

**UNIVERSIDAD CENTRAL
VICERRECTORÍA ACADÉMICA**

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**APLICACIÓN DE RPAS EN LA INSPECCIÓN DEL ESTADO Y
COMPORTAMIENTO DE DEFLEXIÓN EN EL PUENTE VEHICULAR
SOBRE EL RÍO CONCEPCIÓN (RUTA NACIONAL n.º 27) E
INSPECCIÓN DE LOS PUENTES MODULAR VEHICULAR DE CALLE
CASTELLA Y VEHICULAR SOBRE EL RÍO COLORADO (PUENTE
RAFAEL IGLESIAS)**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL**

ESTUDIANTES:

YAZMÍN CHACÓN SALAZAR 206650876

KENNETH OVARES SÁNCHEZ 303950568

LUIS ANDRÉS SALAS RÍOS 111550569

TUTOR: ING. FERNANDO HERRERA CABEZAS

SEDE METROPOLITANA, COSTA RICA

Marzo, 2025

CONTENIDO

CONTENIDO	2
IMAGENES	6
DEDICATORIA	10
AGRADECIMIENTOS	11
EPÍGRAFE	12
GLOSARIO	13
RESUMEN	14
CAPÍTULO I. PROBLEMA	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	19
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	19
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	20
1.4 ANTECEDENTES.....	25
1.4.1 <i>Antecedentes nacionales</i>	26
1.4.2 <i>Antecedentes internacionales</i>	29
1.5 PROYECCIONES.....	35
1.5.2 <i>Limitaciones</i>	36
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	37
2.1 HERRAMIENTAS	38
COMPONENTES DE LA TECNOLOGÍA RPAS	38
<i>Dron:</i>	38
<i>Proceso de Inspección de Puentes según CONAVI</i>	58
<i>Proceso de Inspección de Puentes según AASHTO</i>	61
CAUSAS DE AFECTACIÓN EN PUENTES.....	62
PROBLEMAS ESTRUCTURALES EN PUENTES.....	62
• DEFICIENCIAS DEL ACERO	62
• DEFICIENCIAS DEL CONCRETO	63
<i>Deflexión de Puentes</i>	66
<i>Consideración de Cargas</i>	66

<i>Análisis de Carga Sísmica (CSCR 2010)</i>	67
- <i>Herramienta 1 - Diagrama ISIKAWA</i>	72
- <i>Herramienta 2 - FODA</i>	73
- <i>Herramienta 3 - Análisis de interesados</i>	74
- <i>Herramienta 4 - Mapeo de procesos técnicos</i>	77
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	82
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	83
3.2 MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	83
3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	84
3.3.1 <i>Fuente de información primaria</i>	84
3.3.2 <i>Fuente de información secundaria</i>	84
3.3.3 <i>Fuente de información terciarias</i>	85
3.3.4 <i>Sujetos de información</i>	85
3.4 VARIABLES DE ANÁLISIS	90
3.6 PROCESO PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	100
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	104
DESCRIPCIÓN DE LOS PUENTES POR EVALUAR.....	105
INSPECCIÓN DEL PUENTE CASTELLA	108
<i>Modelado 3D</i>	109
<i>Inspección mediante ejecución del vuelo manual</i>	110
<i>Evaluación mediante la inspección de los elementos del puente</i>	111
SÍNTESIS DE RESULTADOS	127
INSPECCIÓN DEL PUENTE RAFAEL IGLESIAS SOBRE EL RÍO COLORADO RUTA NACIONAL N.º 1	128
<i>Inspección mediante ejecución del vuelo manual</i>	131
SÍNTESIS DE RESULTADOS	148
PUENTE VEHICULAR SOBRE EL RÍO CONCEPCIÓN RUTA NACIONAL N.º 27	148
<i>Inspección mediante ejecución del vuelo manual</i>	152
<i>Evaluación mediante la inspección de los elementos del puente</i>	152
SÍNTESIS DE RESULTADOS	172
PROCESAMIENTO DE IMÁGENES EN DRONE2MAP	172
PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN EL SOFTWARE DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL.	180
<i>Definición de cargas según AASHTO</i>	194
<i>Cálculo del coeficiente sísmico:</i>	200

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	210
CONCLUSIONES	211
RECOMENDACIONES	213
REFERENCIAS.....	217
APÉNDICES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
APÉNDICE A: BITÁCORA DE ATENCIÓN AL ESTUDIANTE.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
APÉNDICE B: CARTA DE APROBACIÓN DEL TUTOR.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CARTA DE APROBACIÓN DEL TUTOR.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
APÉNDICE E: BOLETA DE INSCRIPCIÓN DEL TEMA DEL TRABAJO FINAL DEL GRADUACIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DECLARACIÓN JURADA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CÉDULA DE IDENTIDAD	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DECLARACIÓN JURADA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CÉDULA DE IDENTIDAD	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DECLARACIÓN JURADA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CÉDULA DE IDENTIDAD	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

TABLAS

Tabla 1. Coeficientes sísmicos espectrales.....	70
Tabla 2. Determinación de la zona sísmica para el Puente sobre el río Concepción. ...	70
Tabla 3. Mapeo de procesos	78
Tabla 4. Matriz de análisis de riesgos	80
Tabla 5. Lista de chequeo	81
Tabla 6. Variables de la investigación por objetivo específico.....	90
Tabla 7. Inspección del relleno y/o losa de aproximación (costado este) del puente ..	114
Tabla 8. Hallazgos de las deficiencias encontradas en el puente modular Castella....	127
Tabla 9: Ductilidad global asignada según Capítulo 4, CSCR2010.....	200
Tabla 10. Coeficientes sísmicos espectrales.....	201
Tabla 11. Clasificación de edificaciones.....	203

IMAGENES

Imagen 1. Puente río Toro, ruta nacional número 32	22
Imagen 2. Inicios de la Fotogrametría	25
Imagen 3. Puente Nanjing, China.....	34
Imagen 4. La geometría de la planificación de vuelos en terreno llano	43
Imagen 5. Marcas fiduciales en fotografías aéreas	45
Imagen 6. Ajuste de haz o de estrellas proyectivas.....	47
Imagen 7. Diferencia entre MDT y MDE	48
Imagen 8. Ejemplo de ortofoto.....	49
Imagen 9. Superestructura de un puente	55
Imagen 10. Subestructura de un puente	55
Imagen 11. Subestructura de un puente	56
Imagen 12. Zonificación Sísmica.....	68
Imagen 13: Ubicación del puente con respecto a las fallas geológicas cercanas	71
Imagen 14: Figura 5.7 Factor Espectral Dinámico del CSCR2010.....	72
Imagen 15. Diagrama de Ishikawa	73
Imagen 16. Matriz de estrategias FODA.	74
Imagen 17. Resumen de la metodología DMAIC	84
Imagen 18. Herramientas de la gestión metodológica de la investigación	100
Imagen 19. Fotografía obtenida con el dron.....	105
Imagen 20. Fotografía obtenida con el dron.....	106
Imagen 21. Ubicación del puente Castella	108
Imagen 22. Fotografía A_ Puente Castella.....	109
Imagen 23. Fotografía B_ puente Castella	109
Imagen 24. Fotografía C_ puente Castella.....	111
Imagen 25. Fotografía D_ puente Castella.....	112
Imagen 26. Diagrama de deficiencia detectada, puente Castella.....	113
Imagen 27. Fotografía E_ puente Castella	125
Imagen 28. Ubicación geográfica del puente Rafael Iglesias	128
Imagen 29. Fotografía A_ puente Rafael Iglesias.....	129
Imagen 30. Fotografía B_ puente Rafael Iglesias.....	130

Imagen 31. Fotografía C_ puente Rafael Iglesias	131
Imagen 32. Ubicación geográfica del puente sobre el río Concepción.....	149
Imagen 33. Fotografía A_ puente sobre el río Concepción	150
Imagen 34. Fotografía B_ Puente sobre el río Concepción	150
Imagen 35. Fotografía C_ Puente sobre el río Concepción.....	151
Imagen 36. Fotografía D_ Puente sobre el río Concepción.....	151
Imagen 37. Fotografía E_ Puente sobre el río Concepción	152
Imagen 38. Fotografía F_ Puente sobre el río Concepción	153
Imagen 39. Captura de pantalla de la selección del producto por generar.....	174
Imagen 40. Captura de pantalla de la evidencia del vuelo realizado.....	174
Imagen 41. Captura de pantalla de la evidencia del vuelo realizado + las fotografías tomadas.....	175
Imagen 42. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 1	176
Imagen 43. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 2	176
Imagen 44. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 3	177
Imagen 45. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 4	177
Imagen 46. Captura de pantalla del mapa ortorectificado	178
Imagen 47. Captura de pantalla del Modelo Digital de la Superficie	178
Imagen 48. Captura de pantalla del modelo 3D de área de interés.....	179
Imagen 49. Captura de pantalla del modelo 3D de área de interés.....	179
Imagen 50. Captura de pantalla donde se realiza la definición del puente.....	180
Imagen 51. Captura de pantalla de la definición del puente	181
Imagen 52. Captura de pantalla de la definición de materiales del puente	182
Imagen 53. Captura de pantalla de la definición de dimensiones de los elementos del puente (ancho superior del cajón)	183
Imagen 54. Captura de pantalla de la definición de los elementos del puente	184
Imagen 55. Captura de pantalla de la definición de los elementos del puente	185

Imagen 56. Captura de pantalla del modelado del cajón del puente	186
Imagen 57. Captura de pantalla del modelado del cajón del puente	187
Imagen 58. Captura de pantalla del modelado del estribo o muro de retención del puente	188
Imagen 59. Captura de pantalla del modelado de la columna o pilar	189
Imagen 60. Captura de pantalla del modelado de la columna o pilar	189
Imagen 61. Captura de pantalla del modelado del pilar o columna del puente	190
Imagen 62. Captura de pantalla del modelado del pilar o columna del puente	190
Imagen 63. Captura de pantalla del modelado del pilote del puente	191
Imagen 64. Captura de pantalla del modelado del diafragma del puente.....	192
Imagen 65. Captura de pantalla del modelado del diafragma del puente.....	192
Imagen 66. Captura de pantalla del modelado del apoyo fijo	193
Imagen 67. Captura de pantalla del modelado del apoyo móvil	194
Imagen 68. Captura de pantalla de la definición de cargas	195
Imagen 69. Captura de pantalla de las clases de cargas utilizadas	196
Imagen 70. Captura de pantalla de las clases de cargas utilizadas	196
Imagen 71. Captura de pantalla de las clases de cargas utilizadas	197
Imagen 72. Captura de pantalla de los patrones de cargas	197
Imagen 73. Inclusión de coeficiente sísmico	198
Imagen 74. Inclusión de cargas vivas vehiculares.....	198
Imagen 75. Captura de pantalla de la configuración de acuerdo con el Código Sísmico	199
Imagen 76. Figura 5.7 Factor Espectral Dinámico del CSCR2010.....	202
Imagen 77. Captura de pantalla de la inclusión de las cargas.....	203
Imagen 78. Captura de pantalla de la inclusión del coeficiente “C”	204
Imagen 79. Captura de pantalla de la inclusión del espectro de respuesta.....	204
Imagen 80. Captura de pantalla de la inclusión del espectro de respuesta.....	205
Imagen 81. Captura de pantalla del análisis de las cargas utilizadas para la corrida del modelo.....	205
Imagen 82. Captura de pantalla del análisis de resultados para las cargas muertas..	206
Imagen 83. Captura de pantalla del análisis de resultados para las cargas móviles...	207

Imagen 84. Captura de pantalla de los resultados de la deflexión generados por el *software*..... 208

Imagen 85. Captura de pantalla situación de la reacción por cortante en apoyos..... 209

Imagen 86.Fotografía de inspección mediante equipo RPAS 209

DEDICATORIA

Con gratitud y profundo respeto, dedicamos este trabajo a quienes han sido nuestro apoyo incondicional en este camino.

A nuestros padres, tanto a los presentes como a los que están en el cielo, por su amor, sacrificio y enseñanzas que nos han guiado en cada paso de nuestras vidas.

A nuestros profesores y mentores, por compartir su conocimiento y motivarnos a superarnos con cada desafío.

A nuestros amigos, por su compañía, aliento y por recordarnos que en cada esfuerzo hay una recompensa, ya que somos capaces de esto y más.

Y, sobre todo, a Dianita, Gil, Gre y a Dios, por ser nuestra fuente de inspiración y fortaleza en los momentos más difíciles.

Este logro es tanto nuestro como de ustedes.

Con cariño y gratitud,

Yazmín Chacón

Kenneth Ovares

Andrés Salas

AGRADECIMIENTOS

Al concluir este trabajo, deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron posible la elaboración de esta tesis.

En primer lugar, agradecemos a Dios, por darnos la fortaleza y sabiduría para superar los retos en este camino académico.

A nuestros padres tanto a los presentes como a los que están en el cielo, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarnos el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sin su guía y sacrificio, este logro no habría sido posible.

A nuestras familias, por su aliento en los momentos difíciles y por ser mi refugio en cada etapa de este proceso.

A nuestros profesores y asesores, en especial a Fernando Herrera Cabezas, por su paciencia, orientación y valiosos consejos, que enriquecieron el desarrollo de esta investigación.

A nuestros amigos y compañeros, por su compañía, motivación y por hacer de esta etapa una experiencia inolvidable.

A la Universidad Central, por brindarnos las herramientas y el conocimiento necesario para alcanzar esta meta.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron con su apoyo, palabras de aliento o enseñanzas, nuestro más profundo agradecimiento.

Con cariño y gratitud,

Yazmín Chacón

Kenneth Ovares

Andrés Salas

EPÍGRAFE

*"La diferencia entre una persona exitosa y
las demás no es la falta de fuerza,
ni la falta de conocimiento,
sino la falta de voluntad."*

Vince Lombardi

GLOSARIO

AASHTO: Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials).

ArcGIS: *Software* de Sistemas de Información Geográfica.

CNC: Consejo Nacional de Concesiones.

CONAVI: Consejo Nacional de Vialidad.

CRTM05: Proyección oficial para Costa Rica.

CSCR: Código Sísmico de Costa Rica.

CSI Bridge: Compañía de *Software* Estructural y de Ingeniería Sísmica (Computers and Structures, Inc.: Structural Engineering Software).

JICA: Agencia Japonesa de Cooperación Internacional.

LANAMME: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

MDE: Modelos Digitales de Elevación.

MDS: Modelos Digitales de Superficie.

MDT: Modelo Digital del Terreno.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

UCR: Universidad de Costa Rica.

RPAS: Sistema de Aeronaves Tripuladas por Control Remoto (Remotely Piloted Aircraft System)

SAEP: Sistema de Administración de Estructuras de Puentes.

TPD: Tránsito Promedio Diario.

RESUMEN

La inspección de puentes es considerada gran importancia ya que permite asegurar la integridad de las estructuras; en Costa Rica este proceso se encuentra a cargo del MOPT, CONAVI, LANAMME y los gobiernos locales principalmente, los cuales se basan en las normas AASHTO, el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2010) y el documento denominado Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes, para realizar estas inspecciones y análisis.

Actualmente, la tecnología puede brindar un papel importante en este tipo de inspecciones, esto mediante el uso de drones, fotogrametría y *softwares* útiles para el procesamiento de la información, con los cuales se pueden obtener modelos y nubes de puntos tridimensionales de la estructura en análisis, esta información con una alta resolución y modelos a escala, los cuales facilitan las inspecciones visuales.

En esta tesis, se realiza la aplicación de RPAS en la inspección del estado y comportamiento de deflexión en el puente vehicular sobre el río Concepción (Ruta Nacional n.º 27) e inspección de los puentes modular vehicular de Calle Castella y vehicular sobre el río Colorado (puente Rafael Iglesias).

Ya que la aplicación de la tecnología ayuda a disminuir costos que se presentan con las técnicas tradicionales para la inspección de este tipo de estructuras; mediante el modelado y procesamiento de la información obtenida, se determina la deflexión del puente sobre el río Concepción, el cual con la ayuda del *software* despliega valores puntuales de los movimientos de la estructura, lo que proporciona el valor de deflexión buscado.

Se presentan los análisis de las inspecciones realizadas, en las tres estructuras de puentes mencionadas anteriormente, de las cuales se determina que los tres puentes se encuentran en estado crítico, ya que presentan grietas, deformaciones, desgastes, entre otros, lo cual afecta significativamente la integridad de las estructuras.

Se realiza un modelado con el *software* CSI Bridge, se consideran los principales componentes de la superestructura del puente sobre el río Concepción, y se obtiene un

análisis estructural simplificado que brinda el comportamiento de este sometido a diferentes cargas.

El estudio realizado confirma que la fotogrametría mediante RPAS es aplicable al análisis de deflexión de un puente; sin embargo, sería más útil contar con tecnología aún más avanzada como lo es el LiDAR para tener más capacidad de captura de detalles en superficies ocultas, como por debajo de las estructuras de los puentes, y de esta manera minimizar deficiencias y que los resultados sean aún mejores.

CAPÍTULO I. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la inspección de puentes es considerada como una parte importante para asegurar que la estructura sea integral; además ayuda a la prolongación de su vida útil. Mediante las inspecciones se pueden detectar daños o desgastes, evitando que estos se conviertan en un problema más grave.

Sin embargo, la inspección de puentes se puede ver limitada por varios factores como:

Accesibilidad limitada, uno de los principales problemas es acceder a todas las partes críticas del puente para poder realizar las inspecciones visuales o con equipos especializados.

El riesgo al que se exponen los inspectores y la limitación que produce el paso constante del tránsito mientras se llevan a cabo las inspecciones.

Otros de los factores que afecta las inspecciones son el costo y el tiempo, ya que el tener que contar con grúas, andamios y otros equipos especiales hace que se generen mayores costos y, por ende, más tiempo para llevar a cabo esta inspección.

Los beneficios que se pueden obtener al realizar las inspecciones con Sistema de Aeronaves Piloteada a Distancia o Aeronaves Tripuladas por Control Remoto en adelante RPAS son:

Accesibilidad, se pueden realizar inspecciones en áreas peligrosas o de difícil acceso para los trabajadores, como, por ejemplo, debajo de arcos, cables suspendidos, o en las partes más altas de las estructuras.

Reducción de riesgos, de esta manera se evita que los inspectores se expongan al ingreso de lugares complicados o altos, por lo que se tendría una disminución de riesgos laborales.

Velocidad, el uso de drones permite realizar de manera más rápida la inspección, en comparación con los métodos utilizados tradicionalmente.

Disminución en costos, ya que se reduce la necesidad de utilizar equipos pesados y el tiempo de trabajo.

La aplicación de la fotogrametría permite la creación de modelos tridimensionales, esto a partir de imágenes 2D. Esto para realizar la inspección de puentes con RPAS con las cámaras adecuadas y de alta resolución que permitan la captura de miles de imágenes, las cuales posteriormente se deberán someter a un procesamiento por medio de *softwares* especializados que permitan generar esos modelos 3D de manera detallada. Con el uso de la fotogrametría se obtienen modelos que se pueden aplicar como:

Evaluación precisa, se pueden obtener representaciones exactas de la estructura del puente en análisis; con las cuales se pueden evaluar grietas, corrosión o deformaciones.

Obtener mediciones detalladas, con los modelos obtenidos se pueden realizar mediciones sin la necesidad de contacto directo con la estructura.

Realizar análisis comparativos, a través del tiempo se podría evaluar el desgaste de la estructura, o bien determinar el avance de los diferentes daños que se pueden presentar en la estructura.

Monitoreo de deformaciones, mediante controles se pueden determinar los movimientos o deformaciones que se presenten en el puente, con estos estudios se puede analizar la estabilidad de la estructura y la seguridad de esta.

Detección de daños, con la ayuda de RPAS y fotogrametría se podrían detectar las pequeñas fisuras, observar el desprendimiento de materiales y corrosión en los componentes metálicos o bien los daños en el concreto de la estructura de los puentes.

Mantenimiento preventivo, con los datos recolectados y previamente analizados, los cuales permitan actuar antes de que se produzcan daños graves en la estructura.

Adicionalmente, mediante el uso de fotogrametría se pueden tener más ventajas como:

Generación de una base de datos, para la generación de un modelo 3D el cual se realice con regularidad, registro histórico visual de la estructura y cuantitativo del estado del puente.

Mayor precisión y repetición, con la ayuda de tecnologías como los drones y la fotogrametría se obtiene más información de gran precisión y estas inspecciones son más replicables que las efectuadas manualmente.

Por lo tanto, se realizará un análisis mediante la aplicación de RPAS y fotogrametría en la inspección de los puentes: Modular vehicular de calle Castella, vehicular sobre el río Colorado (puente Rafael Iglesias) y vehicular sobre el río Concepción Ruta Nacional n.º 27, para mostrar los resultados obtenidos a partir de estas tecnologías.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Aplicar la tecnología de vehículos aéreos no tripulados en la inspección de los puentes modular vehicular de calle Castella, vehicular sobre el río Colorado (puente Rafael Iglesias), y el puente vehicular sobre el río Concepción Ruta Nacional n.º 27 y análisis del comportamiento de deflexión en el puente sobre el río Concepción Ruta Nacional n.º 27.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir mediante la tecnología de RPAS el proceso de recolección de información para demostrar la optimización de la inspección de puentes y la documentación específica.
- Implementar procesos fotogramétricos para el análisis de la información obtenida de la inspección realizada a uno de los puentes mediante RPAS.
- Determinar la deflexión máxima del puente sobre el río Concepción Ruta Nacional n.º 27, mediante la aplicación de *softwares* para demostración de la existencia de deformaciones.

- Facilitar los registros requeridos para una futura normalización del proceso de inspección de puentes mediante el uso de RPAS.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los procesos de inspección de estructuras viales, y específicamente en puentes, son fundamentales para garantizar la seguridad, las mejoras y los mantenimientos ya sea correctivos o preventivos, promoviendo la reducción de costos por medio de la anticipación de problemas estructurales que generen afectación de mayor índole, agrupándolos en múltiples temas de afectación, a nivel regional y a nivel país, según la ruta que contenga la estructura que deba ser intervenida.

Las afectaciones causadas por procesos de mantenimiento de puentes en los que la ruta dé paso establecen problemas de impacto económico en las zonas de transición logística de mercancías entre sitios importantes, tanto comerciales como industriales, o agrícolas, y tránsito de turistas, en los que los costos de operación de los sistemas de transporte terrestre aumentan debido a desvíos por cambios de ruta, o incluso imposibilidad de tránsito.

El impacto comercial y económico, debido a los cierres de carreteras nacionales y cantonales, que interconectan regiones productivas, o turísticas genera pérdidas económicas a gran escala, donde Wa-CHong (2024) se refiere textualmente:

Se estima que por esa ruta pasan 15 mil vehículos diarios y muchos de ellos son furgones que llevan exportaciones e importaciones y es un problema lo que implica mayores costos para las empresas y el consumidor de la zona atlántica y pérdidas de productos...

Así mismo “El cierre de la ruta provoca pérdidas de hasta \$250 por contenedor por día, ya que se tiene que mandar los contenedores por vías alternas”, según explicó Vivian Alfaro de la Junta Directiva de la Cámara de Exportadores. (p.4)

Según la estimación anterior, se puede indicar que la pérdida económica diaria ante cierres de carretera por distintas situaciones podría rondar el millón de dólares

Un ejemplo de lo indicado, a nivel nacional, refiere la situación del cierre periódico de la Ruta n.º 32. Esta ruta, para el año 2023, estuvo cerrada en 35 ocasiones por temas de deslizamientos o daños en dicha ruta, siendo un porcentaje relativamente alto en contexto con la prioridad que tiene como ruta principal para el comercio nacional.

Ante esta situación se establece como medida alternativa el uso de la ruta que conecta la provincia de Limón ingresando por Cartago, siendo que esta otra ruta posee estadísticas de afectación por las mismas condiciones.

El tema referido al desvío o utilización de rutas alternativas ante cierre de rutas principales hace necesaria la utilización de rutas secundarias para recurrir al punto de llegada, incurriendo en mayor tiempo de traslados y gastos operativos.

Esta situación establece el paso o traslado a otra secundaria alternativa, la cual también deberá sopesar el paso de vehículos livianos, vehículos de carga pesada, autobuses u otros, considerándose en conformidad con este documento y de forma especial el paso sobre puentes que no han sido diseñados para tal efecto, y que incluso su vida útil es mucho menor que la de los puentes construidos en las rutas principales.

Estadísticamente, se ejemplifica que la ruta 32 posee desde el puente sobre el río Corinto, hasta el puente sobre el río Pacuarito, alrededor de 20 estructuras, las cuales poseen un estado conservación establecido entre serio y alarmante, situación causada principalmente por el terremoto de Limón del año 1991, y que no han sido intervenidos, según estudio realizado por el LANAMME para el año 2020.

Imagen 1. Puente río Toro, ruta nacional número 32



Fuente: LANAMME -UCR, 2014.

La ruta alternativa n.º 10 como ruta alterna hacia la provincia de Limón posee entre 25 y 40 puentes, que cruzan ríos importantes y poseen longitudes de la superestructura importantes, y los cuales tienen una antigüedad importante, es importante destacar que la vida útil promedio de estos está entre los 50-100 años, han sido construidos con sistemas estructurales, que han sido afectados por las condiciones de la zona.

De forma paralela se tiene la misma situación para la Ruta n.º 27, que conecta la ciudad capital con los cantones de Orotina y el puerto de Caldera. Esta ruta es considerada como una ruta de conexión comercial, turística y de paso entre el sector Pacífico Central, Pacífico Sur y la provincia de Guanacaste, situación que la define como una ruta principal de muy alto tránsito.

Al estimar alguna afectación sobre esta ruta, deberá coordinarse el desvío sobre la Ruta n.º 01 “Cambroner”, la cual por sí sola ya posee condiciones frágiles por posibles derrumbes, o afectaciones en su infraestructura vial que definan la necesidad de un cierre para efectos de ejecutar algún mantenimiento, ya sea preventivo o correctivo.

En la Ruta n.º 27, se ubican aproximadamente 43 puentes, en los distintos tramos de la ruta, situación que provee un estado de alerta en torno a los procesos periódicos de

inspección que se requieren para estas estructuras, y así evitar respecto al rubro de problemas en puentes, algún desvío a la ruta de Cambronero (San Ramón-Coyol).

Establecida la condición anterior, se puede indicar que no solo debe darse una prioridad a la evaluación de puentes y atención a los contenidos en rutas primarias importantes, sino que la atención o evaluación e inspección de puentes debe considerarse como una gestión periódica e indefinida, que debe ampliarse a rutas alternas de forma exclusiva, mediante mecanismos ágiles y rápidos que confieran resultados o criterios ingenieriles y fiables, para establecer la criticidad de atención de puentes.

En torno a la gestión del proceso de inspección de puentes en Costa Rica, según las metodologías de acceso a estos y la documentación de dicha información, se sugiere una verdadera auscultación visual de estructura conformada por sus distintos componentes, la cual deberá ser realizada por profesionales que posean la competencia técnica para la recolección de la información y ser capaces de analizar cada uno de los elementos inspeccionados en conformidad con la documentación realizada.

De aquí se establece como una alternativa segura, económica, ágil y precisa, en la que se pueda realizar los procesos de evaluación de la superestructura de puentes, en torno a deflexiones de dicha estructura, y que permitan realizar una toma de decisiones rápida en materia de ejecución de mantenimientos preventivos, correctivos, o de forma grave el cierre temporal de un puente, como lo es el uso de sistemas de aeronaves tripuladas por control remoto.

Los costos de las inspecciones, la seguridad, la precisión obtenida, establecen los fundamentos principales, que permiten priorizar esta metodología de análisis, obtención y documentación de datos, para ejecutar la valoración de estructuras de paso “puentes”, sobre los procesos convencionales de inspección de puentes.

El enfoque principal del uso de la metodología, basada en la inspección de puentes con el uso de RPAS, refiere los procesos preventivos o antelaciones de situaciones que puedan afectar la situación estructural de un puente y como principal prevención la protección de las personas que transitan constantemente en dichas estructuras.

No obstante, esta metodología permite una evaluación integral de los daños sufridos por un puente tras un evento de desastre natural que impida el acceso directo a la estructura. Esto posibilita una determinación precisa de la condición operativa del puente, identificando la necesidad de intervenciones inmediatas y facilitando la planificación de reparaciones de emergencia.

Esta metodología constituye un avance tecnológico importante en la gestión del mantenimiento y seguridad de la infraestructura vial, optimizando la capacidad de respuesta ante situaciones críticas y mejorando la toma de decisiones fundamentadas en datos precisos y actualizados por parte de las instituciones competentes, tales como el MOPT, CONAVI, LANAMME, gobiernos locales (municipalidades), la CNE, entre otros.

1.4 ANTECEDENTES

Antecedentes de la fotogrametría

Para el año 1858, el coronel francés Aimé Laussedat logró la generación de planos exactos de construcciones y pequeñas extensiones de terrenos, a partir de la fotografía.

Conociéndose de antemano que desde 1725, ya se disponía del uso de perspectivas con fines cartográficos, el proceso fotogramétrico iniciado por Laussedat refiere al proceso ingenieril, principal en el proceso de toma de datos, y mediante el cual se obtiene de forma rápida y precisa la información del elemento por evaluar.

Para los años 30, Estados Unidos realizó los primeros trabajos de reconocimiento de grandes extensiones, utilizados para definir áreas de conservación forestal y de suelo, siendo que en esta etapa se construyeron los equipos fotográficos como el estereoplanígrafo, el fotocartógrafo, el autorreductor y otros.

Imagen 2. Inicios de la Fotogrametría



Fuente: Global - Mediterránea & Geomática (2023).

1.4.1 Antecedentes nacionales

La administración de puentes en Costa Rica está liderada y normalizada por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, el Consejo Nacional de Vialidad y el Consejo Nacional de Concesiones, todos estos encargados de formular políticas específicas y básicas para la ejecución de la construcción y mantenimiento de carreteras y puentes.

