por su facilidad de operación, adquisición a distancia, resolución en valores de frecuencia igual a 0.008 Hz y precisión de 0.002 Hz. Mientras que, en términos de tensión, el promedio de las diferencias con respecto al acelerómetro fue de 0.015%, el valor medio de 0.77% y la desviación estándar igual a 1.14%. A pesar de los resultados prometedores, aún se requiere mejorar el algoritmo para poder efectuar muestreos con una mayor distancia cámara-objetivo.
- En el Capítulo 6 de la presente investigación, se planteó otra metodología cuyo objetivo fue estimar la fuerza de tensión a la cual son sometidos los tirantes de un puente, implementando video capturado por una cámara montada en un UAV. Las principales características de este procedimiento son omitir el proceso de calibración, corregir el desplazamiento de la cámara con el mismo objetivo de interés y aplicar los algoritmos de coincidencia de plantilla y flujo óptico. La estrategia se validó en laboratorio y luego en el Puente Río Papaloapan; en el ensayo de laboratorio se utilizó una mesa vibratoria para producir desplazamiento vertical de acuerdo con unas frecuencias configuradas. En este caso, la diferencia media entre los resultados obtenidos por UAV y la frecuencia de referencia fue 0.0022 Hz, máximo valor de 0.0033 Hz, mínimo de 0.0009 Hz, desviación estándar de 0.009 Hz y Error Medio Cuadrático de 0.0024 Hz. Igualmente, se extrajo información de 6 cables en el Puente Río Papaloapan, donde la evaluación de la frecuencia fundamental obtenida

por el UAV y el acelerómetro mostró una diferencia máxima de 0.03061 Hz (0.9778 %), mínima de 0.00105 Hz (0.059 %) y un Error Medio Cuadrático de 0.0139 Hz, lo cual representa en tensión, 40.7 kN (1.96 %), 3.3 kN (0.123 %) y 19.1 kN, respectivamente. A partir de los experimentos, se estableció que, para obtener mejores resultados, es necesario utilizar un UAV más estable al ser afectado por el viento emitido cuando los vehículos transitan con una alta velocidad. Por último, se concluye que establecer la fuerza de tensión de los cables mediante un UAV es factible en seguridad durante la campaña de medición y en términos de precisión para complementar los estudios que se realizan actualmente.

- Se aplicó un algoritmo de visión por computadora para determinar las frecuencias de los modos de vibrar del tablero perteneciente a la zona inicial de la sección atirantada del Puente El Carrizo. En el experimento se utilizó un acelerómetro midiendo durante el mismo periodo que la cámara de video, obteniendo un promedio de discrepancias igual a 0.0192 Hz (1.4 %), máxima diferencia de 0.0781 Hz (4.1 %), mínimo valor de 0.0006 Hz (0.078 %), desviación estándar de 0.0296 Hz (1.4 %) y Error Medio Cuadrático de 0.0331 Hz. A través de la cámara de video se pudieron identificar 6 frecuencias naturales del puente (primera, segunda, tercera, cuarta, sexta y séptima). Fundamentado en los resultados finales, se concluye que, de acuerdo con la tolerancia requerida para calibrar un Modelo de Elementos Finito, la precisión de la metodología desarrollada con base en visión por computadora cumple con los estándares para resolver esta problemática. Sin embargo, como trabajo futuro es necesario la mejora del algoritmo para determinar la frecuencia de vibrar de varios puntos separados con algunos metros de distancia, de esta forma se puede calcular el modo de vibrar y no solamente sus frecuencias.

Fundamentado en las conclusiones encontradas, se contestaron las preguntas de investigación planteadas al inicio del estudio:

1. ¿Qué desplazamientos estructurales importantes puede detectar InSAR en los puentes con imágenes libres? Debido a la mínima resolución temporal de las imágenes de acceso libre pertenecientes a la misión satelital Sentinel-1 entre 6 o 12 días, solamente se pueden analizar desplazamientos ocasionados por fenómenos relativamente lentos que se puedan caracterizar por esta frecuencia de muestreo, por ejemplo, socavación, pérdida de rigidez, subsidencia, y efectos por cambios de temperatura. De todos los casos mencionados, la socavación es la principal causa de colapsos en puentes alrededor del mundo, por lo cual, es el más relevante de detectar.
2. ¿Cuál es la precisión de InSAR para detectar desplazamientos en puentes? De acuerdo con la prueba controlada desarrollada para validar el desempeño de InSAR al definir desplazamientos verticales, se determinó que la precisión es de aproximadamente 2 milímetros.
3. ¿Se puede sustituir un sistema completo de monitoreo por uno basado en UAV? Basado en las problemáticas presentadas en los puentes cuando se utilizaron