Mediante el Sistema de Gestión de Puentes implementado con el apoyo del gobierno de Japón, se logra realizar un estudio, el cual ejecuta la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) (2007), donde se establece la rehabilitación de 10 puentes y propuestas o aportes para una administración de puentes óptima.

El estudio realizado por JICA, llamado “Estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en Costa Rica”, constituyó la base para la creación del Manual de Inspección de Puentes, en propiedad del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica.

Como lo menciona LANAMME (2024), para efectos de verificar la normativa nacional, se consulta la información utilizada por el MOPT, como ente rector en la administración de puentes en Costa Rica, siendo la institución que dispone del inventario de puentes a nivel nacional, así como las referencias técnico-administrativas para documentar dicha gestión.

La necesidad de fortalecer el proceso de inspección de puentes en Costa Rica se da posterior al año 2012, cuando colapsa el paso o alcantarilla ubicada en la quebrada La Guaria en ruta 01, así como el colapso vial por afectaciones en rutas en el sector de Turrialba para el año 2015, el colapso del puente colgante sobre el río Tárcoles de la ruta 137, para el año 2009, entre otros casos, evidenciándose la deficitaria gestión de puentes en Costa Rica por la falta de seguimiento y control.

De acuerdo con lo que indica Barrantes (2017), se presenta la guía para la determinación de la condición en puentes mediante inspección visual generada por el ingeniero Jorge Muñoz Barrantes de la unidad de puentes de la nave de la UCR. Se evidencia que la

situación actual de la evaluación de puentes en Costa Rica carece de prácticas de conservación. Así mismo, el escenario de las estructuras del inventario de puentes del MOPT realizado exhibe deficiencias y problemas serios que requieren de una pronta atención.

De lo indicado anteriormente, se puede extraer que la integridad estructural y funcional de cada puente no ha sido inventariada correctamente ni evaluada de una forma oportuna en el tiempo. Estimado, es así como en el año 2007 se incorpora el Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (en adelante SAEP).

El programa SAEP nace como un proyecto de cooperación con la agencia para la cooperación internacional del Japón. Este sistema ha tenido distintas dificultades, por ejemplo, el proceso de implementación, así mismo que a la fecha no cuenta con la totalidad de la información de puentes de la red nacional.

Sin embargo, es un insumo útil e inicial para efectos de poder documentar la situación de los puentes analizados.

Según lo indicado por LANAMME (2024), es importante indicar que el SAEP, si bien reporta al administrador de la información del inventario de puentes y el estado de estos, no describe cualitativamente su condición, por ejemplo, la incorporación de elementos de análisis específicos para cada uno de los elementos que se requiera analizar.

Esta situación es alarmante debido a que no se identifica de manera oportuna daños estructurales graves que requieran de atención inmediata y para los cuales se vea afectada, su funcionalidad y la seguridad del tránsito vehicular o peatonal.

Se puede indicar que este sistema de asignación de pesos a los procesos de inspección no prioriza una condición peligrosa que ocurra en uno o pocos elementos, sino que identifica de una forma bastante limitada y en algunos casos omite aspectos de gran relevancia para la evaluación de puentes, enfocándose primeramente en la seguridad vial y en las que no se ha considerado la situación propia del diseño sísmico del puente y que no brindaría una descripción cualitativa de la condición de la estructura.

Siendo esta información muy básica, no permite al ingeniero o el analista de la información, establecer parámetros importantes como alertas para la ejecución de procesos de mantenimiento o incluso cierres de los puentes de manera oportuna.

Respecto a la normativa que integre el proceso fotogramétrico para obtención de modelos de elementos estructurales y específicamente puentes, mediante los cuales se proceda a realizar la evaluación estructural de estos, se dispone de una propuesta generada por el señor Andrés Ureña Mora, estudiante de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, María José Rodríguez Roblero, profesora instructora de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, Luis Guillermo Vargas Alas Ingeniero de la Unidad de Puentes del LANAMME (UCR), y Paul Antonio Vega Salas Jefe, Oficina de Geomática del LANAMME, quienes definen de forma general el proceso de desarrollo de una metodología de inspección de puentes utilizando sistemas aéreos no tripulados.

El estudio desarrollado por el personal de LANAMME y la UCR define que el uso de los equipos o sistemas RPAS en Costa Rica para la inspección de infraestructura, en sitios de difícil acceso o para disminuir costos operativos en gestión de maquinaria y personal, no posee una sistematización para inspecciones rutinarias, o posterior a eventos extremos naturales o propiciados por el hombre.

Como resultado final del estudio realizado por el personal de LANAMME y la Universidad de Costa Rica, se define que para ejecutar un proceso eficiente para la inspección de puentes debido a la efectividad de estos sistemas aéreos, es necesario detectar daños o afectaciones en puentes mediante el uso de cámaras de alta resolución y la facilidad de obtención de datos, siempre y cuando el criterio sea brindado por un inspector capacitado o que cuente con la competencia técnica necesaria en el tema estructural.

Así mismo, es necesario que el profesional a cargo esté presente al momento de la inspección con la ejecución del trabajo en sitio, para posteriormente realizar los análisis en oficina.

Otra ventaja que se define a partir de este estudio es la que refiere el favorecimiento de la seguridad en comparación con los métodos convencionales, ya que no se requiere utilizar vehículos de inspección debajo de los puentes o equipos como andamios, escaleras u otros que faciliten los riesgos para el personal a cargo de inspección.

Así mismo los costos de operación asociados a este tipo de inspección también se pueden reducir con el uso de los equipos RPAS en puentes grandes, al evitar el alquiler de vehículos, tanto terrestres como acuáticos, en los procesos de inspección.

El estudio realizado por Ureña (2023) también define que es necesario ingresar a una segunda etapa de la que reporta este informe para validar si el producto o entregable se adapta a los objetivos requeridos para cada puente y cómo optimizar el llenado de la información de formularios que generen registros importantes para los procesos de mantenimiento en puentes.

1.4.2 Antecedentes internacionales

Para el año 2018, Marc Maguire y Hamed Dorafshan enfocaron el estudio sobre el estado actual de las prácticas de inspección de puentes en los Estados Unidos, donde se obtuvo una visión más amplia para la integración del uso de tecnologías para optimizar la inspección de puentes enfocándose en la reducción de costos y las mejoras de precisión de daños estructurales.

Estados Unidos, Estado actual de las prácticas de inspección de puentes (Marc Maguire y Hamed Dorafshan)

Para el año 2018, Marc Maguire y Hamed Dorafshan, ambos especialistas en ingeniería civil y evaluación de estructuras, enfocaron el estudio sobre el estado actual de las prácticas de inspección de puentes en los Estados Unidos, donde se obtuvo una visión más amplia para la integración del uso de tecnologías para optimizar la inspección de puentes, enfocándose en la reducción de costos y la mejora de precisión de daños estructurales.

Ambos investigadores realizaron su publicación en el Journal of Bridge Engineering, donde se identificaron las condiciones o requisitos por evaluar en los procesos de inspección de puentes, para lograr los mejores resultados, esto por cuanto existen prácticas o metodologías que no lograron obtener las precisiones requeridas dependiendo del tipo de inspección.

Este tipo de estudio define como viable el uso de tecnología de RPAS, siempre y cuando se determine que el trabajo de obtención de datos cuente con las condiciones climáticas, especificaciones técnicas y competencia técnica adecuadas para lograr el éxito en la inspección realizada.

Es así como los investigadores de la Universidad del Estado de Utah (2018) definen textualmente:

Nos centramos en determinar los requisitos para la detección de grietas por fatiga utilizando drones cuando las señales de GPS son débiles o inexistentes, y que los drones que dependen únicamente de la señal de GPS pueden producir imágenes deficientes, lo que dificulta a los inspectores detectar problemas. (Maguire y Dorafshan, p.7)

De acuerdo con lo anterior, la aplicación de las tecnologías de drones se puede utilizar para inspeccionar las uniones en puentes de metal, verificar el estado de las juntas, el tablero, cerchas, losas de aproximación, pilas, entre otros, esto gracias a la calidad y cantidad de información que se obtiene a la hora de realizar un vuelo sobre las estructuras en análisis.

Es importante mencionar que en la vanguardia en el uso y la tecnología de RPAS, para las diferentes actividades que actualmente son utilizados, está España, ya que cuenta con el *Plan Estratégico para el Desarrollo del Sector Civil de los Drones en España (2018-2021)*. Tal y como se indica, los RPAS son herramientas versátiles, con capacidad de mejorar la competitividad.

Según el Plan Estratégico de España, los drones son muy utilizados en la agricultura (en gestión de riego, seguimiento del crecimientos de los cultivos, detección de

características del terreno, mejora en los trabajos de las maquinarias), minería (levantamientos topográficos, control, zonas de difícil acceso, monitorización), obra civil (levantamientos topográficos, control, seguimientos de avances en construcciones, vigilancia ambiental), filmación (desde un amplio rango de altura, imágenes de alta resolución, permite varias perspectivas), mantenimiento (preventivo y correctivo, inspecciones en zonas no accesibles, inventario de activos), seguros (inventario de activos, seguimiento en la prevención de fraude, evaluación de daños), y en medio ambiente (observación de planta o animales, detección de vertidos, control de actividades no permitidas, control forestal).

Con la aplicación de ese plan esperan tener nuevas soluciones tecnológicas para contar con una herramienta más capaz y segura; y con esto desarrollar la gestión integral del tráfico de drones, para tener operaciones más seguras. Además, de mejorar las oportunidades, con la aplicación de nuevas tecnologías y servicios; entre estos la ejecución y mantenimiento de obra civil e instalaciones, seguridad y emergencias, telecomunicaciones, transporte de paquetería y personas, entretenimiento, aplicaciones específicas urbanas.

Por lo que este trae consigo la implementación para normativa a futuro, como lo son la seguridad aérea, la protección de enlaces de comunicaciones, la protección de los derechos individuales, además de impulsar el desarrollo empresarial y la divulgación de la información de este sector.

También, Barrio (2017), en el desarrollo de su proyecto *“Uso de drones para la rehabilitación de patrimonio, en España”*, realiza la inspección de la estructura con la ayuda de drones, e incentiva al uso de esta tecnología para el desarrollo de las inspecciones, mantenimiento, y si bien es el caso, hasta la rehabilitación de la estructura o construcción. También, indica que el uso de RPAS viene a innovar, crecer y mejorar en los futuros empleos, ya que, mediante su investigación, se centró en la detección de daños y deficiencias que podría tener la estructura, lo cual le permitió mostrar las diferentes técnicas para la rehabilitación de la estructura en cuestión.

No obstante, Barrio (2017) indica de igual manera en sus proyectos que el desarrollo lo realiza para promover un cambio en la mentalidad de la Universidad, y que se incremente la creatividad en el desarrollo de su investigación; logra su objetivo, por medio de la detección de daños como: lesiones físicas de la estructura (humedad, erosión, suciedad), lesiones mecánicas (deformaciones, grietas, fisuras, desprendimientos), lesiones químicas (oxidación, corrosión), mediante dicha detección le permite desarrollar las técnicas para la rehabilitación de la estructura.

En España, Sancho (2021) desarrolló el proyecto *“Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno”*, este centra su análisis especialmente en presas (en Costa Rica represas hidroeléctricas), esto para determinar el comportamiento de la estructura y generar un control durante una determinada época o a lo largo de su vida útil.

Este tipo de tecnologías se podrían aplicar en cantidad de análisis, una de las que se obtendría información interesante sería estudiar deformaciones en conos volcánicos, para evitar futuras eventualidades por la variedad de nuestros volcanes que son estrombonianos, además, al estar monitoreados se podría observar cualquier cambio que estos sufran en casos de erupciones, por ejemplo.

Sancho (2021) aplica la tecnología de RPAS, por la alta precisión que se puede obtener en los diferentes puntos de interés de la represa, como lo son: laderas, estribos y cuerpo; además, se pueden generar los modelos que representan la realidad constructiva y en tercera dimensión de la estructura, los cuales aportan información muy valiosa, la cual puede justificar la toma de decisiones, después del procesamiento de los datos. Hace énfasis en la practicidad del uso de drones; ya que no hay que contar con gran cantidad de equipos como medios de elevación o incluso trabajos verticales, para poder llevar a cabo la inspección.

Entre los resultados obtenidos por Sancho (2021), indica que la aplicación de drones es muy precisa, lo cual lo considera como un gran complemento en la auscultación de las estructuras.

Entre otros antecedentes importantes de mencionar está el documento “*Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*”, presentado en el congreso de construcción de la Universidad de Cantabria, España (2024), el cual tiene el objetivo desarrollar un sistema de inspección y mantenimiento automatizado basado en la tecnología robótica con RPAS que permita cubrir las principales necesidades que se generan a la hora de realizar una inspección y/o mantenimiento en las infraestructuras civiles, energéticas e industriales. Mediante esto se pretende aumentar la periodicidad de estas inspecciones y/o mantenimientos, esto sin tener que incurrir en más costos o riesgos, incluyendo las soluciones digitales y automatizadas para obtener una inspección de mayor calidad y más productiva.

Este documento del congreso del 2024 indica que la obtención de la información es muy ágil y de manera unificada, lo cual facilita la toma de decisiones de los gestores; sin embargo, es el inspector quien señala las intervenciones urgentes o de mayor prioridad que se le deben realizar a la estructura.

Otro antecedente es el relacionado con el proceso de inspección de puentes en China, este inicia a partir del crecimiento económico, la expansión comercial y la expansión de infraestructura. Este proceso lleva varias décadas e inicia con la construcción de gran cantidad de puentes para efectos de apoyar e incrementar la red de transporte y mantener la seguridad de las estructuras.

El proceso de inspección de puentes en China inicia a partir de los procesos de expansión de infraestructura y de la opción de normas internacionales que regulan la construcción de este tipo de infraestructura. Así también el desarrollo de tecnología y métodos avanzados, lo cual se integra para asegurar la calidad de la construcción de puentes.

El tema de la construcción de grandes proyectos de ingeniería en China ha llevado a que este país sea una de las potencias más importantes en desarrollar infraestructura. Dentro de las grandes obras que tienen, se puede indicar el puente de Nanjing sobre el río Yangtsé.

Imagen 3. Puente Nanjing, China



Fuente: Puente Nanjing, China - Google.com.

Este proyecto constituye uno de los más importantes a nivel de China, sin embargo, no fue construido bajo la normativa y estándares rigurosos de inspección, se terminó de construir en el año 1968.

Como parte de la gestión automatizada y tecnológica de los procesos de inspección en China, el aseguramiento de la calidad de dichos procesos se realiza mediante la constante actualización tecnológica.

Según la Revista Internacional de Ingeniería y Gestión de Aseguramiento de Sistemas, el estudio realizado por Sivasuriyan, A. y Vijayan, D. (2022), refiere textualmente:

... el monitoreo de la salud estructural (SHM) se incrementa predominantemente para identificar la falla prematura de las estructuras en sus primeras etapas de vida. Además, las estructuras patrimoniales dependen en última instancia de técnicas de MAS para mantener o ampliar sus valores vitales. Los sensores son relativamente básicos en su aplicación a las investigaciones de Monitoreo de la salud estructural. (p.1)

Es así como la selección de los sensores puede influir en la precisión de los componentes estructurales.

Este estudio de Sivasuriyan, A., y Vijayan, D. (2022) define cómo las cargas monótonas en distintos puntos influyen el proceso de flexión y es así como una respuesta fundamental de la viga. En cuatro puntos se captura utilizando variados sensores aumentando los puntos de evaluación de la resistencia a la fuerza. Así mismo, como el uso de sensores de flexión, sensores de suelo eléctricos y sistemas microelectromecánicos de sensores acelerómetros, así como investigaciones experimentales donde se definen su posición. Como resultado de estas evaluaciones puede indicarse que los acelerómetros superan a otros sensores en los componentes de la verificación.

1.5 PROYECCIONES

A continuación, se muestran las proyecciones que se pretende alcanzar con esta investigación:

- Aplicación de nuevas tecnologías como RPAS para la inspección de los puentes: modular vehicular sobre la calle Castella, vehicular sobre el río Colorado (puente Rafael Iglesias), y vehicular sobre el río Concepción Ruta Nacional n.º 27.
- Generación de la fotogrametría de las estructuras a partir de los vuelos realizados con RPAS.
- Obtención de resultados de las inspecciones realizadas a las estructuras a través del procesamiento de la información mediante *softwares*.
- Implementación del uso de estas tecnologías como una herramienta útil en las inspecciones de puentes.
- Mejora continua en la calidad de las inspecciones que se realizan actualmente a las estructuras de puentes.

1.5.1 Alcances

Se llevará a cabo la aplicación de tecnologías de vehículos aéreos no tripulados, mediante vuelos sobre el puente modular vehicular sobre calle Castella, vehicular sobre el río Colorado (puente Rafael Iglesias) y el puente vehicular sobre el río Concepción Ruta Nacional n.º 27, para la inspección estructural de estos puentes; seguidamente mediante el debido procesamiento de esta información obtenida de los vuelos, se generará la fotogrametría de cada una de estas estructuras, la cual se analizará y se mostrarán los resultados conseguidos, los cuales serán valorados a través del *software* seleccionado para el análisis correspondiente y los productos obtenidos del proceso fotogramétrico. Finalmente, se seleccionará uno de los tres puentes para realizarle el análisis de la deflexión, esto con la ayuda de *softwares*.

1.5.2 Limitaciones

Como principal limitación que se ha identificado, y que podría afectar en esta investigación se puede mencionar el clima, ya que con el dron no se pueden realizar vuelos si el clima no es favorable (lluvias, fuertes vientos, entre otros).

La falta de un equipo con la capacidad adecuada para el manejo y procesamiento de los datos obtenidos en los vuelos del RPAS, ya que estas nubes de puntos obtenidas de los vuelos realizados son bastantes robustas, poseen gran cantidad de información.

Necesidad de adquisición de licencias de *softwares* para el procesamiento de los datos obtenidos mediante los diferentes vuelos, o bien para realizar los cálculos deseados de la deflexión de la estructura seleccionada para el análisis.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 HERRAMIENTAS

El presente apartado se refiere a las herramientas utilizadas específicamente para la definición de la presente tesis, y de esta manera realizar la adecuada ejecución del proceso de desarrollo; así como la generación insumos de importancia para todo el desarrollo del proyecto.

Tecnología RPAS

El principal elemento propuesto para la inspección de puentes, utilizando procedimientos fotogramétricos o equipos RPAS, se enfoca en una metodología práctica, eficiente y que minimiza los riesgos. RPAS, cuyas siglas en inglés significan *Remotely Piloted Aircraft System*, hace referencia a sistemas de aeronaves pilotadas de forma remota, que incluyen varios componentes como la aeronave, el enlace de comunicaciones y la estación en tierra para el control del dron.

El proceso de gestión fotogramétrica proporciona información precisa sobre el estado actual de las estructuras, creando modelos geométricos en tres dimensiones combinados con datos de textura, lo que permite obtener imágenes de alta resolución. Los resultados de este procesamiento fotogramétrico se presentan en forma de nubes de puntos, que pueden tener diferentes densidades, estar texturizadas o generar ortomosaicos proyectados.

El uso de esta tecnología facilita el acceso a zonas difíciles o inaccesibles y optimiza la gestión de la inspección estructural de puentes, reduciendo al mismo tiempo los riesgos para el personal encargado de su ejecución.

Componentes de la Tecnología RPAS

Dron:

Según la Real Academia Española (2023), el término dron se refiere a una aeronave no tripulada, de la cual se derivan las siglas RPA y UAV; las que significan respectivamente *Remotely Piloted Aircraft* (Aeronaves Pilotadas Remotamente) y *Unmanned Aerial*

Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado), el cual actualmente no se utiliza. Los términos provienen del ámbito militar, desarrollados en Gran Bretaña (Gutiérrez, 2020, p.26)

La terminología de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS), es la actualización del Sistema Aéreo No Tripulado (Unmanned Aerial System UAS). Estos sistemas cuentan con las mismas características ya que los RPAS y UAS tienen como elemento principal que sus sistemas están integrados por el dron (UAV), el *software* del dispositivo, el enlace de comunicaciones y la estación de tierra.

Por lo tanto, se puede decir que de los términos UAV-UAS a RPA-RPAS, se da como resultado el gran potencial que tienen los RPAS actualmente en las aplicaciones civiles y comerciales; por ejemplo: robótica, sistemas de navegación, comunicaciones, fotogrametría, topografía, bomberos, rescate, entre otros.

Clasificación:

Estos se dividen en dos grandes grupos, basándose en su estructura:

- De ala rotatoria o multirrotores:

Estos logran su sustentación por medio de las hélices, las cuales son impulsadas por motores que se ubican en cada uno de los brazos. Estos drones son de los más estables, por lo que actualmente son muy utilizados para todo tipo de actividades. Las características que presentan este tipo de RPAS es lo que hace posible que puedan mantenerse en el aire sobrevolando en un mismo punto, además, tienen la habilidad de despegar y aterrizar de manera vertical, lo cual permite utilizarlos en espacios reducidos.

Estos se pueden subdividir en cinco diferentes clases según el número de hélices o brazos:

- Tricópteros: cuenta con 3 hélices o brazos, cada uno con un motor, en este caso cada uno de los brazos delanteros gira en sentido contrario para generar potencia, y el motor trasero cumple la función de servomotor, el cual da estabilidad a la hora de realizar el vuelo.

- Cuadricópteros: cuenta con 4 hélices o brazos, cada uno tiene un motor, y son muy estables.
- Hexacópteros: estos cuentan con 6 brazos y 6 motores, su característica principal es que cuentan con una excelente estabilidad, por lo que son muy utilizados a nivel profesional para grabaciones.
- Octocópteros: tienen 8 brazos y 8 motores, aún más estables que los anteriores; sin embargo, tienen la desventaja que son más grandes y pesados por contar con más componentes, lo cual los puede hacer más difíciles de controlar.
- Coaxiales: estos son los que tienen dos motores en cada brazo, lo que los hace más potentes y les permite transportar objetos o elevarse a gran altura con mayor facilidad.

- De ala fija:

Estos drones aprovechan su aerodinámica para su elevación, su composición es similar a la de los aviones, tienen un cuerpo alargado y alas, que salen del centro del cuerpo, y generan la fuerza de sustentación en el aire.

Entre las ventajas de este tipo de drones está una mayor eficiencia energética, esto con respecto a los de ala rotatoria, por lo que son ideales para realizar vuelos de larga duración y alcance.

- Tipo Vtol:

Este tipo de drones pueden despegar y aterrizar como los de ala rotatoria y volar como los de ala fija; por lo que se pueden realizar vuelos de larga duración, con despegues en áreas reducidas; sin embargo, su estabilidad es muy mala para vuelos estacionarios, no permiten maniobrar y se deben volar con velocidades mínimas.

También se pueden clasificar según sus métodos de control:

- Autónomo: no necesita de un piloto humano operando en tiempo real o desde tierra, ya que realiza los vuelos por medio de programaciones previas.

- Monitorizado: se necesita un técnico o persona que pueda proporcionar información y supervisar el vuelo, ya que el dron dirige su propio plan de vuelo, sin embargo, el técnico puede cancelar el vuelo o tomar el mando en caso de incidencia.
- Supervisado: tiene un operador que pilota el dron, sin embargo, este puede realizar algunas tareas de manera autónoma.
- Controlado remotamente (R/C): en este caso es pilotado directamente por un técnico mediante una consola, esta envía la señal de radio directamente del controlador.

Se pueden clasificar también por función de su uso:

- Drones militares: llamados UCAV, *Unmanned Combat Air Vehicle* (vehículos no tripulados de combate aéreo)
- Drones civiles: estos pueden ser de uso profesional/comercial (cartografía, agricultura, inspecciones, entre otros) o para aficionados (por pasión al mundo aeronáutico o fotografía).

Aeronavegabilidad

Según la Real Academia Española (2023), la definición de aeronavegabilidad corresponde a la capacidad para la navegación aérea segura. Por ello es importante considerar algunas características o condiciones para realizar vuelos de manera satisfactoria y segura. Es importante destacar que para los drones que pesen menos de 25 kg no será obligatorio contar con un certificado de aeronavegabilidad.

Fotogrametría

Una definición ampliamente aceptada de fotogrametría y teledetección es la siguiente: Arte, ciencia y tecnología para obtener información válida sobre objetos físicos y el medio ambiente, a través de los procesos de recolección, medida e interpretación de imágenes (fotográficas o digitales) y representación analógica o digital de los modelos

electromagnéticos, energía derivada de sistemas topográficos (cámaras fotográficas o sistemas de escaneo), sin contacto con los objetos (Gomarasca, 2009).

Las fotogrametrías tradicionales y digitales se basan en los mismos principios fundamentales, la tendencia a utilizar fotogrametría con satélite de alta resolución, los datos nos invitan a reconsiderar el enfoque tradicional de la perspectiva central, mientras mueve sus formalismos hacia geometrías proyectivas más complejas que son más relacionado con los métodos de adquisición de imágenes satelitales y las nuevas cámaras digitales aerofotogramétricas. La reconstrucción rigurosa de la correspondencia geométrica entre imagen y objeto en el momento de la adquisición sigue siendo el objetivo ámbito principal de la fotogrametría Gomarasca (2009).

Visualización estereoscópica

El humano es capaz de percibir el relieve de los objetos debido a dos fenómenos, el conocimiento *a priori* de una escena (tamaño de objetos, texturas, sombras, líneas arquitectónicas, etc.) y la diferencia entre las imágenes captadas por ambos ojos. Los dos ojos, al estar situados en posiciones diferentes, recogen cada uno en sus retinas una imagen ligeramente distinta de la realidad que tienen delante, lo cual se conoce como disparidad binocular.

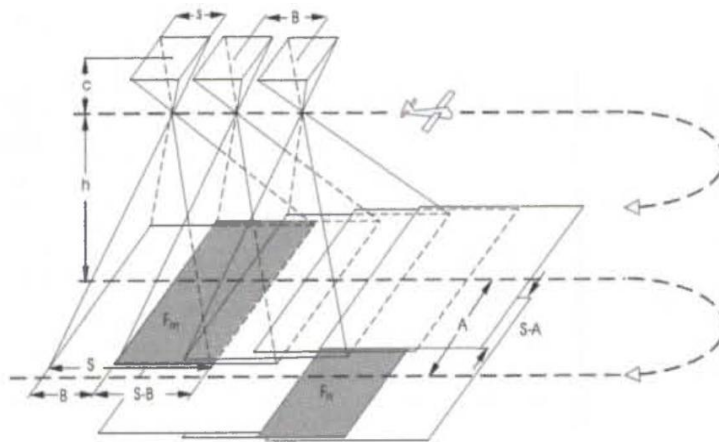
El cerebro toma información de cada ojo y las une en una imagen, interpretando las pequeñas diferencias entre cada vista para calcular la distancia a la que se encuentran los objetos mediante la técnica de la paralaje, generando el efecto de profundidad. Esto produce una visión tridimensional, con la cual se logra ver exactamente dónde está el entorno en relación con el cuerpo (Quiroga et al., 2015).

Lo mismo se aplica a mediciones fotogramétricas, se han diseñado una serie de algoritmos que permiten la reconstrucción 3D en primer lugar, la selección y emparejamiento de puntos característicos. Seguidamente, la estimación de rotación y traslación relativa entre diferentes posiciones. Tercero, la rectificación del estéreo par y la obtención de la imagen dispar. Y, por último, la reconstrucción 3D del terreno y la generación del mapa de elevación digital (Quiroga et al., 2015).

Elementos de un vuelo

Es la estereofotogrametría para la que se emplean cámaras métricas con un formato de imagen cuadrado. Se visualiza el área por mapear en una secuencia de fotografías formando franjas paralelas que juntas crean un bloque de fotografías, ilustrado en la siguiente imagen de Kraus (1993).

Imagen 4. La geometría de la planificación de vuelos en terreno llano



Fuente: Kraus (1993).

A: Distancia entre líneas/franjas de vuelo

B: Base (entre imágenes consecutivas)

C: Distancia principal

s: Lado de la imagen (hacia el borde)

h: Altura de vuelo sobre el suelo

Z: Altura del suelo

v: Velocidad de vuelo sobre el suelo

L: Longitud de una tira/bloque

Q: Ancho del bloque

Los mejores resultados se obtienen con cielos nublados uniformes o despejados y también con velocidades de viento bajas, que permitan la estabilidad de la cámara durante todo el proceso de recopilación. El traslape frontal recomendado debe estar entre

75% y 80%, con un traslape lateral del orden de 65% y 70%. Por otro lado, la altura de vuelo recomendada es 3 a 4 veces la altura del objeto más alto, para de esta manera optimizar la calidad de la imagen, a medida que se aumenta la altura de vuelo se debe aumentar ligeramente el traslape. Colocar al menos 5 GCP (*Ground control points*) y medirlos con receptores GNSS con precisiones milimétricas o centimétricas garantiza resultados precisos (*Tutoriales — Documentación de OpenDroneMap - 3.5.4, s. f.*).

Fotografías oblicuas

Las imágenes oblicuas georreferenciadas amplían los beneficios de las imágenes directas tradicionales, proporcionan una perspectiva única de una localidad, permitiendo a los usuarios ver los lados de un edificio, estructura o característica, exponiendo puntos ciegos, salidas y entradas que antes eran imposibles de localizar en fotografías simples. No se pretende que las imágenes oblicuas reemplacen la ortofotografía existente, sino que más bien las complementen. Las fotografías oblicuas muestran edificios, infraestructuras y terrenos desde todos los lados. Esto da como resultado más detalle, porque hay múltiples perspectivas, que se superponen (Gomasasca, 2009).

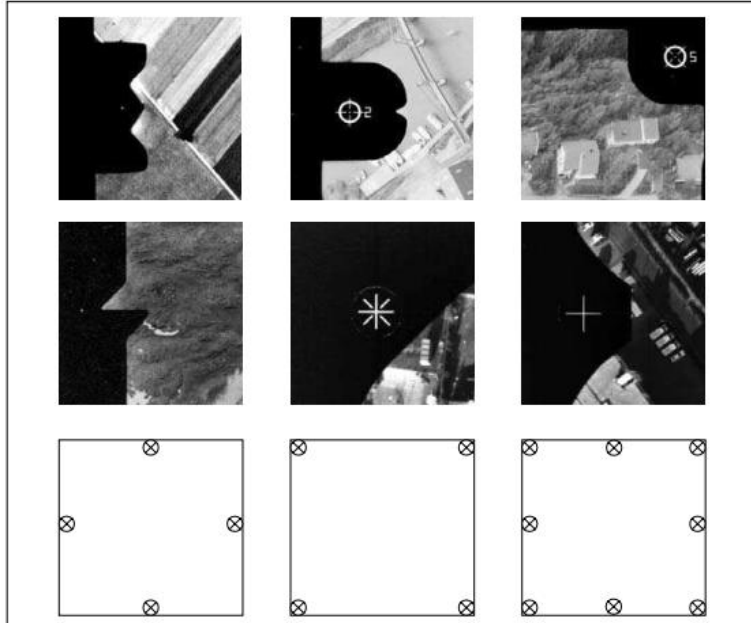
Las fotografías oblicuas son una herramienta de referencia para ocasiones en las que no se requieren mediciones certificadas, pero sí información precisa para ahorrar tiempo y recursos e incluso en una situación de emergencia cuando la precisión centimétrica no es necesaria (Gomasasca, 2009).

Orientación interna

Si se tiene material de imagen proveniente de una cámara de cine y luego fue escaneado, el primer paso para orientar una imagen es la llamada orientación interior, que significa establecer la relación entre (1) el sistema de coordenadas interno de la cámara y (2) el sistema de coordenadas de píxeles. La primera relación viene dada por las llamadas marcas fiduciales superpuestas en la imagen y sus coordenadas nominales, normalmente se indica en [mm] en el certificado de calibración de la cámara. En este certificado usted también encontrará la distancia focal calibrada en [mm]. Después de

medir (digitalizar) las marcas, el *software* podrá calcular los coeficientes de transformación para la relación entre ambos sistemas (Linder, 2009).

Imagen 5. Marcas fiduciales en fotografías aéreas



Fuente: Linder, 2009.

Orientación externa

El paso final dentro del proceso de orientación será calcular la relación entre la imagen y las coordenadas del objeto, las llamadas coordenadas exteriores, para ello se deben medir puntos de control terrestre. Un punto de control terrestre (GCP) es un punto de objeto que se representa en la imagen y a partir del cual se obtienen las coordenadas tridimensionales del objeto (terreno) (x, y, z) conocido (Linder, 2009).

Hoy en día, una alternativa poderosa para obtener coordenadas de un mapa es usar equipos GPS (Sistema de Posicionamiento Global). La ventaja es que se puede usar casi todos los puntos del terreno representados en las imágenes y que no haya problemas debido a la generalización del mapa. La desventaja es, por supuesto, que se debe ir a la zona para obtener muy buenos resultados (Linder, 2009).

RTK es una tecnología de navegación que utiliza mediciones en tiempo real de la fase de la señal de los satélites para mejorar la precisión del posicionamiento. Al equipar un dron con un sistema RTK, se logra una precisión centimétrica en la ubicación del dron durante el vuelo. Esto significa que cada imagen capturada durante un vuelo de fotogrametría está georreferenciada con una precisión excepcional, lo que resulta en modelos 3D y mapas de alta calidad y precisión. (Fotogrametría Con RTK | DroneVision, s. f.)

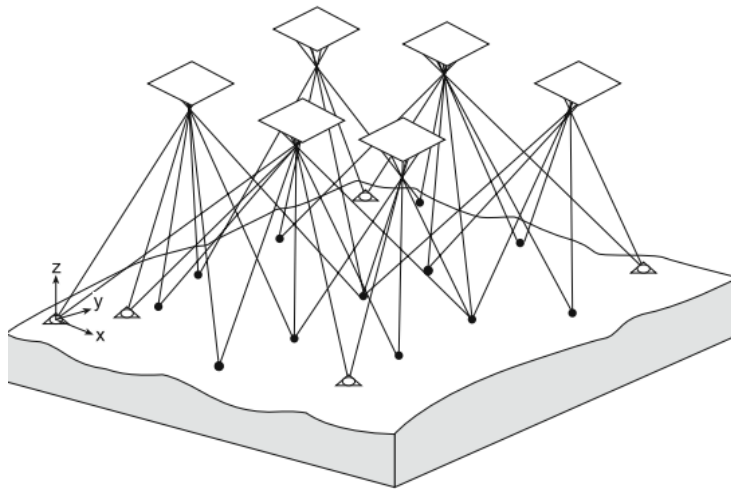
Triangulación aérea

En el caso específico de un vuelo fotogramétrico, en el que se requieren modelos estéreo para reducir el número de GCP y se adopta la triangulación aérea.

Para orientar simultáneamente de forma absoluta (triangulación aérea) todos los modelos en un bloque fotogramétrico aéreo se debe declarar un número suficiente de soluciones de ecuaciones de colinealidad. La triangulación aérea, también denominada ajuste de haz o ajuste de estrellas proyectivas, postula el cálculo directo de las relaciones entre las coordenadas de la imagen y las coordenadas del objeto para todas las imágenes del bloque, sin tener en cuenta el paso intermedio de la orientación del modelo independiente (un par en un tiempo).

Las ecuaciones del sistema de resolución que se refieren tanto a puntos de enlace como a GCP TP son necesarias para vincular de manera relativa dos imágenes de un mismo par estéreo, o en general, imágenes del bloque que muestran la misma área. Se utilizan en un ajuste de paquete para aumentar el número de ecuaciones requeridas, con el fin de mantener menor el número de GCP, como se observa en la Imagen 6 (Gomarasca, 2009).

Imagen 6. Ajuste de haz o de estrellas proyectivas



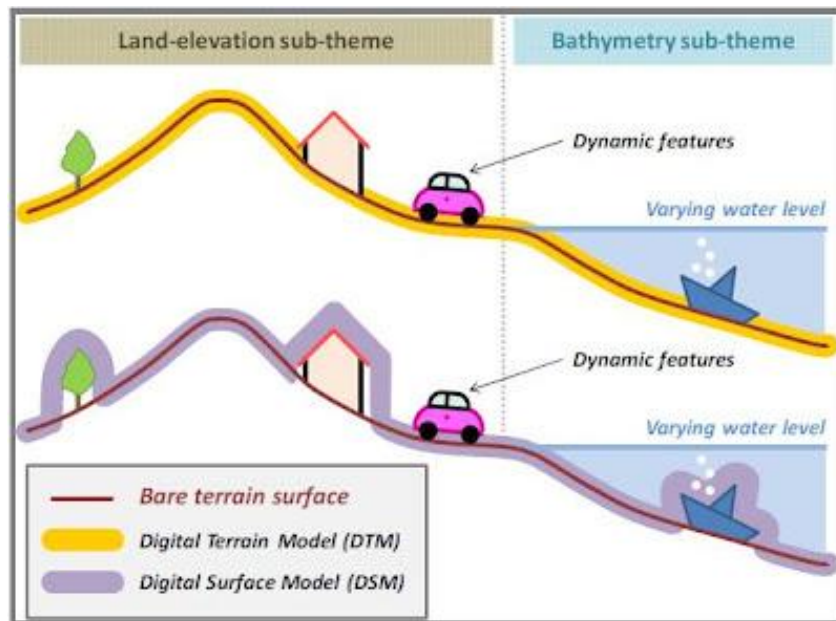
Fuente: Gomarasca, 2009.

Modelos digitales

Se denomina modelos digitales de terreno (MDT) al resultado del proceso de generar una representación abstracta, conceptual, gráfica o visual, de fenómenos, sistemas o procesos a fin de analizar, describir, explicar, simular, explorar, controlar y predecir esos fenómenos o procesos llevando esta definición al contexto el terreno; se tiene que los MDT son estructuras de datos que representan la topografía de manera digital, generalmente eliminando las capas de vegetación, edificios u otras estructuras superficiales.

No solo son fundamentales en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), sino que también permiten el desarrollo de métodos avanzados de visualización realista y la simulación de procesos, ayudando así a la cartografía tradicional y ampliando las capacidades básicas de los SIG en la gestión de información geoespacial. Los MDT tienen aplicaciones variadas, ya que se pueden utilizar para crear modelos de pendientes, modelos digitales de altura normalizada, modelos de curvatura, modelos de iluminaciones y sombras, modelos de incidencia solar, modelos de orientaciones, entre otros. Aunque el término definido de modelo llevado al terreno es el de Modelo Digital del Terreno, por otro lado, un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) es la representación de todos los elementos de una superficie como se muestra en la Figura 7 (Jiménez, 2002).

Imagen 7. Diferencia entre MDT y MDE



Fuente: <https://blog-idee.blogspot.com/2012/08/los-modelos-digitales-de-elevacion-en.html>

Ortofotos

La ortofoto es un término técnico reservado para una imagen que muestra objetos en una superficie de referencia usando una ortogonal perspectiva y la superficie de referencia es un DEM. La perspectiva ortogonal significa una vista vertical del suelo sobre cada píxel, que normalmente se utiliza para mapas. Sin embargo, cualquier imagen tomada por una cámara no tiene esta perspectiva, porque toda la escena es fotografiada desde un punto, conduciendo así a una perspectiva central (Linder, 2009).

Existen dos tipos de errores que son corregidos durante el cálculo de la ortofoto. El primero es el efecto de balanceo y cabeceo, por lo que la imagen sufre una distorsión en la perspectiva y efectos por la curvatura de la tierra, que provoca paralajes de altura que desplazan los objetos en terreno más alto hacia el borde de la imagen y objetos en el terreno más bajo hacia el centro de la imagen (Gomarasca, 2009).

Imagen 8. Ejemplo de ortofoto



Fuente: <http://www.geocaptiva.com/ortofotos-y-modelos-3d/>

En síntesis, se puede definir la fotogrametría como el procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías aéreas, esto según la RAE (2024).

Etimológicamente, según Quirós, (2014), la palabra fotogrametría significa la métrica de lo escrito con luz, por lo tanto, se puede decir que es la ciencia que utiliza la fotografía para hacer medidas.

La principal función es generar mapas, y modelos de terrenos de la superficie terrestre. por lo que es muy utilizada en:

- Topografía: para levantamientos de mapas de terrenos y catastros.
- Arqueología: representaciones de yacimientos arqueológicos.
- Geología: análisis de la tierra en zonas accidentadas y volcánicas.
- Ciencias: por ejemplo, en el medio ambiente, para la evaluación del impacto ambiental y vegetación.

Estas son algunas de las muchas disciplinas en las que la fotogrametría es utilizada.

Actualmente, en la fotogrametría se ha implementado el uso de drones, los cuales se han complementado con diferentes sensores, los cuales aportan gran precisión en los detalles y permiten una gran precisión en los resultados obtenidos.

La fotogrametría se clasifica en dos tipos:

- Según el tipo de fotografía, por ejemplo: la terrestre y la aérea.
- Según el tipo de tratamiento, por ejemplo: analógica, analítica y digital.

Procesos para obtener ortofotos y productos cartográficos

1. Captura de imágenes: Se realiza a través de plataformas aéreas (drones, aviones) o satélites. Las imágenes se toman en diferentes posiciones y ángulos para obtener una cobertura completa del área de interés.
2. Procesamiento de imágenes: Se utilizan *softwares* específicos, por ejemplo, ArcGis Drone2Map, Pix4d, Agisoft Metashape, entre otros, los cuales permiten la calibración de las imágenes. Este proceso implica corregir distorsiones ópticas y realizar ajustes geométricos.
3. Generación de modelos digitales: Se construyen Modelos Digitales de Elevación (MDE) y Modelos Digitales de Superficie (MDS) a partir de las imágenes capturadas. Estos modelos son fundamentales para entender la topografía del terreno.
4. Ortofotografía: A partir de las imágenes procesadas y los modelos digitales, se generan ortofotos. Estas son imágenes aéreas corregidas geométricamente, lo que significa que se eliminan las distorsiones, y se alinean con un sistema de coordenadas geodésicas previamente definido por el usuario, para el caso de Costa Rica, el sistema oficial de coordenadas es CR-Sirgas, proyección cartográfica CRTM05.

5. Generación de Productos Cartográficos: Finalmente, con las ortofotos y los datos obtenidos, se pueden crear diferentes productos cartográficos, como mapas temáticos, mapas topográficos y otros tipos de visualizaciones geoespaciales.

Tal y como se indicó anteriormente, un dron, o vehículo aéreo no tripulado (VANT), es un dispositivo volador que opera sin la intervención directa de un piloto humano a bordo. Estos aparatos son controlados de forma remota o pueden volar de manera autónoma mediante programación. Los drones se utilizan en diversas aplicaciones, incluyendo fotografía aérea, vigilancia, entrega de productos y en el ámbito geoespacial para la obtención de datos cartográficos.

Procesos para obtener ortofotos y productos cartográficos con drones

1. Planificación de vuelo: Antes de iniciar la captura de imágenes, es esencial planificar el vuelo del dron. Esto incluye definir la zona de estudio, la altitud de vuelo y el patrón de vuelo para garantizar una cobertura completa y la superposición necesaria entre imágenes (generalmente un 60-80%). Se puede realizar directamente desde el dron o utilizando herramientas como Google Earth, antes de ir a campo.
2. Captura de imágenes: Una vez planeado el vuelo, se lleva a cabo la captura de imágenes aéreas. Los drones suelen estar equipados con cámaras de alta resolución, que permiten obtener imágenes detalladas del terreno. Es importante contar con puntos en el terreno que tengan coordenadas conocidas en el sistema de referencia donde que quedarán georreferenciados las ortofotos y productos cartográficos.
3. Procesamiento de imágenes: Las imágenes capturadas se procesan mediante *software* especializado. Este *software* realiza la corrección de errores, como la distorsión de la lente y la variabilidad en la iluminación. Luego, las imágenes se alinean y se fusionan para crear un modelo tridimensional del área. Se requiere una máquina con características apropiadas, considerando que el volumen de información que se maneja es muy pesado.
4. Generación de ortofotos: A partir del modelo 3D, se generan ortofotos, que son imágenes aéreas corregidas geométricamente. Estas imágenes se ajustan a las

coordenadas geodésicas del sistema de referencia elegido, eliminando cualquier distorsión que pueda haber surgido durante el vuelo.

5. Elaboración de productos cartográficos: Finalmente, se pueden generar diversos productos cartográficos a partir de las ortofotos, como mapas topográficos, mapas temáticos y modelos digitales de elevación, que son útiles para la planificación territorial, la gestión ambiental y otros campos. En este caso específico, se trabajará con nubes de puntos para el análisis de deflexión de puentes.

Software CSI Bridge

CSI Bridge es un *software* especializado en el análisis y diseño de puentes. Desarrollado por Computers and Structures, Inc. (CSI), esta herramienta permite a ingenieros civiles o estudiantes de ingeniería, modelar estructuras de puentes con una amplia variedad de configuraciones y condiciones de carga. La importancia de este *software* radica en su capacidad para abordar la complejidad de los diseños modernos, garantizando la seguridad y la eficiencia estructural.

Características Principales

CSI Bridge ofrece una serie de características que lo hacen indispensable en el campo de la ingeniería civil. Entre ellas se incluyen:

- Modelado avanzado: Permite el modelado tridimensional de puentes, incluyendo diferentes tipos de materiales y configuraciones geométricas.
- Análisis estructural: Realiza análisis de carga estática y dinámica, así como análisis de efectos de segundo orden, lo que es crucial para el comportamiento estructural bajo condiciones extremas.
- Normativas internacionales: El *software* está diseñado para cumplir con las normativas de diseño más recientes, lo que facilita su uso en proyectos globales.

Aplicaciones en la Ingeniería Civil

El uso de CSI Bridge se ha extendido a lo largo de diversas aplicaciones, desde puentes peatonales hasta estructuras de gran envergadura como puentes atirantados y puentes de arco. Su capacidad para simular condiciones reales y su integración con otras

herramientas de diseño lo convierten en una opción preferida para ingenieros en el mundo entero.

Importancia del *software* en la Formación Académica

El aprendizaje y la práctica de herramientas como CSI Bridge son fundamentales en la formación de futuros ingenieros. El uso de *software* avanzado en el aula permite a los estudiantes adquirir competencias técnicas que son altamente valoradas en el mercado laboral, además de proporcionar una comprensión profunda de los principios de diseño estructural.

Puente

Según la Real Academia Española (2019), puente se define como la construcción de piedra, ladrillo, madera, hierro, hormigón, etc., que se construye y forma sobre los ríos, fosos y otros sitios, para poder pasarlos.

Para efectos normativos en Costa Rica, el MOPT, define el concepto de puente como la estructura que permite salvar el paso de una vía o quebrada, río, lago, canal o bahía, y posee una longitud mayor a 6.00 metros.

Los puentes se pueden clasificar según su función y dimensionamiento como:

- Paso a desnivel: es la estructura que cruza una vía existente.
- Vado: el vado es una estructura que permite el paso por un río o una corriente, conformado por más de cuatro celdas, así mismo no permite el paso permanente de vehículo, lo cual es funcional durante todo el verano, y algunas ocasiones durante el invierno.
- Alcantarilla: es una estructura con longitud libre de celdas menor a 6.00 m, la cual posee revestimiento en el fondo del canal, cabezales y delantales.
- Puente peatonal: es una estructura exclusiva para el paso de personas, y en algunas ocasiones permite el paso de motocicletas, bicicletas y animales.
- Puente ferroviario: corresponde a estructuras exclusivas para ferrocarriles, para transporte de carga y de personas.

- Partes de un puente:

Entre las partes de los puentes se encuentran:

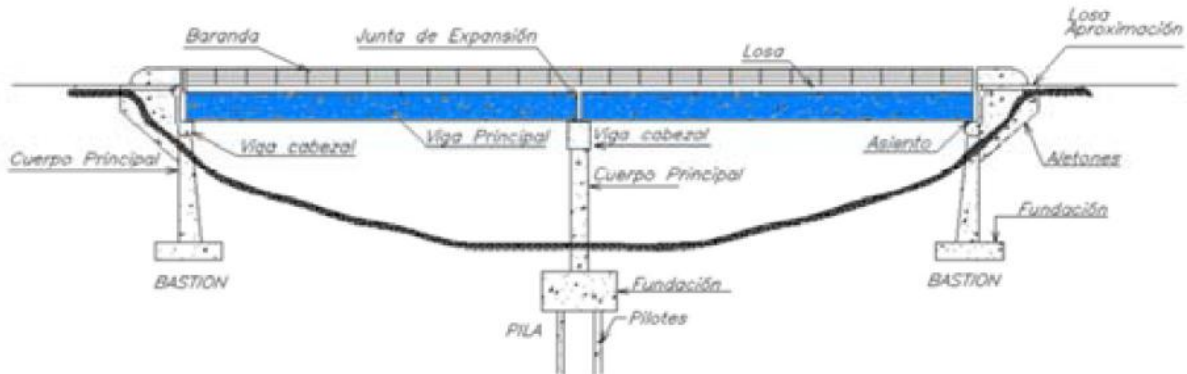
- Superestructura

La superestructura refiere todos los elementos estructurales que se localizan sobre los apoyos del puente.

La superestructura se compone de los siguientes elementos:

- a- Superficie de rodamiento: esta superficie por lo general es de concreto reforzado con resistencias altas, donde no es común disponer de elementos prefabricados. También puede estar construido de acero.
- b- Superficie bituminosa: este elemento está compuesto por la capa asfáltica que recubre la superficie de rodamiento.
- c- Acera y barandas: la acera corresponde al elemento de tránsito peatonal, y generalmente se ubica en los extremos longitudinales del puente.
Las barandas son elementos de seguridad instalados para evitar accidentes de caída de vehículo y peatones al lecho de la superficie bajo el puente. Este elemento es parte de los accesorios del puente.
- d- Los diafragmas: estos elementos proveen del arrostro lateral a la estructura, con la finalidad de transmitir las fuerzas sísmicas o fuerzas por viento que afectan la estructura transversalmente.

Imagen 9. Superestructura de un puente

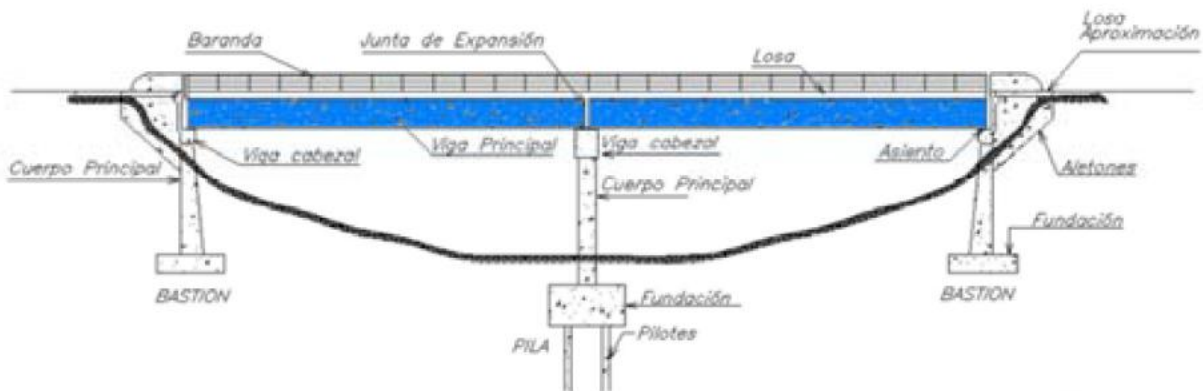


Fuente: MOPT, 2007.

- Subestructura

La subestructura se refiere al componente estructural del puente que da soporte a la superestructura, y está compuesta por los apoyos, bastiones, pilas y fundaciones. La subestructura soporta las cargas vivas y muertas originadas por la superestructura, las cuales son transmitidas al suelo mediante los pilares o estivos del puente.

Imagen 10. Subestructura de un puente

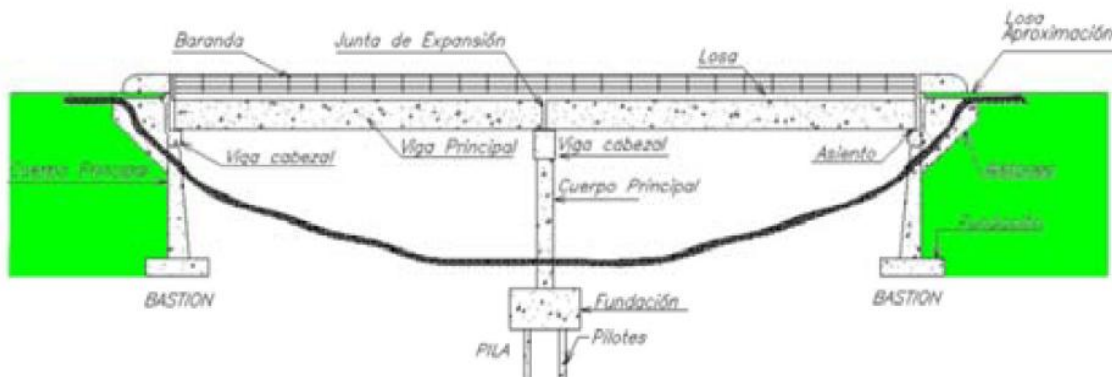


Fuente: MOPT, 2007.

- Acceso de Aproximación

El acceso de aproximación corresponde a la aproximación entre el puente y la carretera o la vía a la que da acceso y a la cual da continuidad, los cuales consisten o están conformados por el material de relleno, las estructuras de contención, los taludes de los accesos, las losas de aproximación y los drenajes de los accesos.

Imagen 11. Subestructura de un puente



Fuente: MOPT, 2007.

- Accesorios

Los accesorios son los elementos que no poseen una función estructural en el puente, y corresponden a los guardavías, las barreras vehiculares, los dispositivos de señalización e identificación y drenajes de la superestructura.

Asignación o evaluación de cargas en puentes

Este tipo de estructuras soportan cargas de diferentes tipos durante su vida de servicio. Estas cargas aplican de igual forma a como se asignan a otros elementos estructurales, las cuales se refieren en dos categorías:

Cargas vivas: este tipo de cargas sugieren una afectación gravitacional debido a cargas de elementos en movimiento, como vehículos de todos los tipos, ferrocarriles, paso peatonal, así como cargas de este tipo que generan afectaciones laterales, provocadas por viento, agua, colisiones de barcos y sismos. Este tipo de cargas son de alta variabilidad y afectan en distintas direcciones o ubicaciones.

Cargas permanentes (carga muerta): este tipo de cargas se disponen sobre el puente durante toda su etapa de servicio. Se refieren a este tipo de cargas:

- Pesor propio de losas, vigas, cajones
- Superficie de desgaste
- Aceras
- Accesorios del puente: barandas, elementos de servicios públicos (tuberías de agua potable, agua residual, portería eléctrica, alumbrado, entre otros).

Inspección de Puentes

La inspección de puentes es el proceso de evaluación y revisión del estado estructural y funcional de un puente, con el objetivo de garantizar su seguridad, durabilidad y correcto desempeño. Esto se logra mediante el análisis detallado de la estructura, la identificación de daños existentes, posibles fallas estructurales, deflexiones y otros defectos que puedan comprometer su capacidad para soportar cargas vivas y muertas.

- Objetivos de la inspección de puentes

Se establece como objetivos de la inspección de puentes los siguientes:

a- Evaluar la seguridad estructural de un puente, verificando la capacidad de soporte de las cargas para las cuales fue diseñado, referido a las cargas de diseño (tráfico vehicular, condiciones climáticas, peso de la estructura, otras cargas).

b- Detectar deficiencias en los puentes según el material con el que fue construido, como roturas, agrietamiento, degradación superficial, delaminación, descascaramiento, contaminación por cloruros, ciclos de hielo y deshielo, eflorescencia, nidos de piedra, desprendimiento de fragmentos, desgaste, abrasión, daño por colisión, daño por sobrecarga, corrosión del acero de refuerzo, daño por fuego, pérdida de presfuerzo, reactividad álcali-sílice, para elementos de concreto, así como para elementos de acero, se puede indicar corrosión, fatiga, sobrecarga, daño por colisión, daño por calor, falla del sistema de protección de pintura, y corrosión del acero resistente a la corrosión (corten). Además, de la presencia de nidos de animales o sus desechos, crecimiento de plantas

que puedan generar la formación de grietas, o bien iniciar procesos de corrosión en la estructura.

c- Mantener la operatividad de los puentes mediante el aseguramiento y el correcto funcionamiento del puente a través de un sistema de inspecciones programadas, que permitan aplicar medidas preventivas para garantizar su durabilidad y seguridad.

Tipos de Inspección de Puentes

La inspección de puentes a nivel internacional debe ser un proceso regulado y normado por las instituciones competentes, en el área. Es así como se puede indicar que, a nivel nacional, el CONAVI es el que establece el manual de procedimientos de actualización del SAEP 2015, así también la normativa nacional integra las especificaciones de AASHTO con referencia al manual de evaluación de puentes 2018.

La primera norma de referencia específica las inspecciones del tipo de inventario, las inspecciones de inventario por rehabilitación, las inspecciones rutinarias, las inspecciones detalladas y las inspecciones de urgencia.

El conjunto normativo refiere las inspecciones iniciales, las cuales contemplan la inspección de inventario y rehabilitación, como una categoría según CONAVI, así también las del segundo grupo como la inspección de rutina, posteriormente la inspección profunda, la inspección de daños, la inspección de elementos críticos, la inspección bajo el agua y la inspección especial.

Proceso de Inspección de Puentes según CONAVI

En el siguiente párrafo se definirán los tipos de inspección regulados por el CONAVI a nivel nacional. Esto tomando en consideración las diferentes inspecciones que realiza la Dirección de Puentes (2017), se despliega lo siguiente:

1. Inspección de inventario

El tipo de inspección de inventario refiere la recopilación de datos generales sobre el puente, así como la toma de datos, como las dimensiones de cada una de las estructuras

además de la inclusión de un registro fotográfico de la estructura del puente, este proceso se realiza al principio de la vida útil del puente y después de alguna rehabilitación importante a la cual se ha sometido el puente, también se le llama inspección de inventario por rehabilitación según el CONAVI.

Según LANAMME, la periodicidad de las inspecciones realizadas por CONAVI son cada 2 años, pueden extenderse o reducirse dependiendo del estado de cada puente; para lo cual el CONAVI realiza contrataciones para realizar estas inspecciones, ya sean las inspecciones visuales, como las inspecciones de inventario.

Dentro de las calidades o datos que se recopilan en esta inspección de inventario se pueden mencionar la localización del puente, la fecha de diseño, la especificación y carga de diseño, la indicación de los servicios públicos que atraviesan, cruzan o son soportados por la estructura, así también el dato del tránsito promedio diario (TPD), las dimensiones generales de la estructura como datos o requisitos esenciales, como la longitud, el ancho de la calzada, el ancho total, la altura libre y la pendiente longitudinal, así también el número de tramos de la estructura, la limitación de la carga que puede transitar por esta estructura, la restricción por altura o ancho de los vehículos que puedan transitar por este.

Como datos generales se indican en el apartado de notas complementarias la fecha y tipo de inspección realizada la información sobre superestructura, subestructura, tipo de materiales, componentes y dimensiones generales de estos. Se hace también la inclusión dentro del expediente respectivo de planos de diseño y planos ASBUILT de la estructura, y, por último, fotografías de inventario que incluyen el rótulo de identificación del puente la superficie de rodamiento y una vista general lateral inferior y vista del cauce del río.