los Vehículos Aéreos no Tripulado para estimar la fuerza de tensión de los tirantes, la respuesta es no, debido principalmente a la inestabilidad del UAV ocasionada por las fuertes ráfagas de viento de la zona y producidos por los vehículos que constantemente transitaban. Sin embargo, un sistema de visión por computadora instalado en zonas firmes del puente puede ser implementada con mayor facilidad para la estimación de los parámetros dinámicos de la estructura, por ejemplo, tensión de los tirantes, modos de vibrar, frecuencias de los modos de vibrar, incluso, se puede relacionar las deflexiones sufridas por el puente con respecto al tipo de vehículo que las produce. Además, considerando que algunos puentes ya cuentan con este sistema de cámaras en funcionamiento, se pueden implementar sin ninguna inversión inicial en equipo, instalación y mantenimiento.

4. ¿Cuál es la precisión y resolución de video-imágenes para detectar frecuencias de vibrar en puentes? La precisión de la metodología visión por computadora fue de 0.002 Hz, mientras que la resolución va a depender de la distancia entre la cámara y el objeto de interés, así como los parámetros de la cámara. En el caso de la resolución, se obtuvo valores de 0.008 Hz en las pruebas generadas y con los dispositivos implementados.

Por otro parte, considerando la hipótesis planteada al inicio de la investigación, se establece que es verdadera, indicando que es factible el evaluar los puentes de México basado en técnicas de percepción remota con una precisión milimétrica. Esto se debe a que todos los puentes del país pueden ser estudiados con un rigor al nivel del milímetro desde el 2014 hasta la actualidad con imágenes del Sentinel-1, lo que permite detectar posibles casos anormales y también un comportamiento de referencia cubriendo varios años. Mientras que, visión por computadora de igual forma permite evaluar el desempeño dinámico de la estructura con alta precisión, pero con una mejor resolución y frecuencias de muestreo.

8.2. Trabajos futuros y recomendaciones

Para finalizar la tesis de investigación se establecen las siguientes recomendaciones como trabajos futuros:

- Emplear InSAR para supervisar el desempeño de otros elementos estructurales que componen a un eje carretero.
- Automatizar el procesamiento InSAR en un servidor remoto.
- Mejorar el algoritmo para determinar tanto la tensión de los tirantes como las frecuencias de vibrar, en términos de distancia entre la cámara y el objeto de interés.
- Determinar desplazamientos a través de una cámara y visión por computadora.
- Aplicar algoritmos de inteligencia artificial para determinar comportamientos anormales en series de tiempo proporcionadas por InSAR.

Anexos 1. Algoritmo para determinar tensiones de tirantes con una cámara fija

En las siguientes imágenes se muestra el pseudo-código planteado para desarrollar el procesamiento de video-imágenes contemplando que la cámara digital está montada en un trípode. 1) Previo a ejecutar el algoritmo es necesario definir los parámetros de entrada, por ejemplo, ubicación de los videos, imágenes de referencia, carpeta de constantes, entre otras cosas (Figura A.1). 2) Posteriormente a tener los parámetros de entrada, se crea una imagen de referencia y se rota de acuerdo al ángulo de inclinación que presenta el tirante, en el caso de no requerir iniciar con una nueva referencia, esta se crea utilizando las coordenadas guardadas previamente en la carpeta de referencia (Figura A.2). Al trabajar con una nueva imagen de referencia, se muestra al usuario en pantalla dicha información para seleccionar dos zonas de interés con dos clics derechos (formando un rectángulo), la primera zona es para aislar la parte del tirante en estudio, la segunda selección, es de un punto fijo fuera del puente cuyo objetivo es disminuir el desplazamiento que se genera por el movimiento de la cámara. Ya con las dos zonas de interés se prosigue a leer el video cuadro por cuadro, las imágenes se transforman a escala de grises y en el caso de ser necesario se rotan (Figura A.3).

3) Después, se localizan las dos zonas de interés (cable y punto fijo) en cada imagen y se guardan las coordenadas, si se tienen marcas Aruco en el tirante se puede calcular el factor de escala para transformar los desplazamientos a milímetros (Figura A.4).

4) A toda la serie en el tiempo se le calcula la media estadística y se le resta a cada uno de los desplazamientos, se guarda el desplazamiento resultante, se aplica la Transformada Rápida de Fourier, se muestra la gráfica de los resultados, y se inicia un proceso iterativo para detectar las frecuencias de los modos de vibrar (Figura A.5).