Básicamente en la inspección rutinaria consiste en una inspección visual realizada para verificar la existencia de daños en la estructura y referir o solicitar las labores de mantenimiento necesarias para evitar daños posteriores en la estructura.

La periodicidad de este tipo de inspecciones ronda de 2 a 5 años, sin embargo, la norma AASHTO refiere que la realización debe ser cada dos años.

2. Inspección detallada

Este tipo de inspección se realiza una vez que se han detectado daños graves en la estructura y que deben ser evaluados de una forma muy detallada, por lo general este tipo de inspección requiere el uso de equipos de inspección específicos y especiales, así como también ensayos o pruebas físicas a la estructura respecto a las pruebas o evaluación que se define en la Norma ASSHTO, este tipo de inspección es equivalente a la inspección profunda que realiza el CONAVI.

3. Inspección de urgencia

Este tipo de inspección de urgencia se realiza de forma no programada y evalúa específicamente los daños estructurales causados por factores ambientales al puente, como desastres naturales o acciones humanas, como es el caso de colisiones.

En este caso se determina el nivel del daño presentado, así mismo se procede a realizar la colocación de restricción de carga mediante la rotulación correspondiente, si es necesario también se ejecuta la clausura del puente punto y aparte en este tipo de inspección se realiza una estimación de los costos de los trabajos para la reparación correspondiente.

A modo de comparar este tipo de inspección con el proceso definido en la Norma AASHTO, se indica que es equivalente a la inspección de daños establecida en dicha norma.

4. Inspección de elementos críticos

Este tipo de inspección define la evaluación de elementos críticos, los cuales refieren elementos cuya falla puede causar un colapso total o parcial de la estructura; dentro de los ejemplos de este tipo de estructuras se puede indicar los cables principales de un puente colgante o los elementos en tensión de una armadura de acero.

Este tipo de inspección utiliza métodos de evaluación obstructiva. Asimismo, se realizan comparaciones en sitio con información de inspecciones previas. Este tipo de pruebas, según AASHTO, se deben realizar cada 24 meses.

Como insumo importante se dice que el CONAVI no establece este tipo de inspección en el manual de procedimientos de inspección de puentes, por lo que es importante mejorar las inspecciones rutinarias después de cada evento natural o antrópica.

5. Inspección bajo el agua

Se realiza con la finalidad de verificar la condición de la parte sumergida de la subestructura del puente y del fondo de la sección del río, para este tipo de inspecciones es necesaria la utilización de personal con conocimientos acuáticos de buceo. Este tipo de inspección es de gran importancia ya que permite verificar problemas de socavación producto de socavaciones por avenidas máximas del río e inundaciones.

6. Inspección especial

Se ejecuta a petición de la institución o del administrador del puente con el propósito de evaluar algún daño conocido y brindar el seguimiento correspondiente para asegurar las condiciones estructurales y prever alguna situación por colapso.

Proceso de Inspección de Puentes según AASHTO

Los tiempos de inspección según AASHTO (2017), establecen varios tipos de inspección, como lo son las inspecciones iniciales, las cuales se definen con una frecuencia de una vez. Como segundo tipo de inspección se definen las inspecciones de rutina, las cuales se establecen en periodos o periodicidades de 24 a 48 meses; posterior a estas se refieren las inspecciones profundas, estas se ejecutan en conformidad con lo solicitado por el inspector o el ingeniero responsable.

Como cuarto punto se tienen las inspecciones de daños que generalmente se ejecutan después de un desastre natural o un evento extraordinario; posteriormente a estas se tienen las inspecciones de elementos críticos, las cuales se definen en periodicidad de aproximadamente 24 meses.

Luego están las inspecciones bajo el agua, las cuales ejecutan en periodos de 60 a 72 meses y posteriormente se definen las inspecciones especiales, las cuales se realizan en conformidad con la solicitud del administrador.

Las inspecciones realizadas en conformidad con la norma ASSHTO corresponden a un proceso sistemático y detallado, el cual promueve múltiples inspecciones y uso de distintas técnicas de evaluación como elementos clave que guían a los ingenieros en la realización de procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo en el tiempo adecuado.

Causas de afectación en puentes

Según Vargas y Villalobos (2019), una de las principales causas es la ausencia de un Sistema de Gestión de Puentes, esto por parte de la administración, el cual vele por la implementación de tecnologías y la constante y proactiva inspección de puentes.

Problemas estructurales en puentes

De acuerdo con las inspecciones realizadas por la LANAMME, se tiene identificados los siguientes problemas:

- **Deficiencias del acero:** se pueden presentar principalmente por:
 - Corrosión, lo cual genera pérdida de sección y puede provocar la reducción de capacidad de carga, es el deterioro o falla más común presente en los elementos del puente, ocurre por la presencia de humedad y electrolitos. Se puede presentar en elementos altamente esforzados a tensión, en elementos sujetos a desgaste, elementos en contacto o hendiduras.
 - Fatiga, provoca agrietamiento, se da principalmente por la acción de cargas repetitivas, las cuales provocan esfuerzos por debajo del límite elástico del material, estos agrietamientos pueden provocar fallas serias.
 - Sobrecarga, causa deformaciones; esto sucede cuando los esfuerzos aplicados exceden el límite elástico del material, por lo que se genera la deformación y eventualmente puede llegar a fallar.
 - Daños por colisiones, todos los elementos contiguos a la vía son susceptibles a colisiones o impactos.
 - Daños por calor, al estar expuestos a muy altas temperaturas se pueden presentar deflexiones, elongaciones, pandeos (esfuerzos por compresión)

o torceduras, los tornillos y remaches también pueden fallar. Un incendio por falla vehicular o por un choque deteriora la estructura.

- Falla del sistema de protección de pintura, esta se puede dar por la presencia de ampollas (por pintar la superficie con contaminantes como aceites, agua o sal), corrosión subsuperficial (esta se da cuando avanza bajo la pintura), arrugas (cuando se aplica pintura en exceso), oxidación puntual (esta se presenta cuando se aplica una capa de pintura muy delgada sobre una superficie áspera de acero), retracción (cuando la pintura es aplicada sobre una superficie caliente), y cuarteado (se da por esfuerzos internos en la pintura durante el proceso de secado).
 - Corrosión del acero resistente a la corrosión, esto ocurre si la capa de óxido protectora no se firma correctamente, puede suceder porque la superficie de acero está húmeda por largos periodos de tiempo, en contacto con el suelo o expuesta a cloruros.
 - Principios de fatiga en el caso de los puentes metálicos, esto por las diferentes tensiones a las que se ve sometida la estructura.
- **Deficiencias del concreto:** entre las deficiencias más comunes que se pueden presentar están:
 - Agrietamiento, este se puede categorizar en dos: elementos de concreto reforzado o elementos de concreto preesforzado.
 - Degradación de la superficie: este se presenta como signo de desintegración del concreto por la pérdida gradual o continua de mortero y/o agregados, producto de la descomposición química y pérdida de adherencia del cemento.
 - Delaminación: esta se presenta con la separación superficial del concreto en capas, es consecuencia de la pérdida de adherencia entre el concreto y el acero.
 - Descascaramiento: es una depresión en el concreto causada por el desprendimiento de una sección de la superficie del concreto, es posterior a la delaminación.

- Contaminación por cloruros: presencia de sales solubles recristalizadas, las cuales causan corrosión acelerada del acero de refuerzo, el concreto es susceptible a la contaminación por cloruros por la exposición a cloruros, a sales de deshielo, agua de mar y ambientes marinos. Los cloruros penetran el concreto y causan la corrosión del acero de refuerzo, lo cual provoca otras deficiencias como agrietamiento, delaminación y descascaramiento del elemento.
- Ciclos de hielo y deshielo: este es conocido como el proceso de congelación de agua en pequeñas aberturas, cavidades y poros de la pasta de cemento y agregados.
- Eflorescencia: se presenta por los residuos de sales con textura polvosa de color blanco tiza que se forma en la superficie del concreto. Este fenómeno ocurre cuando la humedad disuelve las sales de calcio en el concreto y estas migran a la superficie, reaccionando con el dióxido de carbono en el aire formando carbonato de calcio. Esta puede ser grave o moderada.
- Nidos de piedra u hormigueros: son vacíos en el concreto causados porque el mortero no logra rellenar todos los espacios entre los agregados, defecto relacionado con el proceso constructivo, producto típicamente de una vibración inapropiada de la mezcla durante su colocación. Los nidos de piedra generan falta de recubrimiento y exposición del acero de refuerzo.
- Desprendimiento de fragmentos: es causada por concentraciones localizadas de esfuerzos en el concreto, se clasifica en tres categorías: pequeños (menos de 10 mm), medianos (entre 10 mm y 50 mm) y grandes (mayores a 50 mm).
- Desgaste: pérdida gradual del mortero superficial debido a la fricción generada por los vehículos al circular por la calzada, las losas de concreto y superficies de rodamiento son comúnmente expuestas al desgaste.
- Abrasión: desgaste o desprendimiento de concreto provocado por la acción del flujo de agua que arrastra partículas abrasivas como arena, grava o piedra, los bastiones y pilas de concreto comúnmente se ven expuestos a la abrasión.

- Daño por colisiones: el grado de daño por la colisión depende del vehículo que haya impactado, su velocidad al momento de la colisión y del tipo de elemento golpeado, las vigas de concreto son más susceptibles a daños por colisión que los bastiones.
- Daño por sobrecarga: ocurre cuando los elementos del puente se ven sobre esforzados, en algunos casos, cuando el sobrepeso de los vehículos es suficientemente grande, puede requerirse un análisis de carga del puente. El daño por sobrecarga puede provocar otras deficiencias como agrietamiento, delaminación y descascaramiento, y esto se da principalmente porque en la mayoría de los puentes no cuentan con una rotulación que indique cuál es la carga máxima permitida.
- Corrosión del acero de refuerzo: ocurre cuando este pierde su capa protectora debido a la exposición a cloruros, cuando esta inicia puede viajar a lo largo del refuerzo, incluso si este se encuentra completamente recubierto por concreto. La corrosión del acero de refuerzo puede provocar la ruptura de los torones de preesfuerzo por la severidad de la corrosión y la alta tensión de los elementos.
- Daño por fuego: al someterse al fuego puede evaporar y reducir la cantidad de agua en el concreto, lo que reduce la adherencia de la pasta de cemento y por ende reduce la resistencia del concreto. También, pueden ocurrir desprendimientos de concreto por la expansión del acero en el interior del elemento.
- Pérdida de preesfuerzo: ocurre por la relajación del acero de preesfuerzo, pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, retracción o flujo plástico, lo cual es una respuesta natural del material que consiste en la pérdida de tensión a través del tiempo. La magnitud de la relajación depende del tipo de acero, de la tensión inicial, del tiempo transcurrido desde el tensado y de la temperatura. Este tiene un efecto bastante negativo sobre los elementos de concreto preesforzado, pues estos no están diseñados para resistir las cargas impuestas sin la compresión

inducida por el preesfuerzo. La principal señal de esta deficiencia son las deflexiones excesivas en elementos de carga principales.

- Reactividad álcali-sílice: este es de naturaleza expansiva y provoca el hinchamiento y expansión de los elementos de concreto, no presenta señales para la detección temprana, por lo que se requieren pruebas de laboratorio para confirmar su presencia. No existe tratamiento conocido para esta deficiencia. Los hidróxidos alcalinos (NaOH, KOH) presentes en el cemento reaccionan con los minerales silicios en el agregado, formando un gel que tiene gran afinidad con el agua y, consecuentemente, una tendencia a incrementar su volumen. El gel expandido ejerce una presión interna que es suficiente para fracturar el concreto, la naturaleza expansiva de esta reacción química crea esfuerzos internos en el elemento que resultan en grietas de forma cuarteada y desprendimientos de concreto.

Deflexión de Puentes

La deflexión o el pandeo se refiere al fenómeno que experimenta una estructura, en este caso, un puente, cuando está sometida a cargas, lo cual es conocido como el desplazamiento perpendicular al eje en que se ejerce la compresión.

Para el análisis estructural de puentes utilizando *software* como CSI Bridge, las combinaciones de carga se generan para evaluar diferentes condiciones, siguiendo normativas como el Manual de Puentes de Costa Rica (CSCR2010) y el AASHTO Manual for Bridge Evaluation (MBE).

Estas combinaciones consideran acciones permanentes, transitorias y extremas en condiciones de servicio y diseño.

Consideración de Cargas

El proceso de definición de las cargas que actúan sobre el puente confiere la necesidad de combinarlas de forma que se anticipe alguna afectación sobre el puente, y se considere la magnitud de estas tanto para diseño del puente como para análisis estructural.

Algunas cargas actúan combinadas, de forma que se considere adecuadamente su función dentro elemento por analizar o modelar.

Según la Norma Internacional AASHTO LRFD, según corresponda, se establecen las siguientes variables para la asignación y combinación de cargas:

A) Estado de carga para resistencia (*Strength Load Combinations*)

1.Carga Muerta + Carga Viva: $1.25 CM + 1.5 CMA + 1.75(CVV + IM)$

CM: CARGA MUERTA

CMA: CARGA MUERTA ADICIONAL

CVV: CARGA VIVA O TEMPORAL VEHICULAR

IM: IMPACTO DINAMICO (Vibraciones y cargas dinámicas por tránsito vehicular)

2.Carga Muerta + Sismo (*Seismic Load Combination*):

$1.0(CM + CMA + E)$

E = Efecto sísmico.

3.Carga Muerta + Carga Viva + Viento:

$1.25CM + 1.50CMA + 1.40W + 1.75 + CVV$

W: CARGA DE VIENTO

B) Estado de carga para servicio (*Service Load Combinations*)

1. Carga de servicio sin impacto: $1.0 CM + 1.0 DW + 1.0 CVV$

2. Carga de servicios con impacto y efectos sísmicos: $1.0 (CM + DW + CVV + E)$

Análisis de Carga Sísmica (CSCR 2010)

Según el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR, 2010), Costa Rica se divide en tres zonas sísmicas, e inmediatamente se definen en dicha normativa los tipos de suelo y asociados a los sitios de cimentación dados con base en las propiedades de los 30 m superficiales de suelo del sitio, y en la descripción siguiente:

i) Sitio tipo S1 Un perfil de roca o suelo rígido o denso con propiedades semejantes a la roca.

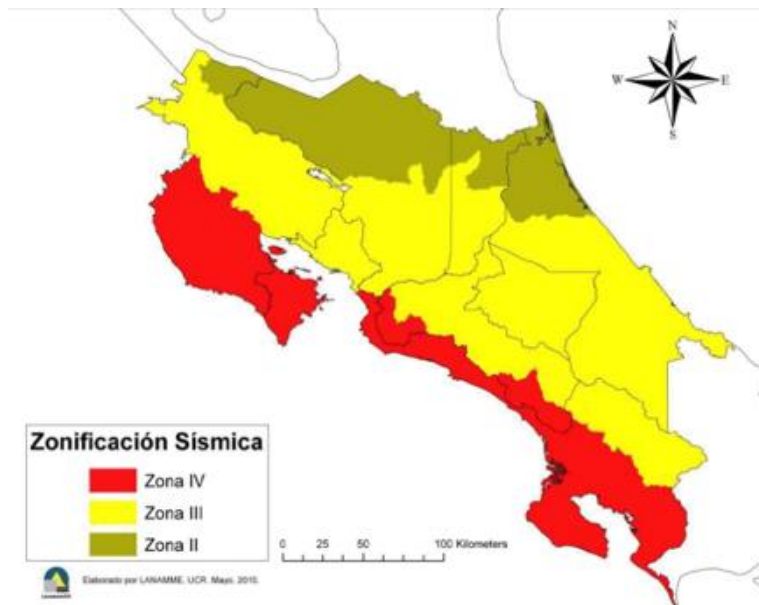
ii) Sitio tipo S2 Un perfil de suelo con condiciones predominantes de medianamente denso a denso o de medianamente rígido a rígido.

iii) Sitio tipo S3 Un perfil de suelo con 6 a 12 m de arcilla de consistencia de suave a medianamente rígida o con más de 6 m de suelos no cohesivos de poca o media densidad.

iv) Sitio tipo S4 Un perfil de suelo que contenga un estrato de más de 12 m de arcilla suave.

Según el CSCR2010, deberá definirse el tipo de suelo donde se construirá el puente o donde se plantea modelar el proyecto del puente, para definir el espectro de respuesta.

Imagen 12. Zonificación Sísmica



Fuente: LANAMME UCR, 2016.

Como reseña importante en la evaluación del puente seleccionado, se toma como referencia el apartado 3.1, inciso b del documento “Lineamientos para el diseño sísmo resistente de puentes”, donde describe literalmente:

En puentes esenciales y ante sismos con un período de retorno de aproximadamente 1000 años ($I=1.0$ según tabla 3.1), se protege la vida y se permite una segura evacuación de quienes circulan o están a punto de circular por el puente en el momento del sismo. Adicionalmente, y ante sismos con un período de retorno de aproximadamente 500 años ($I = 0.80$ según tabla 3.1), el puente debe permitir su uso inmediato para vehículos de emergencia y de seguridad y permitir todo tipo de tráfico en un período máximo de 7 días después del sismo, aunque podría requerir reparaciones mayores para adecuar su estructura, las cuales se harían sin interrumpir de manera total el tráfico de vehículos o personas. (p.12)

El cual también sugiere referirse a los manuales siguientes:

- a. AASHTO *LRFD Bridge Design Specifications*, Sixth Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2012.
- b. AASHTO *Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*, 2nd Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2011.

Tomado en consideración lo mencionado anteriormente de la zonificación sísmica del documento *Lineamientos para el diseño sísmo resistente de puentes*, se hace referencia a que, en la zona de Atenas, donde se ubica el puente sobre el río Concepción, se establece una amenaza sísmica de III.

La influencia del sitio de cimentación genera las modificaciones específicas para la demanda sísmica por utilizar, asumiendo condiciones de arenas densas y gravas, se usa un tipo de suelo S3, para establecer condiciones más críticas en la modelación. Forma espectral para sitios S1, S2 y S3 con efectos de falla cercana.

Según la tabla de coeficientes sísmicos espectrales C_a y C_v dados en la Tabla 2.4-1 y obtenidos de la guía AASHTO LRFD y otros, los cuales están basados en lo sugerido por Dobry et al. (2000), se define el periodo para el sitio III, incluyendo fallas geológicas cercanas a la ubicación del puente:

Tabla 1. Coeficientes sísmicos espectrales.

Coeficientes sísmicos espectrales	C_a			C_v		
	Zona de amenaza sísmica			Zona de amenaza sísmica		
	II	III	IV	II	III	IV
S_1	0.240	0.360	0.480	0.240	0.360	0.480
S_2	0.278	0.374	0.480	0.374	0.518	0.634
S_3	0.317	0.410	0.490	0.461	0.605	0.730
S_4	0.360	0.367	0.432	0.730	0.922	1.152

Fuente: Lineamientos para el diseño sísmo resistente de puentes, 2013.

Adicionalmente se procede a evaluar la afectación de fallas cercanas a la ubicación del puente, mediante lo cual se define que el puente se interseca entre sitios de falla geológica, situación que debe integrarse en la modelación específica del CSI BRIDGE. Esto de acuerdo con lo indicado en el documento Lineamientos para el diseño sísmo resistente de puentes (2013). Por lo que se utiliza el siguiente periodo de control en el espectro y se define la zona del puente en análisis:

TL: 1.0038161606105858 s.

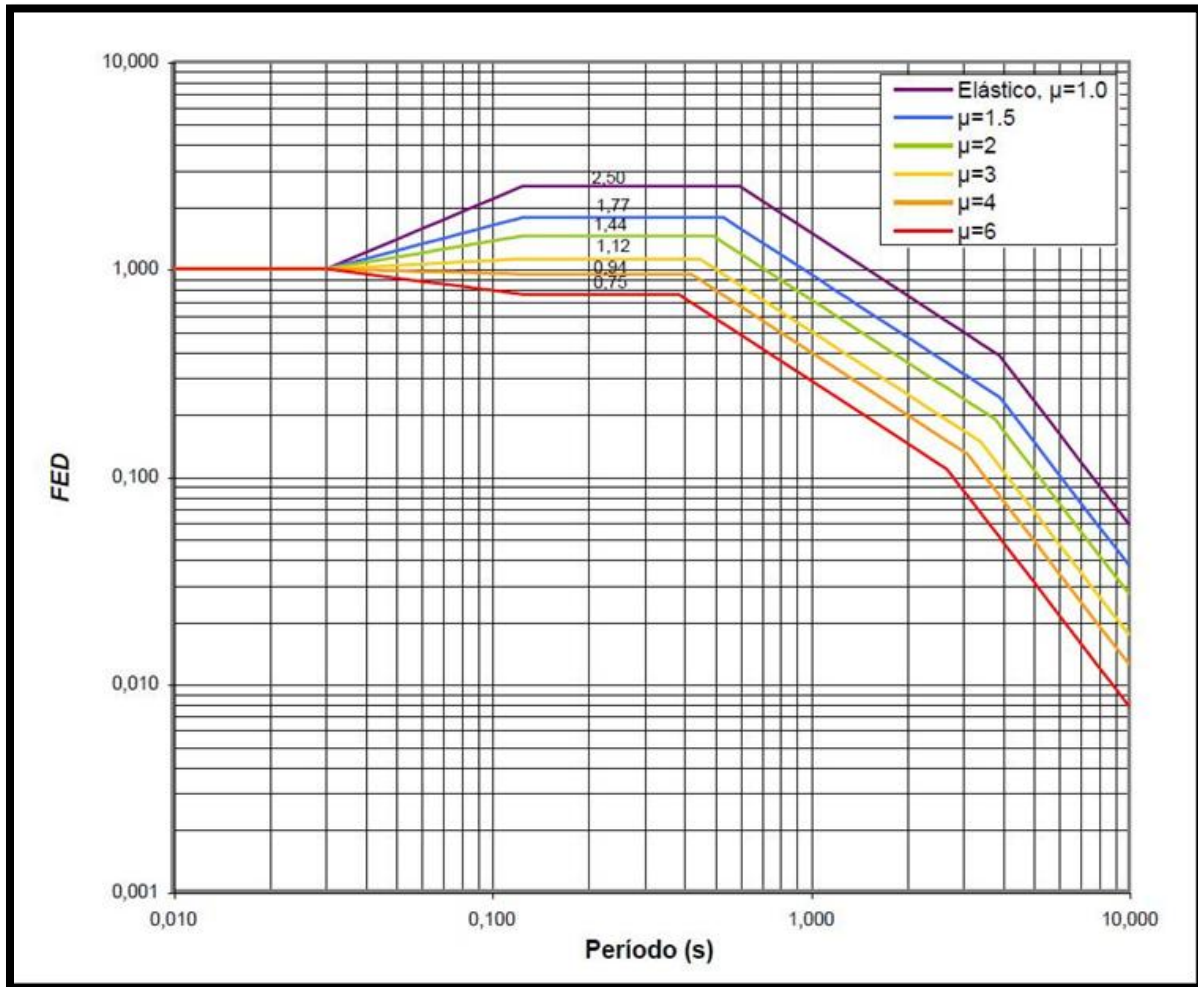
Tabla 2. Determinación de la zona sísmica para el Puente sobre el río Concepción.

ZONA	ZONA SISMICA	C_a	C_v
S3	III	0.410	0.605

Fuente: Elaboración propia, (2025)

En el siguiente croquis se detalla la ubicación del puente, el cual se encuentra rodeado de fallas geológicas, para las cuales se determinan los valores de periodo de control de espectro de los sitios cercanos a fallas, según se refiere en el párrafo anterior.

Imagen 14: Figura 5.7 Factor Espectral Dinámico del CSCR2010

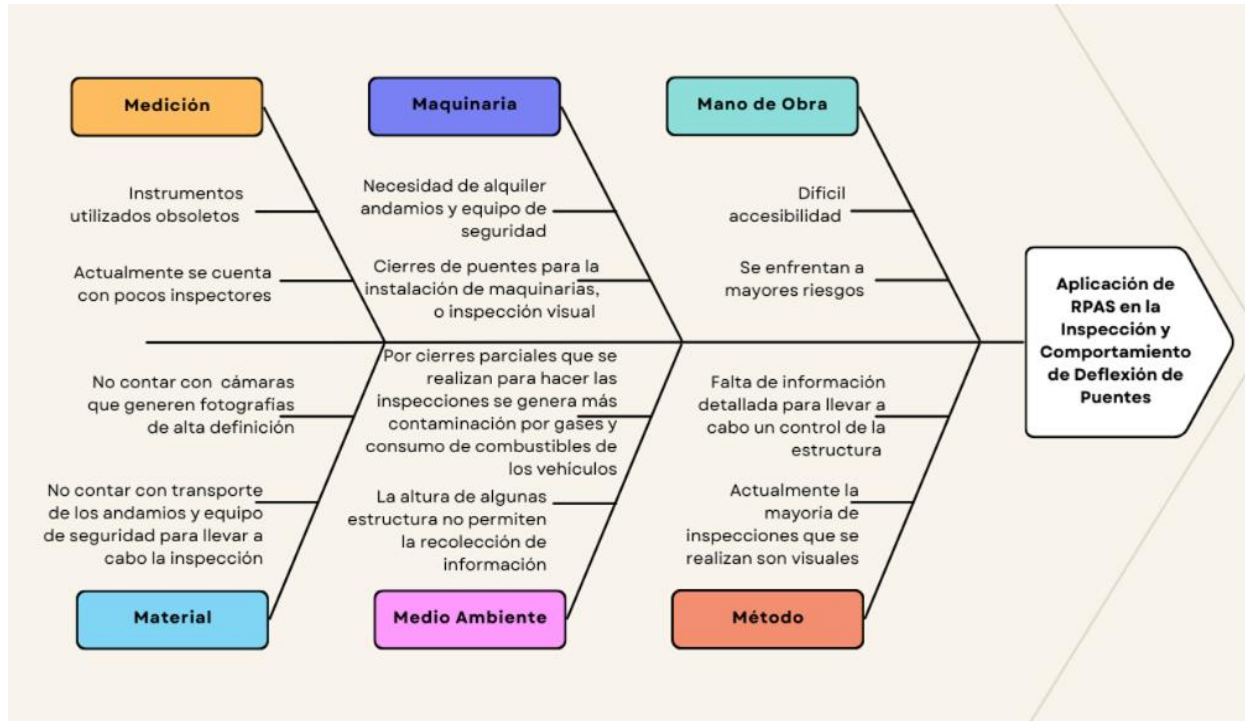


Fuente: Tabla del CSCR, 2010.

- Herramienta 1 - Diagrama ISIKAWA

Se realiza un diagrama de Ishikawa, para definir las principales causas y efectos que generan la manera como actualmente se realizan las inspecciones de puentes; para desarrollarla se toma en consideración las causas que esta tiene sobre el medio ambiente, mano de obra, materiales, métodos, maquinaria y medición. Este diagrama se muestra a continuación:

Imagen 15. Diagrama de Ishikawa

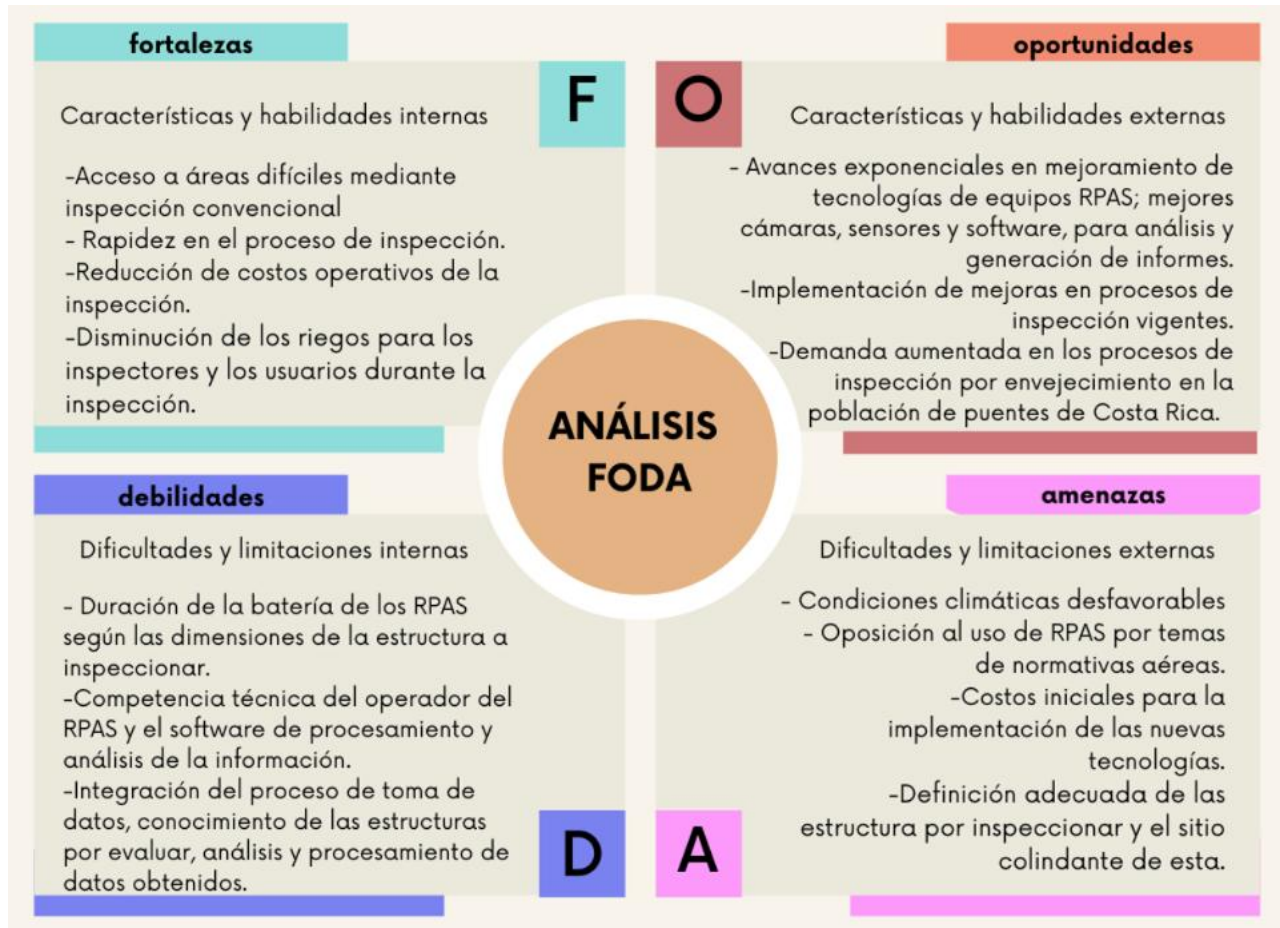


Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Herramienta 2 - FODA**

Se elabora una matriz de estrategias FODA, que tal como las siglas lo dicen se realiza para analizar las diferentes Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas, que al aplicar la implementación del uso de tecnologías se pueden obtener para la inspección de puentes. Como se muestra a continuación:

Imagen 16. Matriz de estrategias FODA.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

- Herramienta 3 - Análisis de interesados

En Costa Rica, el monitoreo de puentes y su deflexión mediante el uso de drones representa una innovación significativa para la gestión de la infraestructura pública. Este análisis aborda las ventajas y desventajas de esta tecnología desde la perspectiva de instituciones clave como el MOPT, CONAVI y las municipalidades.