5) El proceso para detectar las frecuencias finaliza cuando el usuario es capaz de localizar todas las frecuencias de interés e ingresa la frecuencia fundamental; para finalizar, con las frecuencias se calcula un promedio, se busca la constante y se obtiene la tensión indirecta; en el caso de analizar otro video, el algoritmo inicia de nuevo (Figura A.6 y A.7).

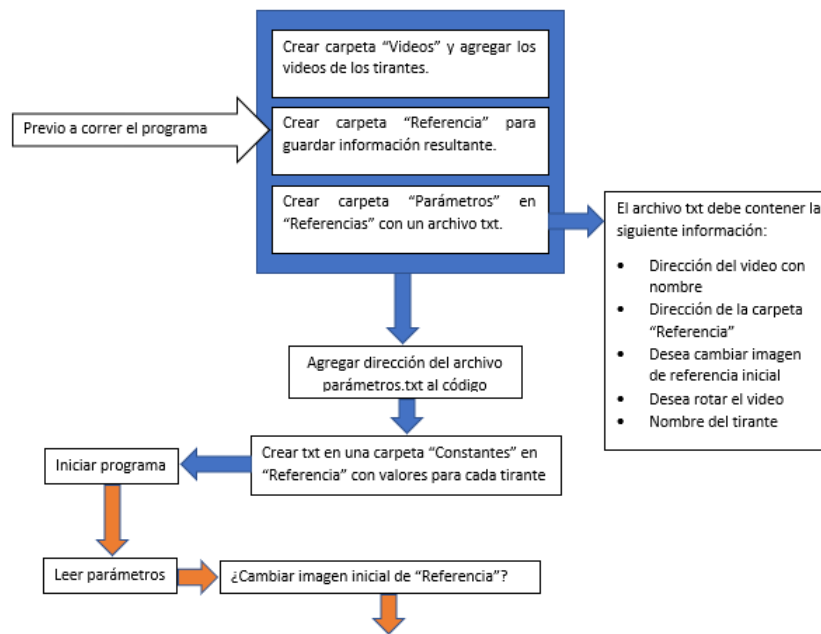


Figura A.1: Programa 1

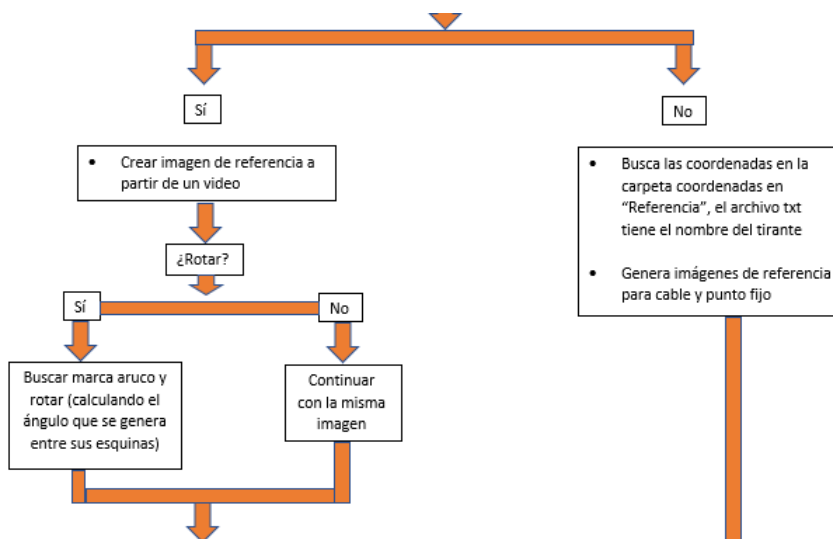


Figura A.2: Programa 2

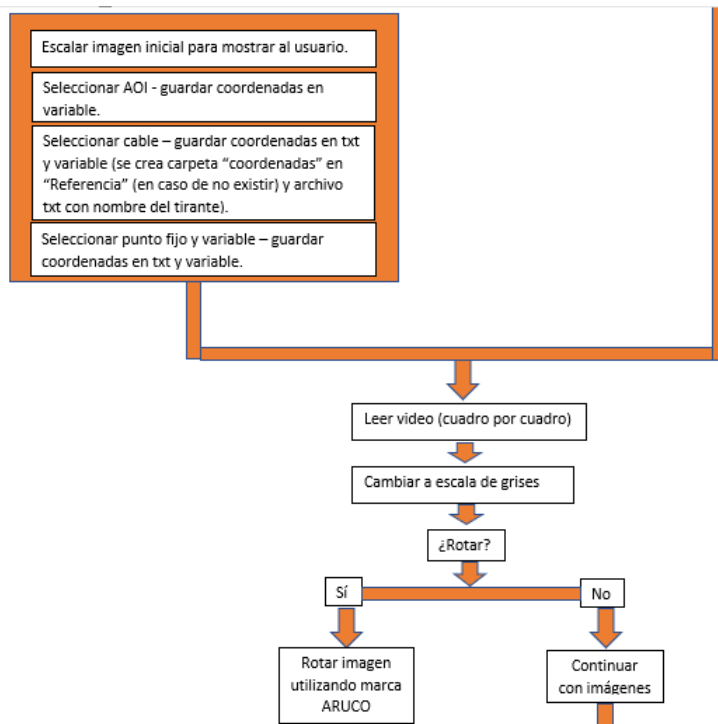


Figura A.3: Programa 3

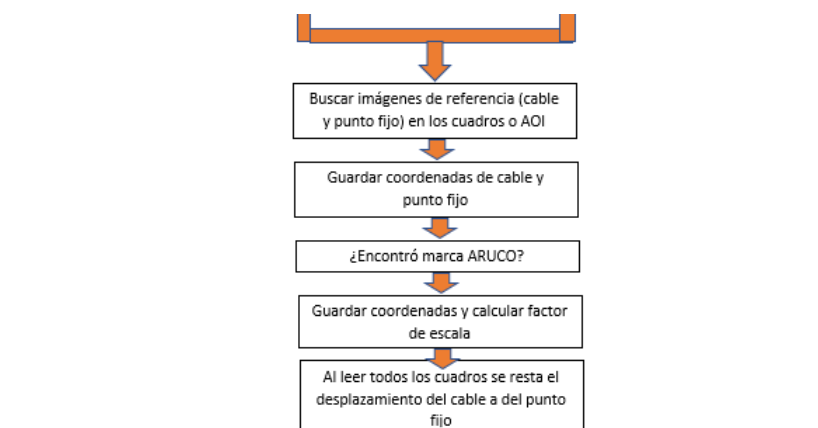


Figura A.4: Programa 4

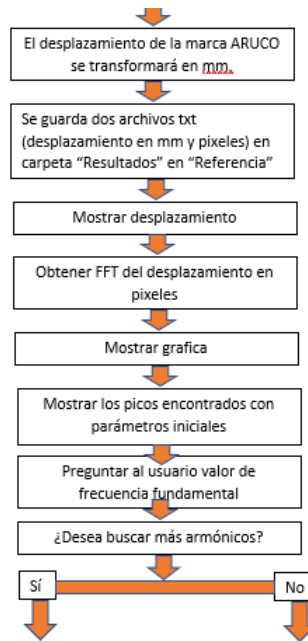


Figura A.5: Programa 5

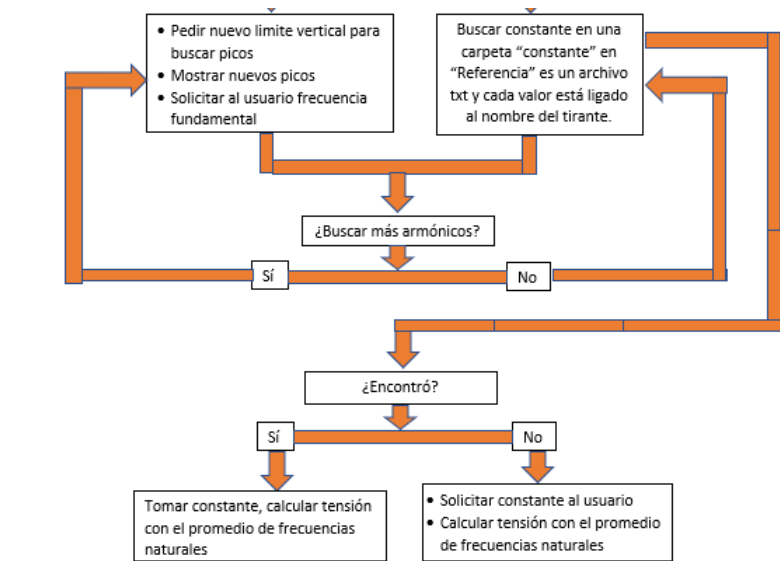


Figura A.6: Programa 6

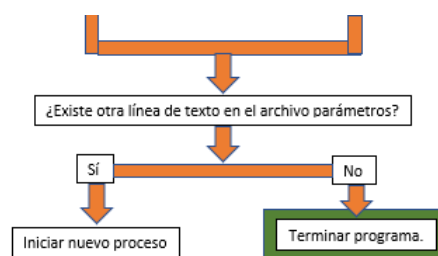


Figura A.7: Programa 7