A continuación, se describen algunas ventajas que ofrece esta metodología para inspección de puentes:

1. Eficiencia en las inspecciones

El uso de drones permite realizar inspecciones más rápidas y menos invasivas, optimizando el tiempo del personal técnico del MOPT y CONAVI. Esto puede traducirse en una reducción de interrupciones en el tráfico y mejoras en la planificación de trabajos de mantenimiento

2. Acceso a áreas difíciles

Pueden acceder a zonas de difícil alcance, como partes altas o estructuras en mal estado, sin poner en riesgo la seguridad de los inspectores.

3. Costos reducidos

A largo plazo, el uso de drones puede disminuir costos asociados a inspecciones manuales, desplazamiento de personal y vehículos.

4. Ahorro de recursos

Aunque la inversión inicial en tecnología de drones puede ser alta, a largo plazo, los costos operativos y de mantenimiento pueden disminuir al reducir la necesidad de equipos pesados y personal en el terreno.

5. Monitoreo continuo

La posibilidad de realizar monitoreos continuos y en tiempo real permite una gestión proactiva de los puentes, facilitando la identificación temprana de problemas estructurales y la toma de decisiones informadas.

6. Visualización y documentación

Los drones ofrecen la capacidad de generar imágenes y modelos 3D que pueden ser utilizados para documentar el estado de los puentes, mejorando la comunicación entre instituciones y con la ciudadanía.

Asimismo, y como parte de este análisis institucional, se describen algunas desventajas que ofrece esta metodología para inspección de puentes:

1. Limitaciones tecnológicas

Los drones tienen restricciones de carga y autonomía, lo que puede limitar la incorporación de equipos adicionales necesarios para mediciones precisas de deflexión.

2. Necesidad de capacitación

La falta de personal capacitado para operar drones y analizar los datos puede ser un obstáculo. Instituciones como el MOPT y el CONAVI necesitan invertir en formación específica.

3. Condiciones meteorológicas

El clima de Costa Rica, que incluye lluvias fuertes y variaciones en la visibilidad, puede afectar la operatividad de los drones, limitando su uso en ciertas épocas del año.

4. Regulaciones y normativas

La operación de drones está sujeta a regulaciones nacionales e internacionales. La falta de claridad en estas normativas puede complicar su implementación efectiva por parte de las municipalidades.

5. Preocupaciones de privacidad

En áreas urbanas, el uso de drones puede generar inquietudes sobre la privacidad de los ciudadanos, lo que requiere un manejo cuidadoso y transparente por parte de las instituciones.

De este análisis institucional se desprende que el monitoreo de puentes mediante drones ofrece ventajas significativas para el MOPT, CONAVI y las municipalidades de Costa Rica, incluyendo eficiencia, ahorro de costos y acceso a áreas de difícil acceso. Sin embargo, es crucial abordar las limitaciones tecnológicas, la capacitación del personal y las preocupaciones regulatorias y de privacidad para maximizar los beneficios, por esta

razón, es importante considerar una serie de recomendaciones, las cuales se describen a continuación:

1. Desarrollo de capacidades

Implementar programas de capacitación para el personal técnico en el uso de drones y análisis de datos.

2. Marco regulatorio

Colaborar con la autoridad reguladora de aviación civil para establecer normativas claras que faciliten el uso seguro y efectivo de drones.

3. Pruebas piloto

Realizar proyectos piloto en diferentes regiones para evaluar la efectividad de los drones en el monitoreo de puentes y ajustar las estrategias según los resultados.

4. Comunicación con la ciudadanía

Mantener una comunicación abierta con la población sobre los usos y beneficios de la tecnología de drones para fomentar la aceptación y reducir inquietudes.

El uso de drones para el monitoreo de puentes y su deflexión en Costa Rica representa una oportunidad valiosa para mejorar la gestión de la infraestructura pública. Para que instituciones como el MOPT, el CONAVI y las municipalidades aprovechen plenamente el potencial de los drones, es esencial implementar estrategias de capacitación, desarrollar un marco normativo claro y realizar pruebas piloto. De esta manera, no solo se podrán mejorar los procesos de monitoreo y mantenimiento de puentes, sino también fortalecer la confianza de la ciudadanía en el uso de tecnologías innovadoras en la infraestructura nacional.

- **Herramienta 4 - Mapeo de procesos técnicos**

El mapeo del proceso técnico para la recolección de datos de campo, específicamente de la infraestructura por evaluar, así como establecer el flujo de ejecución de la inspección

por realizar, siendo útil para comparar con la ejecución real que se desarrolle en este proyecto.

A continuación, se refiere el detalle del proceso según las especificaciones, por cada paso:

Tabla 3. Mapeo de procesos

Proceso o paso	Descripción del Procedimiento	Fuente de la Información	Productos de este proceso	Responsable	Equipo requerido / software
1- Análisis de la información documental existente del puente	Este proceso requiere un análisis de la información existente para el puente, como planos existentes, inventario de inspección del puente, otros estudios realizados al puente.	<ul style="list-style-type: none"> - MOPT - CONAVI - Municipalidades - Archivos electrónicos: dwg, nubes de puntos, modelos digitales 	Ubicación de elementos importantes a georreferenciar durante el proceso de levantamiento fotogramétrico mediante el equipo RPAS, a indicar en la ficha de inspección.	El responsable de este proceso es el ingeniero encargado de realizar el procesamiento y análisis de la información estructural de los elementos por evaluar.	Equipo de cómputo con la capacidad requerida para visualizar la información existente
2- Análisis de la ubicación del puentes	Este proceso consiste en realizar o verificar la ubicación del puentes, las zonas alejadas al puentes para ubicación del vehículo y los equipos de inspección (Drone, accesorios, otros), posibles afectaciones al puentes por cercanía de taludes, cuerpos de agua con criticidad entorno a crecidas o avenidas del río de referencia, verificación de cercanía o afectación directa por zonas de riesgo sísmico o deslizamientos.	<ul style="list-style-type: none"> - Hojas cartográficas. - Ortofotos. - SIRI (Sistema de Información de Registro Inmobiliario), SNIT (Sistema Nacional de Información Territorial) - Archivos electrónicos: dwg, nubes de puntos, modelos digitales. 	Ubicación de elementos importantes a georreferenciar durante el proceso de levantamiento fotogramétrico mediante el equipo RPAS.	El responsable de este proceso es el ingeniero encargado de realizar el procesamiento y análisis de la información estructural de los elementos por evaluar.	Equipo de cómputo con la capacidad requerida para visualizar la información existente.
3- Establecer el tipo de inspección por realizar	Este paso, define el tipo de inspección a realizar al puente: a- Inspección Estructural de: <ul style="list-style-type: none"> - Tablero - Superestructura - Apoyos - Cimentaciones b- Relleno de aproximación c- Posibles afectaciones por deslizamientos cercanos El tipo de inspección puede variar, de acuerdo a referencias importantes detectadas al momento de realizar el trabajo de campo.	<ul style="list-style-type: none"> - Fotografías aéreas - SNIT - SIRI - Base de Datos CNE (Comisión Nacional de Emergencias). 	Proyección de tipo de inspección en la ficha de inspección.	El ingeniero responsable del análisis y procesamiento de la información recolectada de la estructura o elementos aledaños al puente.	Equipo de cómputo. CIVILCAD, o un software homólogo, software para análisis de nubes de puntos.
4- Definición del área de trabajo propuesta	Este paso depende de las referencias obtenidas en los pasos 1 y 2. Consiste en determinar el área que abarca la estructura o el	<ul style="list-style-type: none"> - Ficha de inspección. - Referencias obtenidas en sitio: 	Actualización de la ficha de inspección	El ingeniero responsable del análisis y procesamiento de la información	Equipo de cómputo.

	puente más el área aledaña, y que permita realizar el procedimiento de procesamiento de la información obtenida mediante el equipo RPAS, y de forma consecuente el análisis estructural y de la información adicional respecto a la inspección realizada.	condiciones de boscosidad, condición climática, situación de permisología de vuelo (DGAC).		recolectada de la estructura o elementos aledaños al puente.	
5- Definición de los elementos por evaluar	Este paso define los elementos o partes de cada estructura evaluar específicamente al momento de ejecutar el vuelo fotogramétrico.	- Planos existentes del puente. - Ficha de inspección. - Referencias obtenidas en sitio.	Actualización de la ficha de inspección	El ingeniero responsable del análisis y procesamiento de la información recolectada de la estructura o elementos aledaños al puente.	Equipo de cómputo.
6- Coordinación del trabajo de campo	- Programación de ejecución de inspección mediante equipo RPAS - Evaluación de situación climática - Lista de verificación de equipos requeridos	- Revisión de lista de chequeo - Revisión de situación climática	Confirmación de ejecución de la inspección	Ingeniero responsable, y personal técnico de apoyo	
7- Documentación y archivo de la información.	Deberá documentarse y archivar la información obtenida mediante el equipo RPAS (imágenes del plan de vuelo, imágenes individuales)	Hardware o software de soporte	Nombre de la carpeta o sitio de respaldo	El ingeniero responsable del análisis y procesamiento de la información recolectada de la estructura o elementos aledaños al puente.	
8- Procesamiento de las imágenes y generación de nube de puntos	En este apartado se procesarán las imágenes definiendo en el software los requerimientos de ingreso y los productos de salida de la información para que se procese por el software utilizado.	N/A	Archivos: dxf, pdf, xls, las, nubes de puntos, mdt, ortomosaicos y otros.	Ingeniero responsable.	PIX4D DRONE 2MAP
9- Procesamiento de la información en CSI BRIDGE	Se trasladará la información obtenida del procesamiento de imágenes y nubes de puntos.	N/A	Tablas de datos, imagen de diseño		CSI BRIDGE
10- Análisis de la Información procesada CSI BRIDGE	Análisis de la información obtenida del software		Estimación de la deflexión del puente.		
11- Llenado de la Boleta o formulario de Inspección	Revisión de los datos obtenidos de la inspección, para llenar el formulario correspondiente		Tabla de Inspección con observaciones.		

Fuente: Elaboración propia, 2024.

- Herramienta 5 - Matriz de análisis de riesgos

También se desarrolla una matriz de riesgos, mediante la cual se identifican los principales riesgos que pueden afectar el desarrollo de esta investigación, y por ende

alterar los resultados esperados; por lo que se elabora la matriz para tomarlos en consideración, y evitarlos. A continuación, se muestra la matriz de riesgos:

Tabla 4. Matriz de análisis de riesgos

Riesgo	Descripción	Probabilidad	Impacto	Nivel de riesgo	Medidas de mitigación
Interferencia de señal	Pérdida de conexión con el control remoto.	Media	Alto	Alto	Utilizar frecuencias limpias. Hacer pruebas de señal en el área.
Condiciones climáticas adversas	Viento fuerte, lluvia o niebla que afecten el vuelo.	Alta	Alto	Muy Alto	Monitorear el clima. Evitar vuelos en condiciones adversas.
Obstáculos en el área	Estructuras, cables o árboles que puedan causar colisiones.	Media	Medio	Medio	Realizar un reconocimiento previo del área. Utilizar mapas de altura.
Falla técnica del dron	Mal funcionamiento de los componentes del dron.	Baja	Muy Alto	Alto	Realizar mantenimiento regular. Inspeccionar el dron antes de cada vuelo.
Riesgo de colisión con vehículos	Dron colisiona con vehículos que circulan por el puente	Media	Alto	Alto	Coordinar con autoridades. Establecer áreas de exclusión temporal.
Pérdida de control	Dificultad en controlar el dron debido a factores externos	Media	Alto	Alto	Practicar en simuladores. Tener un plan de recuperación.
Infracción de privacidad	Grabación de personas sin su consentimiento	Media	Medio	Medio	Informar a las autoridades. Cumplir con regulaciones de privacidad.
Daños a la infraestructura	Daños al puente o a la infraestructura circundante	Baja	Muy Alto	Alto	Mantener distancia segura. Realizar evaluaciones previas de la infraestructura.
Pérdida de batería	El dron se queda sin batería antes de regresar	Media	Alto	Alto	Monitorear el nivel de batería constantemente. Establecer límites de distancia.
Accidentes con el público	Lesiones a personas en la zona de vuelo	Baja	Muy Alto	Alto	Establecer una zona segura. Coordinar con seguridad local.
Incidentes legales	Violaciones de normativas de aviación o de privacidad	Baja	Alta	Medio	Conocer y seguir todas las regulaciones locales y nacionales. Contar con licencia de piloto de dron.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

- **Herramienta 6 - Equipos y accesorios para proceso de inspección en sitio**

Es de suma importancia, y posterior a la definición de la programación y estimación de la logística para la ejecución del trabajo de campo, verificar el estado de los equipos y accesorios por utilizar, así como la disponibilidad de estos para lograr la adecuada trazabilidad del trabajo programado y por ejecutar.

Así también es necesario realizar esta gestión para asegurar que cada equipo cumpla con los requisitos de seguridad y operatividad necesarios, minimizando el riesgo de fallas, accidentes o errores durante la inspección.

Tabla 5. Lista de chequeo

LISTA DE CHEQUEO O REVISION DE EQUIPOS Y ACCESORIOS REQUERIDOS						
Línea	Equipo o accesorios	Cantidad requerida	Estado del equipo	Visto bueno	No incluido	Observaciones
1	Drone (Equipo Rpas)	1	Indicar estado	Indicar disponibilidad del equipo	Indicar disponibilidad del equipo	Es necesario verificar que el equipo posea el software actualizado con la última versión dada por el proveedor.
2	Etiquetas / Spray de rotulación de elementos estructurales	De 5 a 10 und	Indicar estado	Indicar disponibilidad del equipo	Indicar disponibilidad del equipo	
3	Lamina de despegue	1	Indicar estado	Indicar disponibilidad del equipo	Indicar disponibilidad del equipo	
4	Conos de seguridad	1	Indicar estado	Indicar disponibilidad del equipo	Indicar disponibilidad del equipo	
5	Chaleco de Seguridad	1	Indicar estado	Indicar disponibilidad del equipo	Indicar disponibilidad del equipo	
6	Lentes de protección (solar/viento)	1	Indicar estado	Indicar disponibilidad del equipo	Indicar disponibilidad del equipo	
*** Estado del equipo: Bueno, regular, en caso de reportarse estado regular, no podrá utilizarse el equipo o accesorio, por lo que deberá sustituirse o remitirse a mantenimiento.						

Fuente: Elaboración propia, 2024.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación está basada en un enfoque mixto, ya que se desarrolla con una combinación del enfoque cualitativo y cuantitativo.

En cuanto al enfoque cualitativo, se dice que es el que cuenta con planteamientos más abiertos que van enfocándose, por ejemplo, en nuestro caso, el uso de RPAS, se enfoca en la inspección de puentes, lo que permite la recolección de datos como lo indica Hernández (2014); además, cumple con otra de las características como es que se conduce en ambientes naturales, y los significados se extraen de los datos, de acá se extraería la información para el cálculo de la deflexión, además, también cumple con la característica que no se fundamenta en la estadística, porque se aplican técnicas ingenieriles.

Y de acuerdo con el enfoque cuantitativo, se tiene que este mide fenómenos como en el caso de la deflexión de los puentes en análisis; este es de utilidad porque sirve para los planteamientos acotados, y precisiones en la obtención de los resultados o bien predicciones, esto en cuanto al estado de los elementos que presentan deterioros del puente en análisis.

3.2 MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

El método de investigación que se utilizará para realizar este estudio será la metodología DMAIC. Además, se tiene que es una investigación exploratoria y descriptiva.

DMAIC es un acrónimo de los pasos de la metodología: definir, medir, analizar, mejorar y controlar. Y se dice que es exploratoria porque se puede estudiar de manera efectiva el problema o el objeto de estudio, es decir, en contacto directo con la realidad, por lo que es más sencilla la recolección de información.

También se considera descriptivo ya que se detalla de manera clara el objeto de estudio, como lo es la aplicación de RPAS para la inspección de puentes, y cálculo de la deflexión.

A continuación, se detalla de qué manera ayuda la metodología de DMAIC para llevar a cabo el desarrollo de la investigación:

Imagen 17. Resumen de la metodología DMAIC



Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

Las fuentes de información son los recursos, documentos o personas de los cuales se extrae información y datos relevantes para una investigación. Pueden clasificarse de diversas maneras, pero comúnmente se dividen en:

3.3.1 Fuente de información primaria

Son los documentos o datos originales que no han sido interpretados o modificados por otros. Ejemplos: encuestas, entrevistas, datos estadísticos originales, investigaciones de campo, etc.

Entre la información primaria considerada para el desarrollo de esta investigación se encuentran: manuales de inspección de puentes, tomando como base los manuales utilizados actualmente por el LANAMME, el MOPT y el CONAVI, la toma de datos en campo, para debido procesamiento y el cálculo de la deflexión.

3.3.2 Fuente de información secundaria

Son análisis, interpretaciones o evaluaciones de la información contenida en las fuentes primarias. Ejemplos: artículos de revisión, libros, estudios previos realizados en otros países, inspecciones realizadas anteriormente, entre otros. Entre la información

secundaria que genera un gran aporte a este proyecto está el análisis y revisión bibliográfica de libros, tesis, conferencias o presentaciones e información de otros sitios web.

3.3.3 Fuente de información terciarias

Son compilaciones o resúmenes de información ya procesada y organizada. Ejemplos: enciclopedias, índices, bases de datos, entre otros. Estas fuentes de información son esenciales para el desarrollo de todo tipo de trabajo porque:

- Fundamentan el marco teórico, ya que brindan un respaldo conceptual y antecedentes necesarios para desarrollar el tema de investigación, proporcionando una base sólida sobre la cual construir el análisis.
- Aumentan la credibilidad y fiabilidad; porque al citar fuentes confiables y relevantes, se demuestra que el trabajo se apoya en información verificada y de calidad, lo cual refuerza su validez.
- Permiten el análisis comparativo, esto con respecto a fuentes de información diversas, se puede comparar y contrastar diferentes perspectivas, teorías o datos, lo que enriquece el análisis y le otorga mayor profundidad.
- Evitan el plagio, ya que se deben reconocer y citar correctamente las fuentes, además, asegura la originalidad del trabajo y evita el uso indebido de ideas o investigaciones de otros.

Por consiguiente, para obtener un proyecto desarrollado correctamente y con rigor académico, es fundamental seleccionar fuentes de información confiables, actuales y adecuadas al tema, lo cual no solo enriquece el contenido, sino que le da valor y respaldo científico al trabajo.

3.3.4 Sujetos de información

Las fuentes de información se definen a partir de los objetivos, tanto el general como los específicos, y para los cuales se requiere gestionar los procesos necesarios para el análisis del problema planteado, la aplicación de la o las soluciones del problema, y la concreción del producto esperado.

Es mediante este apartado que se definen las herramientas y el flujo correspondiente para proceder con las actividades y el uso de herramientas e instrumentación requeridas para obtener el producto específico que solucione el problema presentado.

Es de aquí que especifica de forma correspondiente para los objetivos específicos, del 1 al 4, las herramientas, los sujetos y/o fuentes de información, así como la instrumentación requerida.

Entre los sujetos o fuentes de información considerados principalmente para el desarrollo de este proyecto están:

- MOPT:

En Costa Rica, el mantenimiento y análisis de deflexión de puentes es crucial para el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) por varias razones clave, relacionadas tanto con la seguridad pública como con la sostenibilidad de la infraestructura vial:

1. Seguridad estructural y pública

- Evaluación de la capacidad de carga: El análisis de deflexión permite al MOPT entender cómo los puentes responden a las cargas del tráfico diario y condiciones ambientales. Al medir la flexibilidad y resistencia de los puentes, se puede anticipar si las estructuras pueden soportar las demandas actuales y futuras sin comprometer la seguridad.
- Prevención de fallos estructurales: Detectar desplazamientos o deformaciones inusuales ayuda a identificar puntos críticos donde la estructura podría estar debilitándose, previniendo así colapsos que podrían resultar en accidentes graves.
- Uso eficiente de recursos: Con un monitoreo adecuado de la deflexión, el MOPT puede priorizar las inversiones de mantenimiento y reparación en los puentes que lo necesiten con mayor urgencia, optimizando el presupuesto y los recursos disponibles.

2. Conservación de la infraestructura a largo plazo

- Aumento de la vida útil de los puentes: Al mantener los puentes en buenas condiciones estructurales, se prolonga su vida útil, lo cual es crucial en un país donde los recursos para la construcción de nuevas infraestructuras son limitados.
- Reducción de costos futuros: Mantener un seguimiento constante de la deflexión permite actuar antes de que las reparaciones se vuelvan complejas y costosas, evitando gastos mayores en el futuro.

3. Adaptación a las condiciones ambientales y sísmicas

- Costa Rica es un país de alta actividad sísmica y con variaciones climáticas que afectan las estructuras. El análisis de deflexión ayuda a evaluar cómo responden los puentes a estos factores, lo que permite al MOPT adaptarse a las condiciones locales y realizar refuerzos estructurales cuando sea necesario.

En conclusión, el mantenimiento y análisis de la deflexión de puentes permite al MOPT asegurar la seguridad de los usuarios, gestionar los recursos de manera efectiva y preservar la infraestructura en Costa Rica, adaptándola a sus características geográficas y climáticas.

- LANAMME

Para el LANAMME en Costa Rica, el mantenimiento y análisis de deflexión de puentes es esencial para garantizar la seguridad estructural, prolongar la vida útil de los puentes y optimizar recursos. Este análisis permite identificar deformaciones o fallos estructurales a tiempo, lo que ayuda a prevenir accidentes y planificar el mantenimiento de manera preventiva. Además, dado que Costa Rica es un país con alta actividad sísmica y variaciones climáticas, el monitoreo constante ayuda a adaptar los puentes a estas condiciones, asegurando su estabilidad y funcionalidad a largo plazo.

- Revistas internacionales

En revistas internacionales sobre ingeniería civil e infraestructura, se puede encontrar información sobre:

1. Métodos de análisis de deflexión: Estudios sobre técnicas avanzadas de medición, como el uso de sensores y tecnología láser.
2. Modelos estructurales y simulaciones: Investigaciones que presentan modelos predictivos y simulaciones de comportamiento ante cargas y vibraciones.
3. Materiales y diseño de puentes: Artículos sobre materiales innovadores y diseños que mejoran la resistencia y reducen la deflexión.
4. Estudios de casos y evaluaciones de campo: Ejemplos de monitoreo en distintos países que analizan la deflexión en condiciones reales.
5. Normativas y estándares internacionales: Comparación y aplicación de regulaciones que guían el mantenimiento de puentes y el análisis de deflexión en diversas regiones.

Este tipo de información es clave para implementar prácticas actualizadas y efectivas en el análisis de puentes.

- Normativa nacional e internacional

Antes de realizar un análisis de un puente, es altamente recomendable revisar la normativa nacional e internacional para asegurar que el estudio se ajuste a los estándares de seguridad, calidad y durabilidad establecidos. Las normativas nacionales integran factores específicos del contexto del país, como condiciones climáticas, sismicidad y el tipo de uso previsto, lo cual permite que el análisis sea relevante y adecuado a las particularidades locales. Además, las normativas internacionales incorporan métodos, tecnologías y criterios avanzados, desarrollados a partir de experiencias y estudios en distintos países, lo que permite enriquecer el análisis con mejores prácticas globales.

Ajustarse a estas normas no solo garantiza que el análisis cumpla con los requerimientos legales y técnicos, sino que también mejora la seguridad estructural del puente, reduciendo riesgos de fallos y accidentes. En última instancia, una revisión exhaustiva de las normativas antes de realizar el análisis promueve la construcción de puentes más seguros y con una vida útil prolongada, lo cual es clave para la protección de los usuarios y la optimización de los recursos de mantenimiento.

- Especificaciones técnicas de equipos RPAS y *software*

Los RPAS (Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente) y el *software* especializado están transformando el análisis de deflexión de puentes, aportando precisión, eficiencia y seguridad al proceso. Los RPAS, comúnmente conocidos como drones, permiten realizar inspecciones detalladas de los puentes de manera rápida y segura, incluso en zonas de difícil acceso. Con el uso de cámaras de alta resolución y sensores avanzados, estos dispositivos capturan datos visuales y de desplazamiento con gran exactitud, detectando posibles deformaciones y desplazamientos en las estructuras.

El *software*, por su parte, procesa estos datos mediante análisis avanzado y modelado 3D, lo que permite evaluar en tiempo real el comportamiento del puente bajo diferentes condiciones de carga. Al integrar algoritmos de inteligencia artificial y técnicas de procesamiento de imágenes, el *software* ayuda a identificar patrones de desgaste o deformación que pueden pasar desapercibidos a simple vista, facilitando la detección temprana de problemas estructurales.

En conjunto, los RPAS y el *software* especializado mejoran la precisión y la velocidad del análisis de deflexión, optimizando los recursos y aumentando la seguridad al reducir la necesidad de intervención directa en el puente. Esta tecnología permite a los ingenieros y técnicos realizar análisis más completos y efectivos, apoyando la toma de decisiones fundamentadas en datos objetivos y detallados. Esto no solo prolonga la vida útil de las estructuras, sino que también reduce el riesgo de fallos inesperados, contribuyendo a la seguridad vial y la sostenibilidad de la infraestructura.

- Capacitaciones en línea o enlaces de promoción de *software* y/o equipos

La capacitación en línea sobre *software* y equipo para el análisis de deflexión de puentes es vital para mantener a los profesionales al día con los avances tecnológicos y metodológicos en este campo. Este tipo de formación permite que ingenieros, técnicos y

operadores adquieran conocimientos actualizados sobre las herramientas más innovadoras, como los drones y sensores avanzados, así como el software de procesamiento de datos, modelado 3D y análisis estructural. Dado que el análisis de deflexión requiere precisión y habilidades específicas, las capacitaciones en línea brindan un espacio accesible y flexible para que los participantes se familiaricen con el uso adecuado de estas herramientas, sin la necesidad de desplazarse o interrumpir sus actividades laborales.

Además, las capacitaciones en línea pueden ser impartidas por expertos internacionales, lo que permite compartir mejores prácticas y enfoques avanzados que enriquecen la comprensión de los desafíos y soluciones en el análisis de deflexión. Esto es especialmente importante en un entorno de rápido desarrollo tecnológico, donde la falta de actualización puede llevar al uso ineficaz del equipo o al riesgo de realizar análisis inexactos, comprometiendo la seguridad y eficiencia de las estructuras. En última instancia, la capacitación en línea contribuye a fortalecer las competencias técnicas de los profesionales, mejorando la calidad de los análisis y promoviendo un uso más efectivo de los recursos tecnológicos disponibles en el análisis de puentes.

3.4 VARIABLES DE ANÁLISIS

El estudio de la deflexión de un puente es esencial para evaluar su estabilidad, seguridad y capacidad de carga, aspectos fundamentales para su correcto funcionamiento y la protección de sus usuarios. La deflexión, o desplazamiento vertical de una estructura cuando se somete a cargas, puede indicar problemas de diseño, materiales o deterioro con el tiempo, lo que requiere un análisis detallado para tomar decisiones informadas sobre su mantenimiento o refuerzo. Este análisis ayuda a detectar posibles fallos antes de que se conviertan en riesgos, extendiendo la vida útil del puente y optimizando los recursos de conservación.

Tabla 6. Variables de la investigación por objetivo específico

Objetivo específico	Referencia del Objetivo	Actividades del proceso	Herramientas por utilizar	Sujetos o fuentes de Información	Instrumentalización
Objetivo n.º 1	Definir mediante la tecnología de RPAS el proceso de recolección de información para demostrar la optimización de la inspección de puentes y la documentación específica.	<ul style="list-style-type: none"> · Valorar los equipos RPAS competentes para usarse en procesos de inspección y obtención de datos. · Valorar los <i>softwares</i> competentes para la ejecución de los procesos de inspección de puentes y generación de productos específicos. 	<ul style="list-style-type: none"> · Lectura e interpretación de fuentes bibliográficas: revistas ingenieriles internacionales y nacionales, videos de proveedores o expertos en el tema. · Modelación. · Simulaciones y análisis de información. · Criterio de expertos mediante la aplicación de encuestas en el tema. · Evaluación del impacto ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> · Ministerio de Obras Públicas y Transportes. · Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. · Revistas internacionales. · Normativa nacional e internacional. · Especificaciones técnicas de equipos RPAS y <i>software</i>. · Capacitaciones en línea o enlaces de promoción de <i>software</i> o equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> · Equipo(s) RPAS y sus accesorios. · <i>Software</i> de procesamiento de datos obtenidos, modelado 3D: Autodesk, autodesk Recap, cloudCompare, Geomagic, ANSYS_spaceClaim, DJI, AUTEL EXPLORER.
Objetivo n.º 2	Implementar procesos fotogramétricos para el análisis de la información obtenida de las inspecciones realizadas mediante RPAS.	<ul style="list-style-type: none"> · Definir el procedimiento técnico de recolección de datos de campo, almacenamiento, procesamiento, análisis y generación del producto final. 	<ul style="list-style-type: none"> · Lectura e interpretación de fuentes bibliográficas: revistas ingenieriles internacionales y nacionales, videos de proveedores o expertos en el tema. · Criterio de expertos en el tema obtenido mediante encuestas. · Análisis de flujo del proceso. · Evaluación del impacto ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> · Información de campo. · Información obtenida del equipo RPAS. · Especificaciones técnicas de equipos RPAS y <i>software</i>. · Documentación técnica normalizada utilizada para los procesos de inspección de puentes en Costa Rica. 	<ul style="list-style-type: none"> · Equipo(s) RPAS. · <i>Software</i> de procesamiento de datos obtenidos, modelado 3D: Autodesk, autodesk Recap, cloudCompare, Geomagic, 3DReshaper, ANSYS_spaceClaim, DJI, AUTEL EXPLORER. · Procedimiento de ejecución y diagrama de flujo del proceso técnico.

Objetivo n.º 3	Determinar la deflexión máxima del puente mediante la aplicación de <i>softwares</i> para demostración de la existencia de deformaciones.	·Definir el procedimiento técnico de recolección de datos de campo, almacenamiento, procesamiento, análisis y generación del producto final.	·Lectura e interpretación de fuentes bibliográficas: revistas ingenieriles internacionales y nacionales, videos de proveedores o expertos en el tema. · Modelación. · Simulaciones y análisis de información. · Análisis de flujo del proceso. · Evaluación del impacto ambiental.	· Información de campo. · Información obtenida del equipo RPAS. · Especificaciones técnicas de equipos RPAS y <i>software</i> . · Literatura y bibliografías ingenieriles. · Expertos en el tema.	· Equipo(s) RPAS. · <i>Software</i> de procesamiento de datos obtenidos, modelado 3D: Autodesk, autodesk Recap, cloudCompare, Geomagic, ANSYS_spaceClaim, DJI, AUTEL EXPLORER. · Procedimiento de ejecución y diagrama de flujo del proceso técnico.
Objetivo n.º 4	Facilitar los registros requeridos para una futura normalización del proceso de inspección de puentes mediante el uso de RPAS.	· Analizar la información de entrada del proceso, y sus generalidades, así como la información de salida, que deberán documentarse en el registro correspondiente.	· Lectura e interpretación de fuentes bibliográficas: normativa nacional utilizada, existente y oficializada. · Modelación. · Procesamiento de datos. · Análisis de información. · Análisis de flujo del proceso.	· Información de campo. · Información obtenida del equipo RPAS. · Flujo del proceso de realización de las inspecciones y metodología para determinar la deflexión de puentes. · Formularios normalizados de entes competentes.	· Equipo(s) RPAS. · <i>Software</i> de procesamiento de datos obtenidos, modelado 3D. · Procedimiento de ejecución y diagrama de flujo del proceso técnico. · Formato específico para creación documental del producto por generar.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.5 INSTRUMENTOS

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto es necesario e indispensable utilizar los siguientes instrumentos, esto para efectuar lo definido en cada uno de los objetivos específicos:

1. Lectura e interpretación de fuentes bibliográficas: a partir de diferentes fuentes información, que contengan referencias veraces de la situación actual en torno a la problemática identificada en la gestión integral de puentes (mantenimiento preventivo, correctivo, problemas estructurales, entre otros), así como revisión de propuestas de desarrollo en la atención o inspección de puentes a nivel nacional e internacional, en este apartado también se ubican la revisión de normativa nacional e internacional que regule o promueva la ejecución de inspección y revisión de estructuras varias y de forma específica los puentes, lo cual es el enfoque de este proyecto.

Como punto importante en esta evaluación o revisión de la infraestructura, se definen metodologías o procedimientos mediante los cuales se logra obtener resultados importantes en la gestión de inspección de puentes, a nivel internacional y nacional, siendo esta herramienta un insumo clave, para el inicio de las investigaciones, y establecer una propuesta que posea fundamentos y experiencias en algunos casos materializadas, que fortalecen la esencia de este proyecto.

2. FODA y Diagrama de Ishikawa: estas herramientas, son de gran utilidad y diversidad de usos para el proyecto, mediante las cuales se reúnen las ideas por cada uno de los procesos de la gestión del proyecto, según la agrupación dada.

Para el presente proyecto se definen las presentes herramientas, en tres líneas:

- a- Establecimiento del problema
- b- Justificación
- c- Uso de antecedentes

Siendo que las definiciones de los apartados a, b, y c (párrafo anterior) de conformidad con el FODA y el Diagrama de Ishikawa propuesto, refiere la variedad de temas por utilizar, y además brindar una prioridad de estos e inclusión de una descripción.

En lo referente a la gestión del presente proyecto, es importante definir los parámetros de la problemática específica, el alcance, las proyecciones y el parámetro de soluciones al problema presentado, por tanto, el insumo es necesario y crítico.

3. Simulaciones y análisis de información: definir variables de análisis en el estudio de la deflexión de un puente es un proceso crucial ya que combina simulaciones y análisis de información, que permiten obtener una comprensión profunda del comportamiento estructural de la obra. Las simulaciones son fundamentales para crear modelos virtuales del puente, replicando su diseño, materiales y condiciones operativas. A través de *softwares* especializados, se pueden simular diferentes escenarios, como cargas vehiculares variadas, condiciones climáticas extremas o eventos sísmicos.

Este enfoque permite anticipar cómo reaccionará la estructura ante diversas situaciones, identificando posibles puntos de falla antes de que ocurran en la realidad. Además, las simulaciones facilitan la evaluación del impacto de cambios en el diseño o en los materiales, ayudando a optimizar la estructura para que responda adecuadamente a las exigencias esperadas.

Por otro lado, el análisis de información complementa estas simulaciones al proporcionar datos empíricos y teóricos que fundamentan las decisiones de diseño y mantenimiento. Este análisis puede incluir la revisión de datos históricos del rendimiento de la estructura y de puentes similares, ofreciendo un contexto valioso sobre cómo han reaccionado bajo condiciones específicas en el pasado. Además, el estudio de investigaciones previas en el ámbito de la ingeniería civil permite integrar mejores prácticas y descubrimientos recientes, enriqueciendo la comprensión del fenómeno de la deflexión.

La combinación de simulaciones y análisis de información genera un ciclo de retroalimentación que mejora la precisión y la relevancia del estudio de deflexión. Al

comparar los resultados de las simulaciones con datos reales obtenidos de mediciones o monitoreo en tiempo real, los ingenieros pueden ajustar sus modelos y optimizar las variables de análisis. Este proceso permite identificar y comprender mejor los factores que influyen en la deflexión del puente, garantizando así una evaluación más precisa y fundamentada.

En definitiva, la integración de simulaciones y análisis de información es esencial para definir variables de análisis en el estudio de la deflexión de puentes. Esta sinergia no solo permite anticipar problemas y diseñar soluciones efectivas, sino que también asegura la seguridad y funcionalidad de las infraestructuras, contribuyendo a la preservación de la vida útil de las estructuras y la protección de los usuarios.

4. Criterio de expertos en el tema: definir variables de análisis en el estudio de la deflexión de un puente a menudo se basa en criterios de experto, un enfoque que aporta una valiosa perspectiva técnica y contextual al proceso de evaluación. Los expertos, que suelen incluir ingenieros estructurales, arquitectos y especialistas en materiales, poseen una vasta experiencia y conocimientos específicos que les permiten identificar los factores críticos que afectan el comportamiento de la estructura.

El proceso comienza con la consulta a estos profesionales, quienes aportan su conocimiento sobre las condiciones particulares del puente, como su diseño, ubicación geográfica, tipo de tráfico que soporta y características de los materiales utilizados. A partir de esta información, los expertos pueden sugerir variables que son relevantes para el análisis de deflexión, tales como las cargas aplicadas, la geometría del puente, las condiciones ambientales y las propiedades de los materiales. Su experiencia permite no solo seleccionar las variables más pertinentes, sino también establecer criterios de evaluación que reflejen las realidades prácticas y los riesgos asociados con la estructura.

Además, los criterios de experto son esenciales para establecer umbrales y parámetros que guíen el análisis. Por ejemplo, los ingenieros pueden definir límites de deflexión aceptables basados en normativas nacionales e internacionales, así como en estudios previos y casos de éxito. Esto no solo ayuda a asegurar la seguridad y funcionalidad del

puede, sino que también permite priorizar el monitoreo y mantenimiento de aquellas variables que, según su juicio, tienen un mayor impacto en la estabilidad de la estructura.

La incorporación de criterios de experto también fomenta la colaboración interdisciplinaria, donde diversas áreas del conocimiento se integran para abordar el análisis de manera holística. Por ejemplo, la participación de ingenieros civiles, geólogos y climatólogos puede proporcionar un enfoque más completo, considerando cómo factores geológicos y climáticos influyen en la deflexión del puente.

En resumen, el uso de criterios de experto en la definición de variables de análisis para el estudio de la deflexión de un puente es fundamental. Este enfoque no solo garantiza que se consideren los factores más relevantes y críticos, sino que también establece un marco sólido para evaluar y gestionar la seguridad de la infraestructura, contribuyendo a la toma de decisiones informadas y efectivas en el mantenimiento y diseño de puentes.

5. Evaluación del impacto ambiental: es un componente crucial en la definición de variables de análisis para el estudio de la deflexión de un puente, ya que permite comprender cómo las condiciones externas pueden influir en el comportamiento y la estabilidad de la estructura. Este proceso implica un examen detallado de los efectos que las actividades relacionadas con el puente, así como factores ambientales como el clima, la geología y la ecología circundante, pueden tener sobre su integridad y funcionalidad.

Al realizar una evaluación del impacto ambiental, se consideran diversos factores que podrían afectar la deflexión del puente. Por ejemplo, las condiciones climáticas, como la temperatura, la humedad y las precipitaciones, pueden influir en la expansión y contracción de los materiales, afectando directamente la respuesta de la estructura a las cargas. La evaluación también examina cómo la erosión del suelo, provocada por lluvias intensas o corrientes de agua, puede alterar la capacidad de soporte de los cimientos del puente, lo que podría resultar en un aumento de la deflexión.

Además, la evaluación del impacto ambiental implica considerar la interacción del puente con su entorno natural y humano. Esto incluye el estudio de cómo las actividades humanas, como la construcción cercana, el tráfico intenso o las obras de infraestructura, pueden influir en el comportamiento de la estructura. Por ejemplo, un aumento en el tráfico pesado puede incrementar la carga sobre el puente, lo que, combinado con condiciones ambientales adversas, podría resultar en deflexiones que superen los límites aceptables.

La integración de la evaluación del impacto ambiental en el análisis permite identificar y definir variables que pueden no ser evidentes a través de métodos técnicos convencionales. Al entender cómo los factores ambientales influyen en la deflexión, los ingenieros pueden establecer criterios más completos y realistas para el diseño, la construcción y el mantenimiento del puente.

En resumen, la evaluación del impacto ambiental es fundamental para definir variables de análisis en el estudio de la deflexión de puentes. Al considerar las interacciones entre la estructura y su entorno, se pueden anticipar problemas potenciales, optimizar el diseño y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de la infraestructura. Este enfoque no solo mejora la seguridad del puente, sino que también contribuye a la protección del medio ambiente y al bienestar de las comunidades circundantes.

6. Uso de datos estadísticos: la utilización de estos en la definición de variables de análisis para el estudio de la deflexión de un puente es fundamental, ya que permite fundamentar las decisiones en evidencias cuantificables y patrones observados a lo largo del tiempo. Estos datos, que pueden provenir de diversas fuentes como monitoreos previos, estudios de casos, investigaciones académicas y registros históricos, proporcionan una base sólida para comprender cómo se comportan las estructuras bajo diferentes condiciones.

Al analizar la deflexión de un puente, los ingenieros pueden recopilar datos estadísticos sobre las cargas que ha soportado a lo largo de su vida útil, la frecuencia del tráfico, las condiciones climáticas y otros factores que podrían influir en su comportamiento. Por ejemplo, al observar la deflexión de puentes similares en condiciones de carga

específicas, se pueden identificar tendencias y establecer límites aceptables de deflexión que sirvan como referencia para la evaluación de la estructura en cuestión.

El análisis estadístico también permite identificar correlaciones entre diferentes variables, como la relación entre las condiciones climáticas extremas y los niveles de deflexión. Esta información es invaluable para anticipar cómo un puente puede reaccionar a futuras condiciones adversas y para establecer modelos predictivos que ayuden en la planificación de mantenimientos o refuerzos necesarios. Además, los datos estadísticos pueden utilizarse para realizar análisis de regresión, que pueden ayudar a predecir la deflexión bajo diferentes escenarios de carga y condiciones ambientales.

Asimismo, el uso de datos estadísticos en la definición de variables de análisis promueve un enfoque más objetivo y riguroso. Al basar las decisiones en cifras y tendencias observadas, se minimiza el riesgo de sesgos subjetivos y se fomenta un análisis más claro y comprensible. Esto es especialmente importante en el ámbito de la ingeniería civil, donde la seguridad es una prioridad máxima.

En resumen, la integración de datos estadísticos en la definición de variables de análisis para el estudio de la deflexión de puentes es esencial. Este enfoque proporciona una base cuantitativa que permite comprender mejor el comportamiento estructural, identificar patrones y correlaciones y fundamentar decisiones informadas que garanticen la seguridad y la funcionalidad de la infraestructura. Al final, el uso de datos estadísticos contribuye a mejorar la efectividad de los análisis y la gestión de puentes, prolongando su vida útil y protegiendo a los usuarios.

7. Modelación: es una herramienta esencial en la definición de variables de análisis para el estudio de la deflexión de un puente, ya que permite simular y predecir el comportamiento estructural bajo diversas condiciones. A través de modelos computacionales, los ingenieros pueden replicar las características físicas y mecánicas del puente, así como las interacciones con las cargas aplicadas, las condiciones ambientales y otros factores críticos que afectan su desempeño.

Este proceso de modelación comienza con la creación de un modelo digital que incluye la geometría del puente, los materiales utilizados y las condiciones de apoyo. A partir de este modelo, se pueden realizar simulaciones que incorporen diferentes escenarios, como variaciones en el tráfico, condiciones climáticas extremas, o incluso eventos sísmicos. Este enfoque permite a los ingenieros observar cómo el puente reacciona ante cargas específicas y cómo se distribuye la deflexión a lo largo de la estructura, facilitando la identificación de puntos críticos que podrían comprometer su integridad.

La modelación no solo proporciona una representación visual y analítica del puente, sino que también permite la realización de análisis paramétricos. Esto significa que los ingenieros pueden ajustar distintas variables, como el tipo de material, el tamaño de las cargas o las condiciones de apoyo, para ver cómo estos cambios afectan la deflexión. Este tipo de análisis es crucial para optimizar el diseño y mejorar la seguridad del puente, ya que ayuda a determinar las configuraciones más efectivas para minimizar la deflexión y maximizar la resistencia.

Además, los modelos pueden ser alimentados con datos reales obtenidos a través de monitoreos y mediciones, permitiendo validar y calibrar las simulaciones. Esto asegura que los resultados del modelo sean representativos del comportamiento real del puente, aumentando la fiabilidad de las predicciones realizadas.

En resumen, la modelación juega un papel fundamental en la definición de variables de análisis para el estudio de la deflexión de puentes. Al proporcionar un marco para simular y analizar el comportamiento estructural, permite a los ingenieros anticipar problemas, optimizar diseños y tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y la gestión de la infraestructura. Esta metodología no solo mejora la comprensión del comportamiento del puente, sino que también contribuye a garantizar la seguridad y la funcionalidad de las estructuras a lo largo del tiempo.

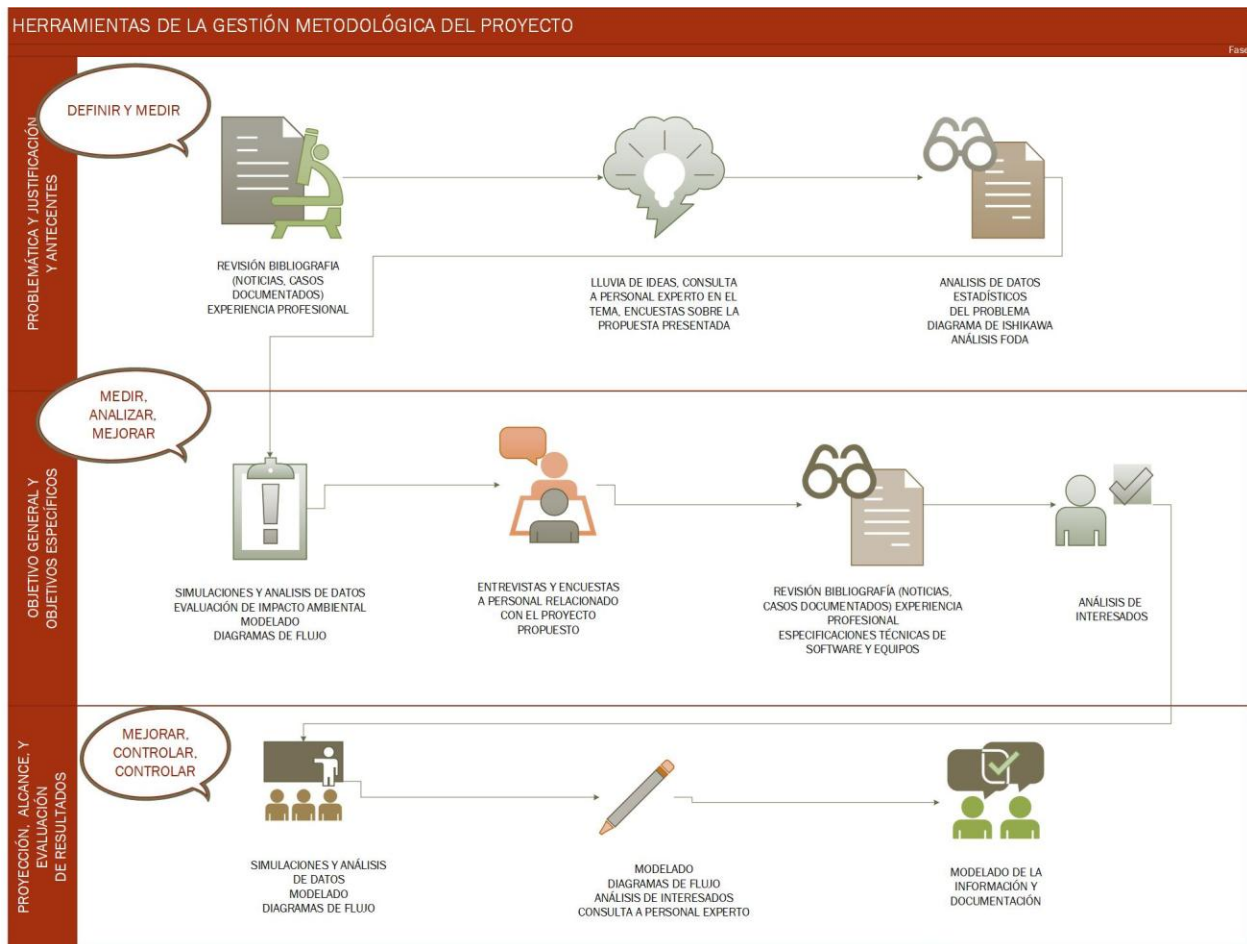
Análisis de flujo del proceso

El desarrollo metodológico del proyecto se especifica en brindar solución a un problema existente, mediante la generación de un propuesta técnico-administrativa, que permita

fortalecer, la gestión existe de organismos nacionales, y sea un aliciente en la forma de realizar procesos de inspección de puentes y evaluar sus condiciones estructurales, y de forma específica la deflexión de estos en Costa Rica.

Es así como se define de forma metodológica el uso de las herramientas o instrumentos en este apartado:

Imagen 18. Herramientas de la gestión metodológica de la investigación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.6 PROCESO PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

A partir de la utilización de drones en la recolección de información, y el uso de diferentes *softwares* en el modelado para el respectivo análisis, para la generación de la inspección de los puentes, además de la determinación de la deflexión ha venido revolucionando la

forma en que los ingenieros abordan la inspección y el monitoreo de estas estructuras. El siguiente proceso describe un enfoque sistemático que podría utilizarse para llevar a cabo este análisis de manera efectiva, integrando tecnología avanzada y técnicas de recopilación de datos.

1. Planificación de la inspección

El primer paso consiste en planificar la inspección del puente. En este caso como el proyecto considera el uso de drones, es necesario seleccionar adecuadamente el tipo de drones por utilizar, considerando factores como la capacidad de carga, la autonomía de vuelo y las características del área de inspección.

También se debe considerar los objetivos específicos del análisis que se desea realizar, de esta manera se podrán identificar puntos críticos, cómo se debe realizar el vuelo para obtener la información necesaria para el cálculo de deflexiones bajo diferentes condiciones de carga o el monitoreo de cambios a lo largo del tiempo, esto considerando que se realicen las inspecciones periódicas adecuadas.

No obstante, uno de los factores más importantes de considerar para la programación de los vuelos es el clima, por lo que se debe contemplar dentro de los estudios previos, para evitar fuertes vientos, lluvias, entre otros.

2. Recolección de datos iniciales

Antes de la inspección con drones, se recopilan datos preliminares sobre el puente, entre estos se deben considerar el tipo de puente, información sobre su diseño, materiales, historial de mantenimiento y condiciones ambientales. También es esencial establecer una referencia de medición, que puede incluir puntos de control geográficos (GCP) para garantizar la precisión en la ubicación de los datos recolectados, además de conocer el entorno de este para identificar posibles obstáculos a la hora de llevar a cabo los vuelos, y evitar de esta manera que falte información necesaria para la inspección por realizar.

3. Inspección con drones

Una vez planificada la inspección, se procede a realizar el vuelo con el dron sobre y en las cercanías del puente (área previamente delimitada). Equipado con cámaras de alta

resolución, sensores de imágenes térmicas o LiDAR, el dron puede capturar imágenes y datos detallados de la estructura, considerando la altura de los vuelos realizados, ángulos de las fotografías tomadas, entre otros. Es importante realizar vuelos en diferentes condiciones de carga, de ser posible, para observar cómo las deflexiones pueden variar con el tráfico vehicular o las condiciones climáticas.

4. Procesamiento de datos

Posterior a la visita de campo y de la recolección de datos, se procede al procesamiento de la información obtenida. Esto implica la utilización de *software* especializado para analizar las imágenes y los datos recopilados por el dron. Mediante técnicas de fotogrametría y modelado 3D, se pueden generar modelos precisos del puente que permiten visualizar la geometría y calcular las deflexiones en diferentes puntos de la estructura.

5. Análisis de deflexiones

A partir de los modelos generados, se realiza un análisis detallado de las deflexiones, con la ayuda de diferentes programas especializados mediante métodos matemáticos y físicos para calcular las deflexiones en puntos específicos, comparándolas con los límites aceptables establecidos por normativas nacionales e internacionales. Esta fase del análisis también puede incluir simulaciones que modelen la respuesta del puente bajo diferentes condiciones de carga y factores ambientales.

6. Validación y verificación

Es fundamental validar los resultados obtenidos mediante el uso de drones. Esto se puede hacer mediante la comparación de las mediciones de deflexión con datos históricos o con mediciones realizadas a través de métodos tradicionales de inspección. Si es posible, se pueden realizar pruebas de carga controladas para verificar la precisión de las predicciones obtenidas.

7. Elaboración de informes y recomendaciones

Finalmente, se elabora un informe que resume los hallazgos del análisis de deflexión. Este informe debe incluir gráficos, modelos 3D y análisis cuantitativos que expliquen el estado del puente y las deflexiones observadas. Además, se deben hacer

recomendaciones sobre acciones necesarias, como: mantenimiento, refuerzos estructurales o un monitoreo continuo, basado en la evaluación de los resultados.

8. Monitoreo continuo

Para asegurar el mantenimiento de la seguridad y funcionalidad del puente a largo plazo, se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo utilizando drones. Esto puede incluir vuelos regulares programados para detectar cambios en la deflexión y realizar inspecciones de seguimiento, lo que permite una gestión proactiva de la infraestructura. Además, se debe considerar implementar inspecciones en forma de monitoreo constante, y principalmente posterior a un sismo, una avenida máxima que afecte los bastiones o la integridad física del puente, así como después de cualquier fenómeno natural o antropológico.

En conclusión, este proceso para el análisis y determinación de deflexiones en puentes utilizando drones combina tecnología avanzada con un enfoque sistemático que mejora la precisión y eficiencia del proceso de inspección. Al integrar técnicas innovadoras con análisis detallados, los ingenieros pueden garantizar la seguridad y la sostenibilidad de las infraestructuras a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Descripción de los puentes por evaluar

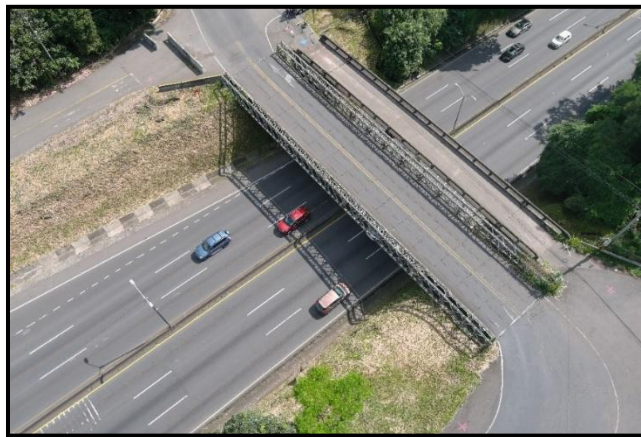
A continuación, se despliega información relevante de los puentes inspeccionados, así como del puente al cual se le realizó el cálculo de la deflexión.

Ejecución de la inspección de puentes mediante tecnología RPAS

Una vez realizado el levantamiento de la información de campo mediante el sistema RPAS, y el debido procesamiento de esta, se realiza la revisión del producto generado, el cual está conformado por la nube de punto, la cual permite generar una superficie de la estructura en análisis, en este caso el puente Castella.

A continuación, se despliegan algunas de las imágenes obtenidas mediante los vuelos realizados mediante el equipo o sistema RPAS, del puente Castella.

Imagen 19. Fotografía obtenida con el dron.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Esta inspección consiste básicamente en realizar una verificación visual de la situación y estado estructural de los elementos que conforman este puente.

Durante el levantamiento de la información, se debe prestar atención principalmente a los elementos del puente o este como un todo, lo que permite verificar y observar de una

forma segura y puntual los daños o posibles afectaciones de dicha estructura mediante las fotografías aéreas o un modelo 3D generado del elemento.

El método de toma de datos puede realizarse de manera manual o bien mediante un plan de vuelo.

Las siguientes son imágenes obtenidas del vuelo realizado de forma manual o seleccionadas mediante gestión documental previa y por especificación del ingeniero en campo que realice o asista al piloto en dicha gestión.

Imagen 20. Fotografía obtenida con el dron



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Entre las ventajas de la obtención de la información de la estructura mediante el uso de los sistemas RPAS se pueden indicar: se puede obtener información veraz de la situación de la estructura de forma visual y se pueden documentar mediante las fotografías aéreas.

Este tipo de inspección se realiza con el objetivo de identificar deficiencias típicas, y en algunos casos críticas de la estructura del puente en cuestión.

Dentro de las deficiencias típicas y críticas que comúnmente se pueden encontrar durante las inspecciones están:

- 1- Agrietamiento y desprendimiento del concreto.
- 2- Movimientos diferenciales o asentamientos.
- 3- Daños por colisión o golpes contra la estructura.
- 4- Problemas por socavación.
- 5- Problemas por corrosión.

Esta información se debe incluir y normalizarse en los **formularios de inspección**, de este proyecto, donde se clasifiquen y determinen los elementos estructurales del puente por evaluar.

Alcance de la inspección

El alcance y el producto esperado de la inspección realizada en campo dependerá, exclusivamente, de algunas variables que permitan obtener la información esperada en su totalidad.

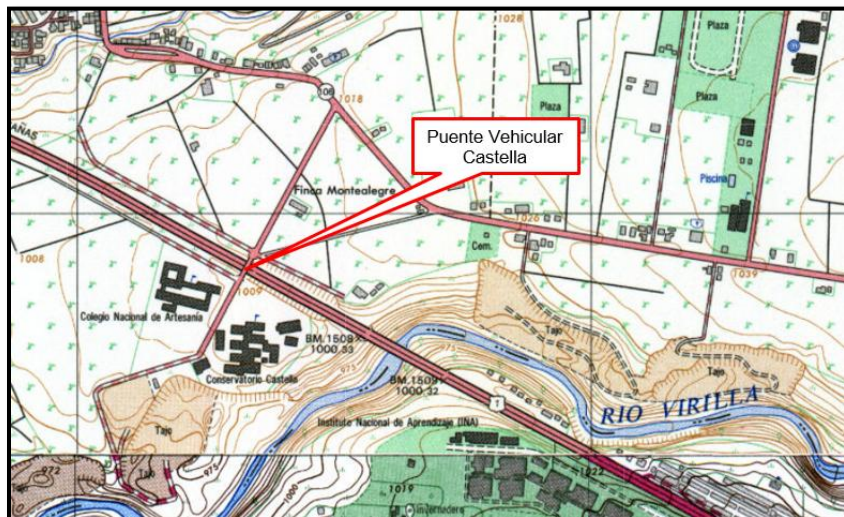
- **Acceso visual**, mediante el equipo RPAS, para el análisis de los elementos del puente: en este apartado se puede obtener mucha información independientemente de la altura y distancia permitida, la cual se puede definir en campo, con la facilidad del equipo RPAS se puede acceder (incluyendo la calidad de sistema de acercamiento de la cámara), asegurando una resolución adecuada para el proceso de análisis de la información obtenida.
- **Obstáculos** entre la estructura y el equipo RPAS: en algunas de las estructuras por analizar existe la posibilidad de la presencia de obstáculos que no permitan realizar la toma de las fotografías, de la estructura y la ejecución del plan de vuelo planeado.
- **Alturas mínimas de vuelo**: las alturas mínimas de vuelo se definen de conformidad con la normativa regulatoria para el uso de aeronaves no tripuladas RPAS.
- **Situación climática**: Este aspecto interfiere de manera significativa el proceso de levantamiento de la información de la estructura, ya sea mediante mecanismo manual o mediante plan de vuelo para el equipo RPAS.

Una vez realizados los procesos de planificación de la inspección tal y como se indicó anteriormente en la metodología, se lleva a cabo la recolección de datos iniciales y se procede a realizar la inspección con los drones.

Inspección del puente Castella

Este es un puente modular tipo Bailey, se ubica sobre la Ruta Nacional n.º1 de Autopista General Cañas en las cercanías el Colegio Conservatorio Castella, sobre la calle Castella, se ubica en el distrito de Ulloa, del cantón de Heredia, provincia de Heredia. Sus coordenadas en CRTM05 son: y: 484786.2; x: 1102279.9. A continuación se muestra la ubicación de puente:

Imagen 21. Ubicación del puente Castella



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Este puente tiene una longitud de 45 metros de largo y 9.87 metros de ancho y cuenta con dos carriles.

A continuación, se incluye la información de obtenida de la inspección realizada a la estructura y elementos específicos para el puente Castella, tal y como se muestra en las siguientes imágenes, donde se observa de manera general la estructura del puente en análisis.

Imagen 22. Fotografía A_ Puente Castella



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Modelado 3D

Producto del modelado 3D se generan varias imágenes mediante las cuales se puede verificar e inspeccionar la estructura de manera interactiva. Mediante este mecanismo, es posible realizar la observación desde varios ángulos, según el archivo generado. Este producto permite la ejecución de un análisis óptimo en cuanto a la verificación de deformaciones de la estructura de forma general, mediante la vista a puntos dados en coordenadas locales o georreferenciación con sistemas geográficos específicos.

Imagen 23. Fotografía B_ puente Castella



Fuente: Elaboración propia, 2024.

La Imagen 23 corresponde a la estructura general e inspeccionada, donde se puede verificar que existe un elemento de afectación del proceso de toma de datos, como lo es el puente anexo (costado este, en concreto e inhabilitado).

Dicho puente anexo no permite realizar la toma de datos al costado este del puente Castella, por lo que se debe establecer en sitio algún mecanismo adicional para el uso del equipo RPAS, y consiguientemente la tomada de datos en el sector no visible por el obstáculo.

El puente tipo modular temporal o Bailey, del Castella, en conformidad con la composición de este tipo de puentes, esta compuesto de:

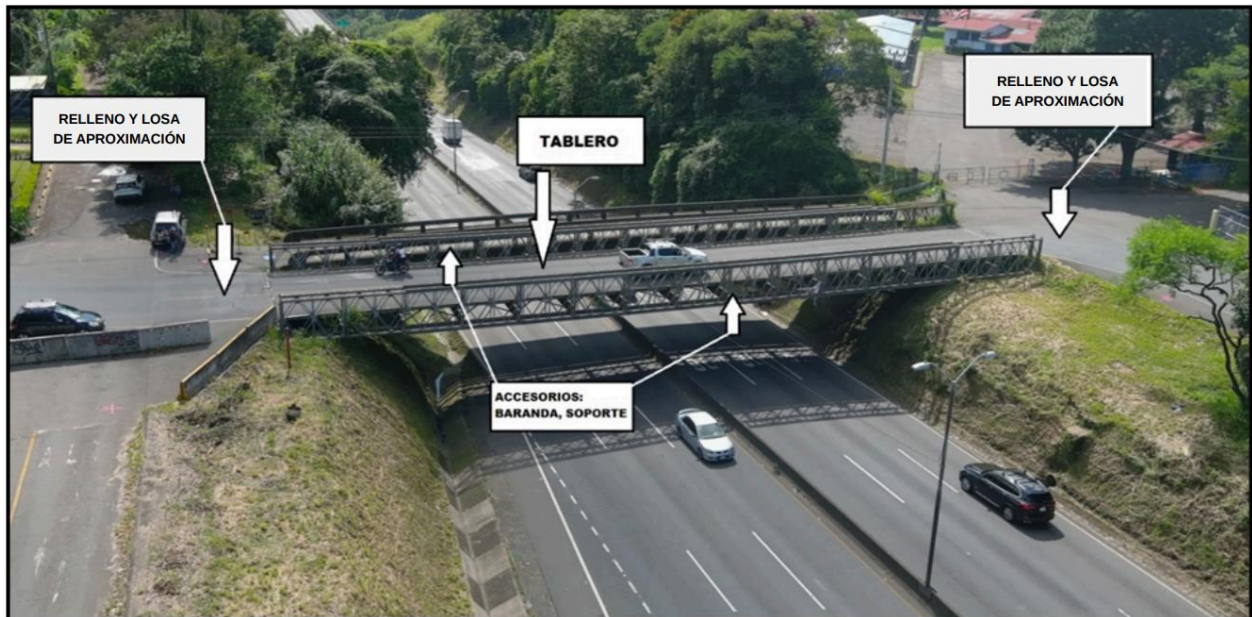
- **Paneles prefabricados:** De acero estructural de alta calidad y soldados.
- **Vigas:** Paneles compuestos livianos conectados por pasadores de acero.
- **Barandas:** Construidas con los pasadores grandes con forma de tornillo.
- **Unidades de terraza:** Se conectan con los paneles mediante pernos y pasadores, que forman el tablero del puente.

Inspección mediante ejecución del vuelo manual

El vuelo manual realizado para el puente modular del Castella arrojó datos interesantes de considerar, de acuerdo con la metodología planteada y los datos recolectados, tomando como insumo principal este proceso en conformidad con el planteamiento de este proyecto.

En las siguientes imágenes obtenidas mediante el uso del equipo RPAS, se identifica cada uno de los elementos del puente Castella.

Imagen 24. Fotografía C_ puente Castella



Fuente: Elaboración propia, 2024.

El paso que brinda este puente se considera uno de los principales accesos vehiculares hacia la provincia de Heredia, que brinda una opción ante la gran cantidad de vehículos que ingresan a Heredia, ya sea por el sector de la intersección o por el paso elevado de “Bridgestone”, el puente elevado del Real Cariari, y el sector de la Pozuelo en la Uruca. Esta situación hace considerar dicho puente como una estructura o insumo vial de gran importancia para la separación de vehículos que ingresen a dicha provincia, y de esta manera ayudar con la disminución de los colapsos viales actuales.

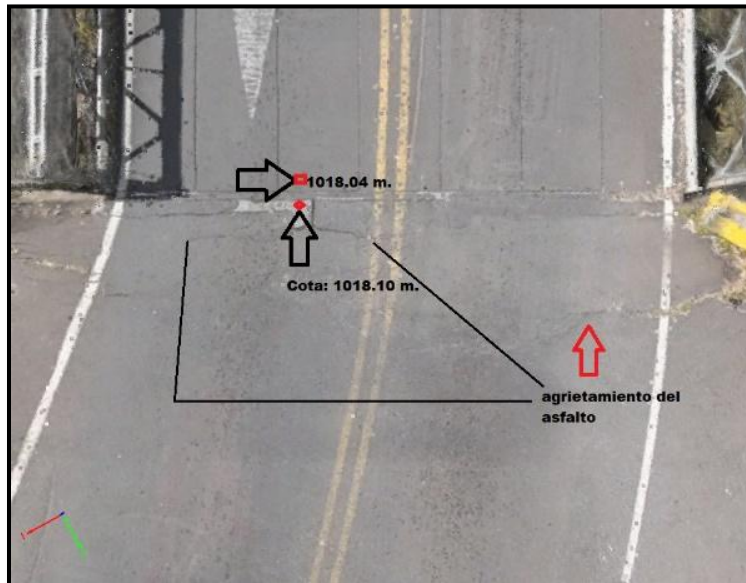
Evaluación mediante la inspección de los elementos del puente

Rellenos y losas de aproximación del puente

La evaluación de dicha estructura es relevante y esencial debido a que corresponde al elemento de paso entre la vía y el puente, y en este caso específico los rellenos y losa de aproximación son también la estructura de asentamiento del puente, el cual no posee ningún elemento de apoyo adicional para el puente, sino solamente este elemento en los costados este y oeste.

La siguiente imagen corresponde la inspección de la afectación dada entre el relleno de aproximación y el marco “muro”, construido para fungir como apoyo a la estructura principal del puente.

Imagen 25. Fotografía D_ puente Castella



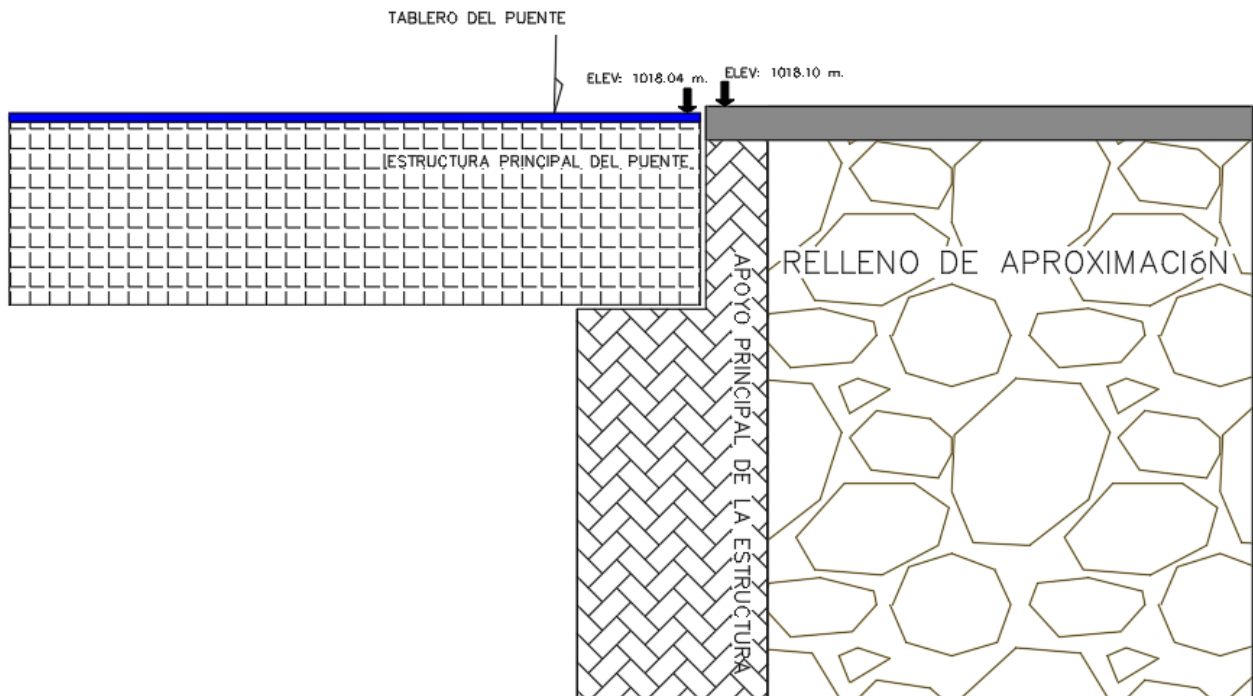
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Dicha imagen fue obtenida mediante el procesamiento realizado con el programa PIX4D, el cual se puede dimensionar, por medio de coordenadas en el sistema utilizado, para los puntos de interés. Es así como, se logra obtener cotas de referencia, la altura de dos elementos colindantes, como lo son:

- a- Un punto al costado este del tablero del puente, que refiere una cota de 1018.04 m de elevación.
- b- Un punto ubicado en la estructura de apoyo del puente, que refiere una cota de 1018.10 m.

Del hallazgo anterior se puede definir de forma preliminar, que existe un asentamiento de la estructura referida al tablero del puente, y respecto al relleno de aproximación o la estructura de apoyo del puente.

Imagen 26. Diagrama de deficiencia detectada, puente Castella




Fuente: Elaboración propia, 2024.



En la Tabla 7 se detalla el tipo de imagen obtenida a partir de la inspección realizada mediante el equipo RPAS, y donde se indican las deficiencias encontradas en dicha inspección.


Inspección del relleno y/o losa de aproximación (costado este y oeste) del puente

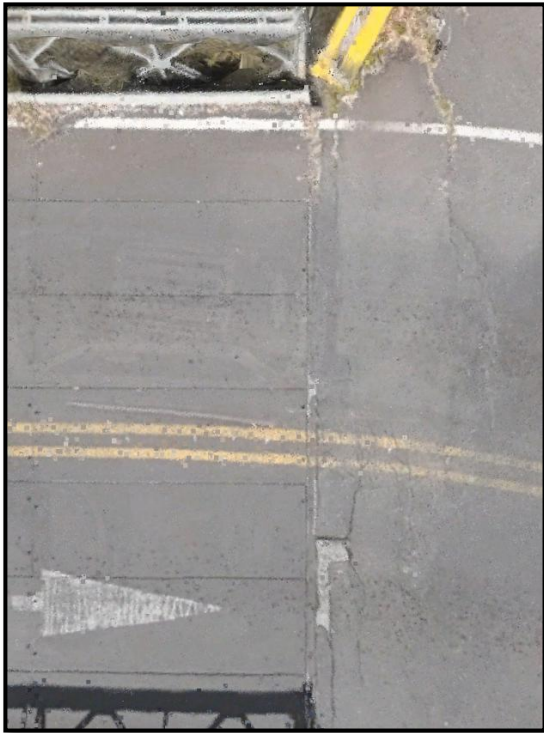
En la Tabla 7 se tiene la descripción del elemento evaluado, en conformidad con los hallazgos detectados, mediante el uso del insumo fotográfico o el insumo obtenido mediante el procesamiento de las imágenes, y el uso del *software* con el modelado 3D, además, se describe puntualmente el tipo de deficiencia y las observaciones relacionadas con lo encontrado en la inspección realizada.



Tabla 7. Inspección del relleno y/o losa de aproximación (costado este) del puente

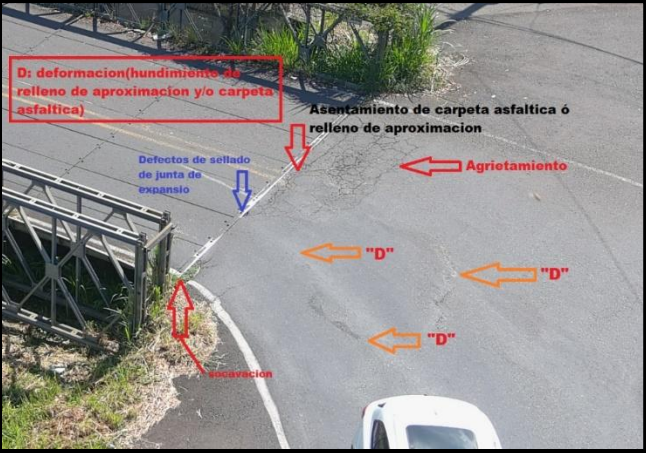

Fotografía / Imagen	Elemento evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
Fotografía n.º 1 	Relleno y losa de aproximación este	Fotografía aérea	Agrietamiento de la capa de rodamiento (asfalto).	Se sugiere realizar el procedimiento adecuado para mejorar la losa y evitar se presenten estos agrietamientos ya que esto puede afectar la estructura en cuanto a su resistencia.
Fotografía n.º 2	Relleno y losa de aproximación este	Fotografía aérea	Exposición de la estructura de soporte del puente (concreto) / Deformaciones o asentamiento de	Brindar el adecuado mantenimiento periódico en en las losas de aproximación para evitar las deformaciones que se observan en la

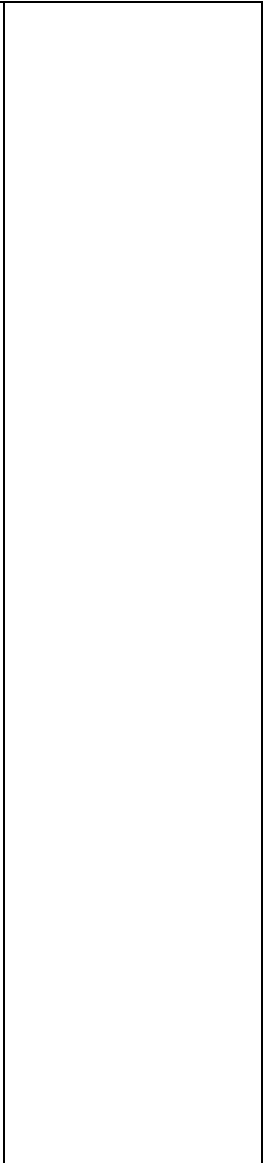
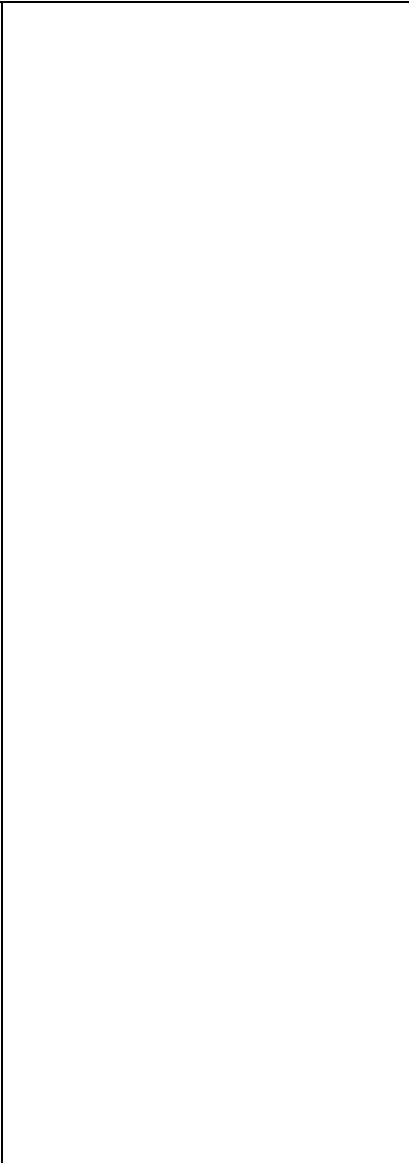
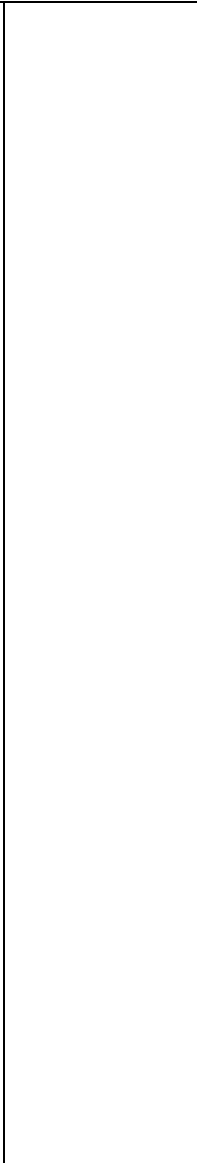
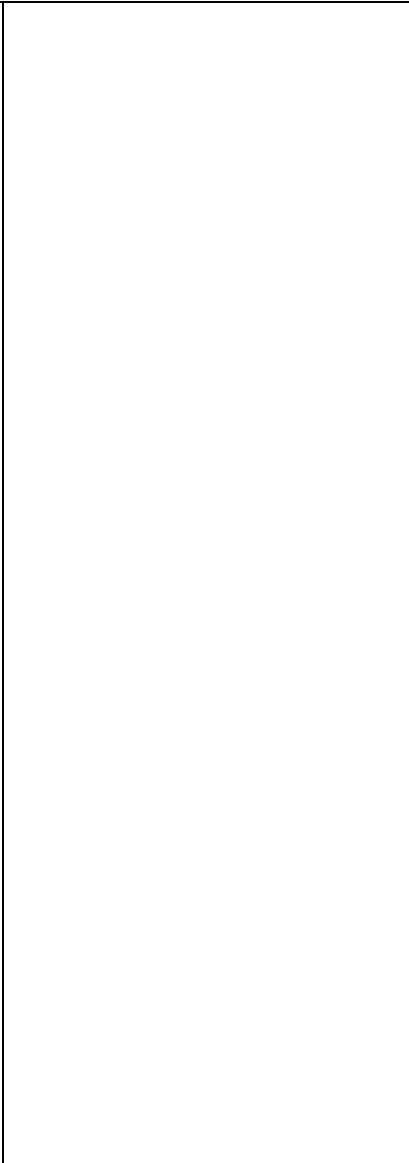
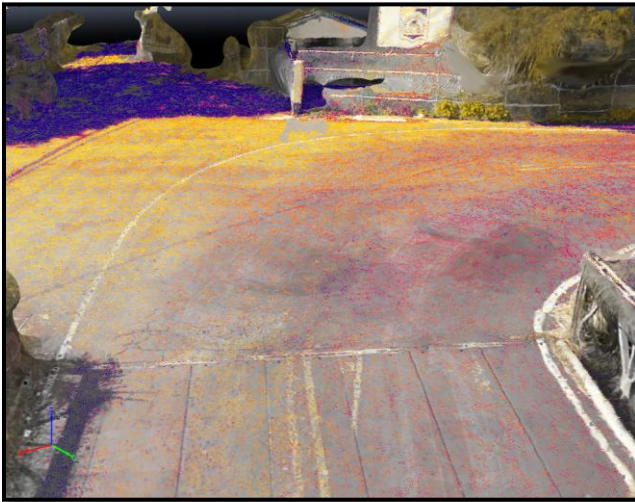
			<p>tablero o apoyo de la estructura.</p>	<p>fotografía, o bien se exponga la estructura ya que esto puede exponer a corrosión estas partes de la estructura, o bien generar la filtración de agua o sustancias de los vehículos que transitan sobre la estructura y se generen daños mayores.</p>
<p>Fotografía n.º 3</p> 	<p>Relleno y losa de aproximación este</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Se evidencian asentamientos de la estructura de roadamiento, y agrietamiento en la zona de aproximación al puente.</p>	<p>Realizar el adecuado mantenimiento, brindando los plazos adecuados para el curado de los materiales, y de esta manera evitar se presenten los daños de asentamientos, y ahuellamientos en la losa de aproximación.</p>
<p>Fotografía n.º 4</p>	<p>Relleno y losa de aproximación</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Se evidencia un ligero asentamiento de la estructura del</p>	<p>Se sugiere incluir procesos de limpieza del área del relleno debajo del puente,</p>

	<p>este / Barandas del puente</p>		<p>puente (barandas) en el relleno de aproximación.</p>	<p>para proceder con una mejor inspección periódica del puente.</p>
<p>Imágenes n.^{os} 5 y 6</p>		<p>Imagen del modelado en 3D</p>	<p>Se evidencian asentamientos de la estructura de roadamiento, y agrietamiento en la zona de aproximación al puente.</p>	<p>Se verifican diferencias de altura, de 4 cm a 8 cm, entre el relleno de aproximación y el tablero del puente.</p>



Fotografía / Imagen	Elemento Evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
<p>Fotografía n.º 7</p> 	<p>Relleno y losa de aproximación oeste</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Deformación del relleno de aproximación o carpeta asfáltica.</p>	<p>Realizar el adecuado proceso para el mantenimiento periódico o mejoras que se deban aplicar en la losa de aproximación.</p>
<p>Fotografía n.º 8</p> 	<p>Relleno o losa de aproximación oeste</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Problemas de sellado de la junta de expansión.</p>	<p>Realizar el adecuado mantenimiento, brindando los plazos adecuados para el curado de los materiales, y de esta manera evitar se presenten los daños de asentamientos, y ahuellamientos</p>

<p>Fotografía n.º 9</p> 	<p>Relleno o losa de aproximación este / Barandas del puente</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agrietamiento del asfalto. 2. Socavación del relleno de aproximación. 3. Defectos de sellado de junta de expansión. 4. Asentamiento de relleno de aproximación. 	<p>en la losa de aproximación.</p> <p>Se sugiere incluir procesos de limpieza del área del relleno debajo del puente, para proceder con una mejor inspección periódica del puente.</p>
<p>Imagen n.º 10, 11 y 12</p> 	<p>Relleno de aproximación</p>	<p>Imagen del Modelado 3D</p>	<p>Deformación del asfalto, y asentamientos del relleno de aproximación.</p>	<p>Se puede obtener coordenadas en puntos seleccionados del sector requerido para evaluar diferencias de altura.</p>



Tablero del Puente y Accesorios

Tablero del puente

Esta estructura está formada por paneles colocados sobre los pasadores de acero ubicados sobre las vigas del puente, y empotradas mediante tornillería.

Barandas del puente

Las barandas de los puentes modular tipo Bailey están diseñadas para proporcionar seguridad a los usuarios del puente y, al mismo tiempo, contribuir a la estabilidad lateral del sistema estructural. Además, para este caso se indica que el puente está compuesto por:

- Soportes Verticales,
- Rieles horizontales,
- y elementos de unión o tornillería

Los rieles horizontales realizan el soporte y conexión con los soportes verticales o barras verticales, los cuales se fijan a los largueros a lo largo del sistema de arrojamiento del puente.

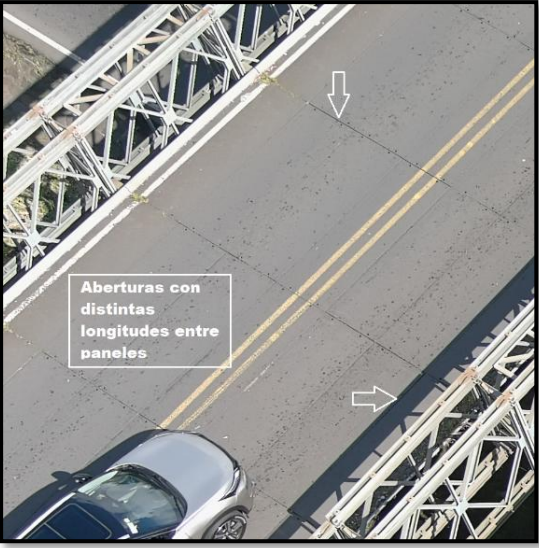
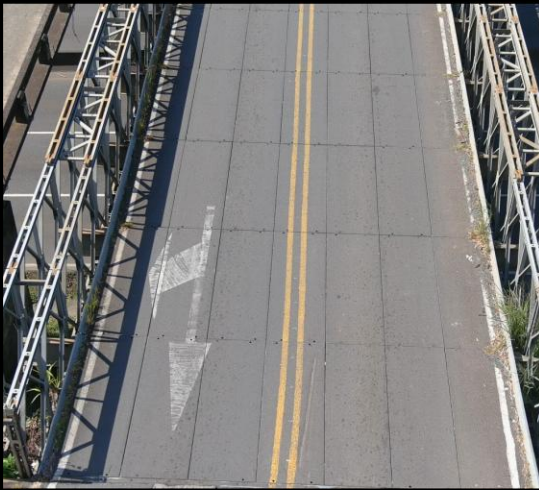
Así mismo, todos se unen mediante el sistema de tornillería, el cual utiliza pernos de alta resistencia, para conectar las barras verticales y rieles horizontales a la estructura del puente.



De ahí la importancia de inspeccionar de una forma detallada estos elementos o accesorios en este tipo de puentes ya que confieren la rigidez de la estructura y son necesarios para protección a los usuarios del puente.

Las siguientes fotografías corresponden a la inspección del tablero conformado por los paneles. La evaluación de dicha estructura es muy importante, debido a que corresponde a la superficie de rodamiento sobre el puente y también corresponde al elemento que soporta la estructura principal o de vigas.

Por lo tanto, en este proceso se podrían verificar de forma preliminar afectaciones estructurales, sobre este importante elemento en análisis y que podrían generar alertas de atención al puente, y de esta forma asegurar que no hay algún daño que comprometa su resistencia estructural.

En el siguiente cuadro se tiene la descripción del elemento evaluado:

Fotografía	Elemento Evaluado	Deficiencias	Observaciones
<p>Fotografía n.º 13</p> 	<p>Tablero del puente, costado oeste</p>	<p>Aberturas de distintas longitudes entre paneles del tablero</p>	<p>1. No se denotan afectaciones graves de la estructura. 2. Debe verificarse en sitio la condición de los tornillos de amarre con las vigas y pasadores.</p>
<p>Fotografía n.º 14</p> 	<p>Tablero del puente, sector central</p>	<p>Asfalto con condiciones de envejecimiento</p>	


<p>Fotografía n.º15</p> 	<p>Tablero del puente, este costado</p>	<p>Asfalto con condiciones de envejecimiento</p>	
<p>Imagen n.º 16</p> 	<p>Tablero del puente, imagen total</p>	<p>Deformación del asfalto y asentamientos del tablero de aproximación, posible defecto en nivel del puente.</p>	<p>Se puede obtener coordenadas en puntos seleccionados del sector requerido para evaluar diferencias de altura.</p>

En la siguiente imagen tomada en sector central de la estructura, se pueden identificar detalles de los accesorios del puente, así como parte de la estructura de vigas transversales y el tablero del puente, y de esta manera determinar su estado preliminar con respecto a la revisión de las fotografías tomadas.

Imagen 27. Fotografía E_ puente Castella



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Fotografía	Elemento Evaluado	Deficiencias	Observaciones
<p data-bbox="201 269 531 302">Fotografías n.ºs 17 y 18</p> 	<p data-bbox="999 269 1247 407">Accesorios del puente: barranda elementos de soporte</p>	<p data-bbox="1268 269 1509 444">1.Falta limpieza de la tornillería y barandas. 2.Corrosión en tornillería.</p>	<p data-bbox="1530 269 1885 553">Se sugiere incluir procesos de limpieza de las baranda, inclusive debe ser una limpieza detallada de los tornillos, para extraerles la corrosión (a los que presentan).</p>

Síntesis de resultados

La inspección realizada mediante RPAS sobre el puente vehicular modular sobre calle Castella (Ruta Nacional n.º 1) reveló ciertas deficiencias, las cuales fue posible determinar mediante el vuelo realizado. En términos generales, se observó una gran afectación, por ejemplo: en los tableros se tiene la existencia de aberturas de distintas longitudes entre paneles del tablero, asfalto con condiciones de envejecimiento, deformación del asfalto y asentamientos del tablero respecto al relleno o losa de aproximación, falta de limpieza de la tornillería y estructura de barandas de protección, corrosión en tornillería de las barandas y sistema de soporte de la estructura principal.

Mediante el estudio y observación de dichos elementos, se procede a realizar un análisis preliminar, de cada uno de los hallazgos vistos en la información recolectada.

En la Tabla 8 se definen los hallazgos y un estudio de las posibles causas:

Tabla 8. Hallazgos de las deficiencias encontradas en el puente modular Castella

1. Aberturas entre paneles del tablero	Movimientos diferenciales debido a cargas dinámicas o térmicas.
	Fatiga de los materiales estructurales utilizados
	Falta de mantenimiento o control en las juntas.
	Errores en la ejecución del diseño inicial de la estructura.
2. Asfalto con condiciones de envejecimiento	Exposición prolongada a condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas, lluvia o rayos UV.
	Uso de materiales de baja calidad en la mezcla asfáltica.
	Falta de un programa de mantenimiento preventivo e incluso correctivo.
3. Deformación del asfalto y asentamientos del tablero respecto al relleno o losa de aproximación	Compactación inadecuada del terreno o del relleno durante la construcción de los apoyos del puente o relleno de aproximación.
	Asentamientos diferenciales del suelo debido a cambios en las condiciones del terreno (inundaciones, erosión, etc.).
	Sobrecargas constantes que exceden los límites de diseño.
	Drenaje deficiente que permite la acumulación de agua, en sectores críticos de la estructura.
4. Falta de limpieza de la tornillería y estructura de barandas de protección	Falta de un programa regular de inspección y mantenimiento preventivo y correctivo.
	Exposición constante a condiciones ambientales adversas (altas temperaturas, humedad, contaminación u otras).
	Presencia de ambientes agresivos, como salinidad en áreas costeras.
	Uso de materiales no protegidos contra la corrosión (falta de galvanización o revestimientos).
	Falta de mantenimiento preventivo o correctivo, que incluya recubrimientos o protección adicional.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Por lo tanto, se determina que una planificación estratégica de inspecciones periódicas, mediante la cual se permita clasificar y priorizar los puentes por su importancia y su situación estructural, y que además incluya actividades preventivas, así como la implementación en el uso de tecnologías de sistemas de monitoreo estructural y fotogramétrico, o bien LiDAR, ayudaría a minimizar la detección de este tipo de hallazgos en futuras inspecciones, asegurando la vida de los usuarios de estas estructuras. Además de prevenir daños mayores en la estructura, los cuales conllevan a un intervención mayor o más profunda para corregirlos, como lo es el caso de la presencia de las deformaciones en las losas de aproximación, y la exposición de estructuras internas en las juntas.

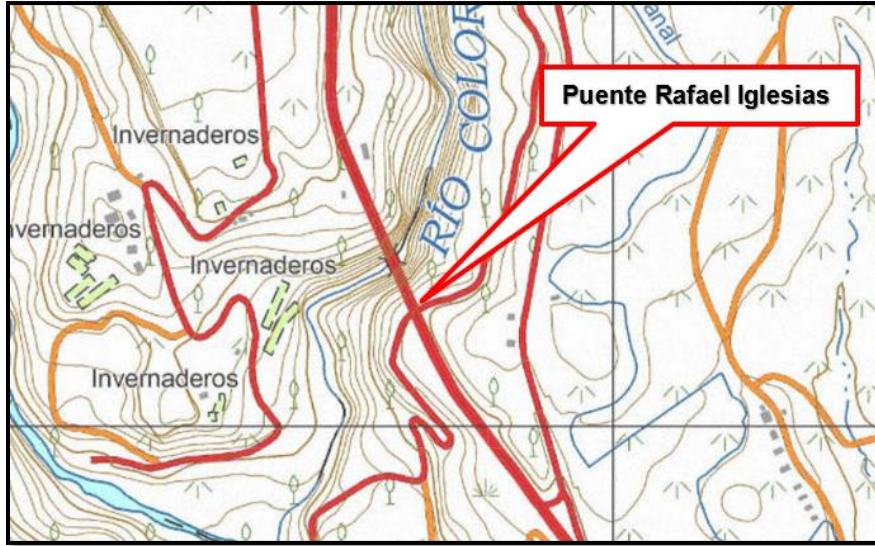
Inspección del puente Rafael Iglesias sobre el río Colorado Ruta Nacional n.º 1

El puente Rafael Iglesias ubicado en la Ruta Nacional n.º 1 de Costa Rica, se encuentra en el límite entre los cantones de Grecia y Naranjo, de la provincia de Alajuela.

Según Guillermo (2017), fue diseñado en 1971, por un consorcio de empresas en ese momento llamado T.Y. Lin Internacional e INDECA Ltda. Esta es una estructura única ya que combina elementos de puentes colgantes, marcos rígidos, bandas tensadas y arcos.

Sus coordenadas en CRTM05 son: y: 460654.6; x: 1108263.5. A continuación se muestra la ubicación de puente:

Imagen 28. Ubicación geográfica del puente Rafael Iglesias



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Tiene una longitud total de 204 metros, el puente atraviesa el cañón del río Colorado, que tiene una profundidad aproximada de 100 metros en esa zona. El tramo suspendido principal mide 124 metros entre los cabezales de las pilas inclinadas.

A continuación, se incluye la información de obtenida de la inspección realizada a la estructura y elementos específicos como: relleno de aproximación, losa de aproximación, tablero del puente, pilares o pilotes del puente, sin embargo, la base de estos pilares no se puede inspeccionar por la densidad de vegetación presente para el puente del río Concepción, tal y como se muestra en las siguientes imágenes, donde se observa de manera general la estructura del puente en análisis:

Imagen 29. Fotografía A_ puente Rafael Iglesias



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Imagen 30. Fotografía B_ puente Rafael Iglesias



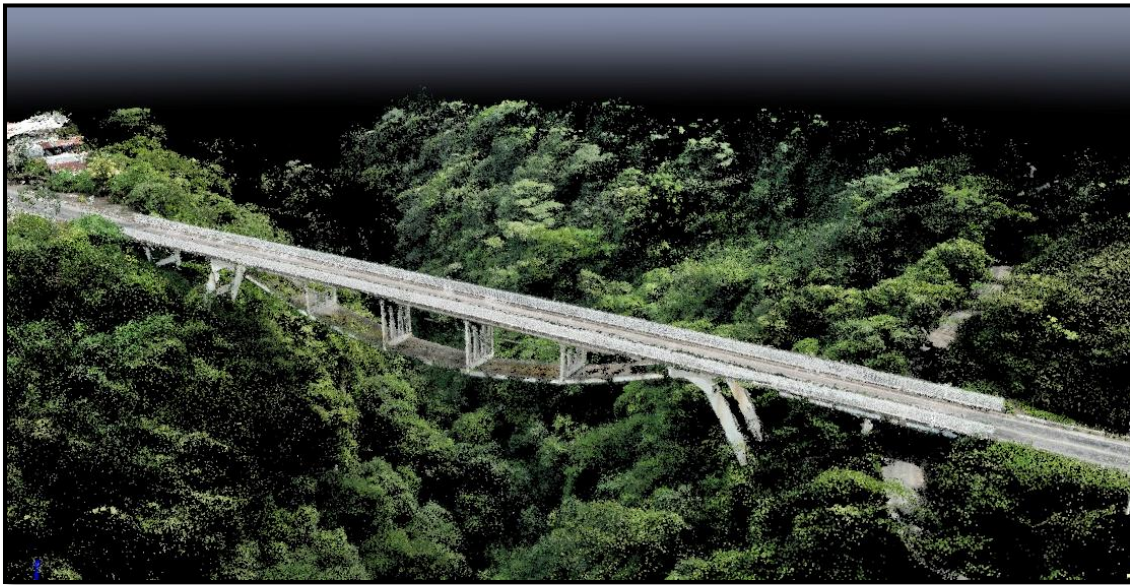
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Modelado 3D

Producto del modelado 3D, se generan varias imágenes mediante las cuales se puede verificar e inspeccionar la estructura de manera interactiva. Mediante este mecanismo, es posible realizar la observación desde varios ángulos, según el archivo generado.

Este producto permite la ejecución de un análisis óptimo en cuanto a la verificación de deformaciones de la estructura de forma general, mediante la vista a puntos dados en coordenadas locales o georreferenciación con sistemas geográficos específicos.

Imagen 31. Fotografía C_ puente Rafael Iglesias






Fuente: Elaboración propia, 2024.




La Imagen 31 corresponde a la estructura general e inspeccionada, donde se puede apreciar la densa vegetación que se presenta en los pilares o bases del puente en análisis.




Inspección mediante ejecución del vuelo manual

El vuelo manual realizado para el puente Rafael Iglesias arrojó datos interesantes de considerar, de acuerdo con la metodología planteada y los datos recolectados, tomando como insumo principal este proceso de conformidad con el planteamiento de este proyecto.


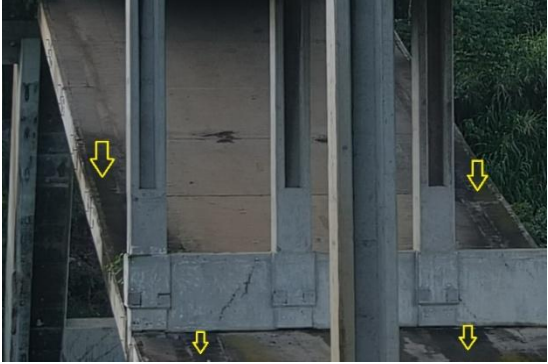

En las siguientes imágenes obtenidas mediante el uso del equipo RPAS, se identifica cada uno de los elementos del puente Rafael Iglesias.




n.º de Imagen	Fotografía / imagen 3D	Elemento Evaluado / Inspeccionado	Referencia	Insumo para evaluación	Observaciones
0002		Estructura principal	Sector norte	Fotografía	Se denotan manchas de corrosión sobre el concreto, no se determina su procedencia.
0003		Estructura principal	Sector norte	Fotografía	Se denotan manchas de corrosión sobre el concreto, no se determina su procedencia.
0033		Estructura principal	Sector central	Fotografía	Se denotan manchas de corrosión sobre el concreto, no se determina su procedencia.




0033		Estructura principal	Sector central	Fotografía	Se denotan manchas de corrosión sobre el concreto, no se determina su procedencia.
0010		Estructura principal (estructura de anclaje de los pilares)	Sector norte	Fotografía	Se denotan agrietamientos del concreto del elemento de conexión entre la estructura principal y el pilar norte.
0010		Estructura principal (estructura de anclaje de los pilares)	Sector norte	Fotografía	Se denotan reventaduras de la estructura en puntos de apoyo o anclaje, en la conexión con el pilar norte.



0013		Estructura principal (estructura de anclaje de los pilares)	Sector norte	Fotografía	Se denotan agrietamientos, los cuales fueron solacados con anterioridad.
0013		Estructura principal (estructura de anclaje de los pilares)	Sector norte	Fotografía	Se denotan agrietamientos en zonas de apoyo en el elemento de conexión con los cables de bandas tensadas.
0049		Estructura principal (estructura de anclaje de los pilares)	Sector sur	Fotografía	Se denotan agrietamientos del concreto del elemento de conexión entre la estructura principal y el pilar norte.




0049		Estructura principal (estructura de anclaje de los pilares)	Sector sur	Fotografía	Se denotan agrietamientos del concreto del elemento de conexión entre la estructura principal y el pilar norte.
0049		Estructura principal (estructura de anclaje de los pilares)	Sector sur	Fotografía	Se denotan agrietamientos del concreto del elemento de conexión entre la estructura principal y el pilar norte, y en la superficie inferior de dicha estructura de conexión.
83		Junta de expansión	Costado norte	Fotografía	



0028		Losas tensoras	Sector norte	Fotografía	Losas de las bandas tensoras presenta humedad constante, que puede afectar el acero interno, además, se denotan separaciones entre losas del elemento.
0035		Losas tensoras	Sector norte	Fotografía	Losas de las bandas tensoras presenta humedad constante, que puede afectar el acero interno, además se denotan separaciones entre losas del elemento.
0067		Losas tensoras	Sector norte	Fotografía	Losas de las bandas tensoras presenta humedad constante, que puede afectar el acero interno, además se denotan separaciones entre losas del elemento.




0070		Losas tensoras	Sector pilar B4	Fotografía	
0023		Losas tensoras	Bandas tensoras, sector norte	Fotografía	Se denotan separaciones entre losas de tensión, y en ese mismo tramo algunas losas no poseen dicha separación entre ellas.
0044		Pilar de banda tensada PB2	Sector central	Fotografía	Se denota un agrietamiento en uno de los pilares de la línea PB2, muy cercano a las bandas tensoras.




0073		Pilar de banda tensada PB1	Sector sur	Fotografía	Se denota descascaramiento en uno de los pilares de la línea PB2, muy cercano a las bandas tensoras.
0044		Pilar de banda tensada PB2	Sector central	Fotografía	Se denota un agrietamiento en uno de los pilares de la línea PB2, muy cercano a las bandas tensoras.
0040		Pilar de banda tensada PB3	Sector central	Fotografía	Se denota un agrietamiento en uno de los pilares de la línea PB3, muy cercano a las bandas tensoras.

0041		Pilar de banda tensada PB4	Sector central (costado este)	Fotografía	Se denota un agrietamiento en uno de los pilares de la línea PB3, muy cercano a las bandas tensoras.
0067		Pilar de banda tensada PB5	Sector central (costado oeste)	Fotografía	Se denota un agrietamiento en uno de los pilares de la línea PB3, muy cercano a las bandas tensoras.


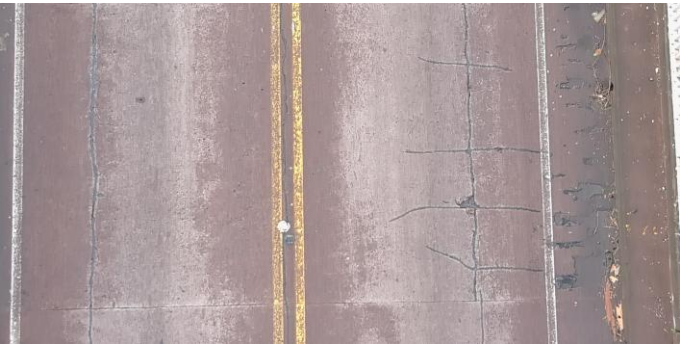

0025		Pilar norte	Sector norte	Fotografía	Se denotan agrietamientos en la estructura del pilar que conecta ambos pilotes.
0025		Pilar norte	Sector norte	Fotografía	Se denotan agrietamientos en la estructura del pilar que conecta ambos pilotes.
0010		Pilar norte	Sector norte	Fotografía	Se denotan agrietamientos en la estructura del pilar que conecta ambos pilotes.




0037		Pilares de bandas tensadas		Fotografía	No se denotan defectos en la estructura de conexión con la estructura principal.
0052		Pilares de bandas tensadas PB1, PB2, PB3 y PB4		Fotografía	En los pilares PB1, PB2 y PB4 no se denotan defectos para estos elementos.

0179		Relleno de aproximación	Sector central	Fotografía	Se nota agrietamiento del asfalto y envejecimiento de este.
84		Tablero del puente	Costado norte	Fotografía	
88		Tablero del puente	Costado norte	Fotografía	Se nota agrietamiento y envejecimiento del asfalto.

0121		Tablero del puente	Sector central	Fotografía	Se nota agrietamiento, descascaramiento y envejecimiento del asfalto.
0127		Tablero del puente	Sector sur	Fotografía	Se nota agrietamiento, descascaramiento y envejecimiento del asfalto.
0163		Tablero del puente	Sector central	Fotografía	

0168		Tablero del puente	Sector central	Fotografía	Se nota agrietamiento, descascaramiento y envejecimiento del asfalto de este.
0170		Tablero del puente	Sector central	Fotografía	Se nota agrietamiento, descascaramiento y envejecimiento del asfalto.
0175		Tablero del puente	Sector central	Fotografía	

0107		Tablero del puente	Sector central	Fotografía	Se nota agrietamiento, descascaramiento y envejecimiento del asfalto.
0121		Tablero del puente	Sector central	Fotografía	Agrietamiento y descascaramiento de la superficie de concreto en el tablero del puente.
0217		Pilar sur	Sector sur	Fotografía	Se denota exposición del acero en la estructura de concreto, y un alto grado de humedecimiento, que daña dicho acero.

0217		Pilar sur	Sector sur	Fotografía	Se denota exposición del acero en la estructura de concreto, y un alto grado de humedecimiento, que daña dicho acero.
0223		Estructura principal	Sector sur	Fotografía	Se denota un alto grado de humedad en la estructura y enmohecimiento de concreto.
0228		Losas tensoras	Sector sur	Fotografía	Se denota agrietamiento en la estructura de la banda tensora y el elemento de conexión a la estructura principal del puente, donde se nota exposición del acero, el cual se ve afectado por humedecimiento del concreto.



Junta de
conexión de
losa tensora

Sector sur

Fotografía

Se nota daño en las conexiones de
puntas ubicadas en el punto de unión
de 2 bandas tensoras.

Síntesis de resultados

Mediante la inspección del puente vehicular Rafael Iglesias, mediante RPAS se revelaron ciertas deficiencias. En términos generales, se observaron manchas de corrosión en el concreto, no obstante, con esta inspección no fue posible determinar su origen; también se detectan agrietamientos en los elementos de conexión entre la estructura principal y el pilar norte, algunos de los cuales ya fueron reparados (según se observa en las fotografías).

Además, existen reventaduras en puntos de apoyo o anclaje en la conexión con el pilar norte, lo que compromete la estabilidad de la estructura. También, fue posible determinar que las losas de las bandas tensoras presentan humedad constante, lo que podría afectar el acero interno, que, si bien no se descarta, tampoco se puede afirmar la presencia de dicha humedad. Así mismo, en algunos tramos se observan separaciones entre las losas, posiblemente, mayores a las del diseño original. También se evidencian agrietamientos en zonas de apoyo en la conexión con los cables de las bandas tensadas, así como daños en la estructura de la banda tensora, que muestra exposición al acero y un evidente deterioro por la humedad.

En los pilares, se observa un descascaramiento cercano a las bandas tensoras y agrietamientos en la estructura que conecta con los pilotes, lo que podría desencadenar en un problema de estabilidad de la estructura estudiada. En la superficie del puente, el asfalto presenta signos de envejecimiento y agrietamiento, mientras que el tablero de concreto muestra también agrietamiento y descascaramiento, posiblemente debido a las fuertes lluvias (humedad) y una falta de drenajes adecuados.

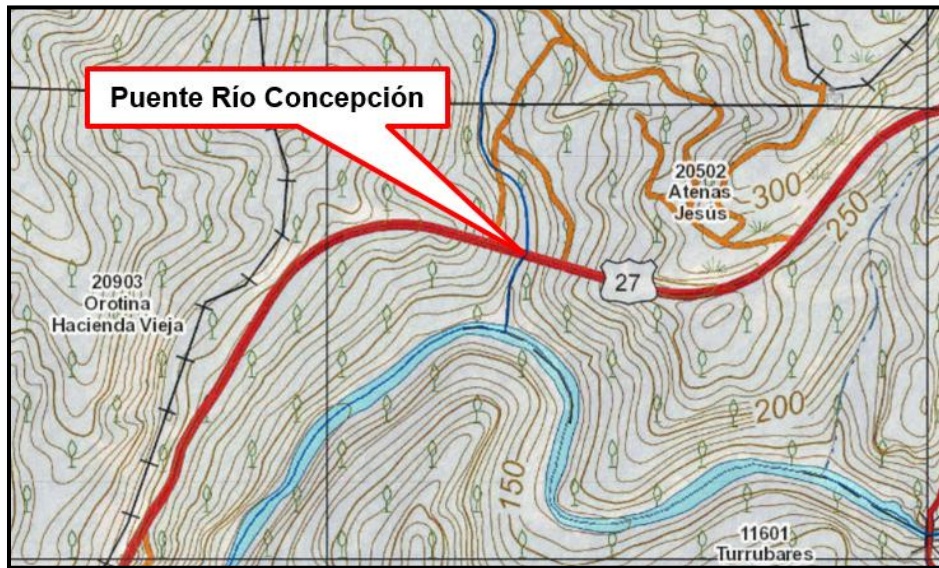
En resumen, la estructura del puente presenta un alto grado de deterioro debido a la corrosión, humedad y agrietamientos generalizados, lo que requiere intervención urgente para evitar un mayor daño y preservar la seguridad de la infraestructura.

Puente vehicular sobre el río Concepción Ruta Nacional n.º 27

Este es un puente con una súper estructura tipo marco con el elemento principal tipo viga de cajón de concreto preesforzado, se encuentra ubicado en el kilómetro 45+460 de la

Ruta Nacional n.º 27 Autopista José María Castro Madriz, se ubica en el distrito de Jesús, del cantón de Atenas, provincia de Alajuela. Sus coordenadas en CRTM05 son: y: 449324.1; x: 1097507.7. A continuación se muestra la ubicación de puente:

Imagen 32. Ubicación geográfica del puente sobre el río Concepción

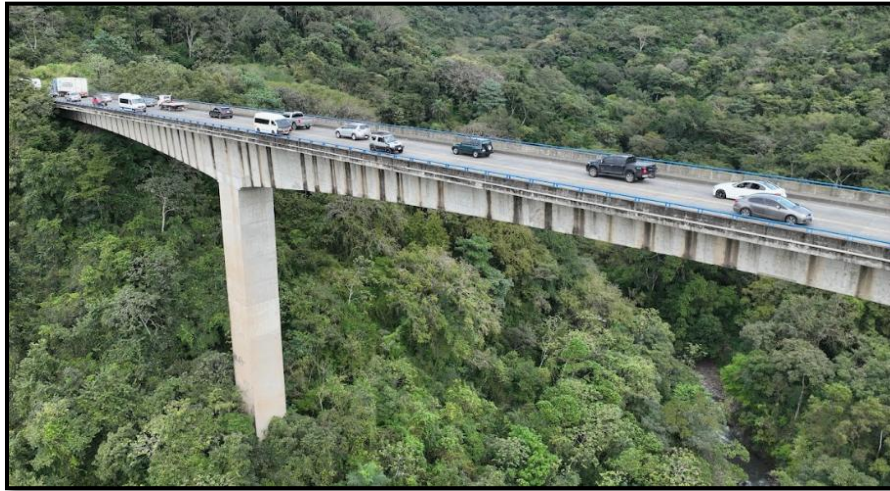


Fuente: Elaboración propia, 2024.

Este puente tiene una longitud de 293.8 metros de largo y 12.2 metros de ancho, y cuenta con dos carriles.

A continuación, se incluye la información obtenida de la inspección realizada a la estructura y elementos específicos como el relleno de aproximación, losa de aproximación, tablero del puente, pilares o pilotes del puente; sin embargo, la base de estos pilares no se pudo inspeccionar por la densidad de vegetación presente para el puente río Concepción, tal y como se muestra en las siguientes imágenes, donde se observa de manera general la estructura del puente en análisis:

Imagen 33. Fotografía A_ puente sobre el río Concepción



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Imagen 34. Fotografía B_ Puente sobre el río Concepción



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Modelado 3D

Producto del modelado 3D, se generan varias imágenes mediante las cuales se puede verificar e inspeccionar la estructura de manera interactiva. Mediante este mecanismo, es posible realizar la observación desde varios ángulos, según el archivo generado.

Este producto permite la ejecución de un análisis óptimo en cuanto a la verificación de deformaciones de la estructura de forma general, mediante la vista a puntos dados en coordenadas locales o georreferenciación con sistemas geográficos específicos.

Imagen 35. Fotografía C_ Puente sobre el río Concepción



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Imagen 36. Fotografía D_ Puente sobre el río Concepción



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las Imagen 35 y Imagen 36 corresponden a la estructura general e inspeccionada, donde se puede apreciar la densa vegetación que se presenta en los pilares o bases del puente en análisis.

Inspección mediante ejecución del vuelo manual

El vuelo manual, realizado para el puente del río Concepción, arrojó datos interesantes de considerar, de acuerdo con la metodología planteada y los datos recolectados, tomando como insumo principal este proceso en conformidad con el planteamiento de este proyecto.

El paso que brinda este puente es uno de los principales accesos vehiculares hacia la provincia de Puntarenas.

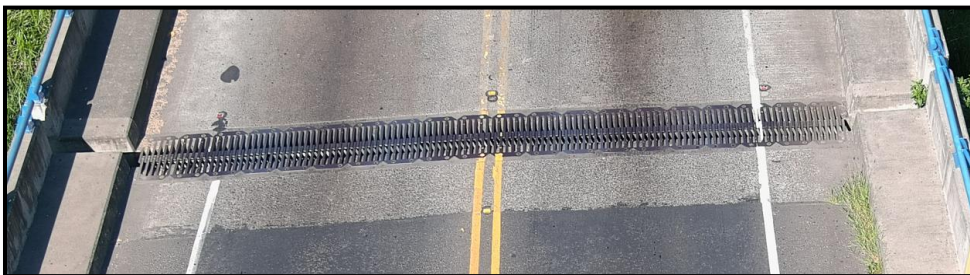
Esta situación hace considerar dicho puente como una estructura o insumo vial de gran importancia para la separación de vehiculos que ingresen a dicha provincia, y de esta manera ayudar con la disminución de los colapsos viales actuales.

Evaluación mediante la inspección de los elementos del puente

Inspección de la junta de expansión (costado sur)

Las siguientes fotografías corresponden a la inspección de la junta de expansión de aproximación al puente, del costado sur.

Imagen 37. Fotografía E_ Puente sobre el río Concepción



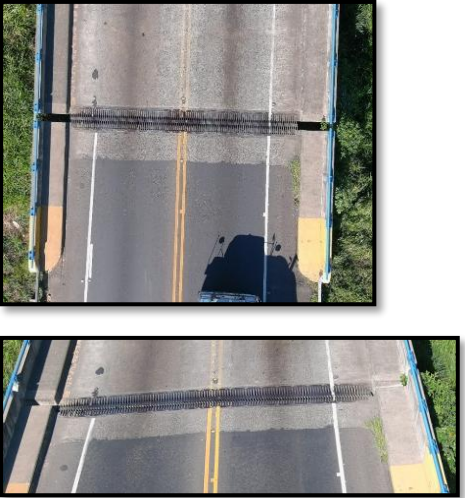
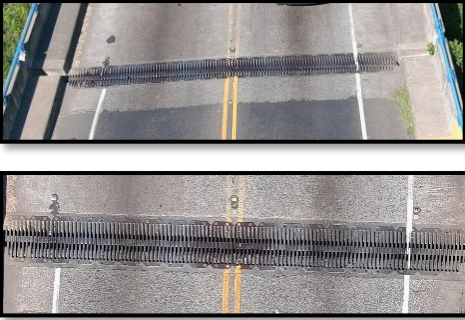
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Imagen 38. Fotografía F_ Puente sobre el río Concepción

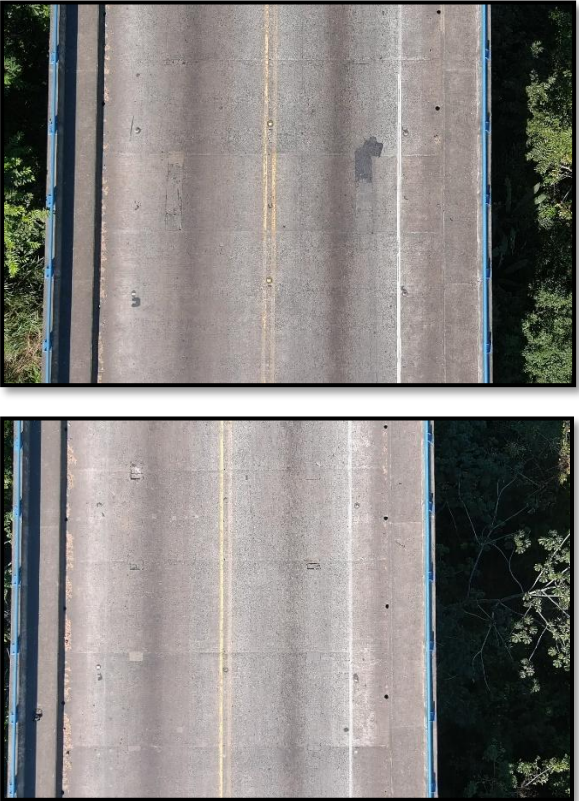


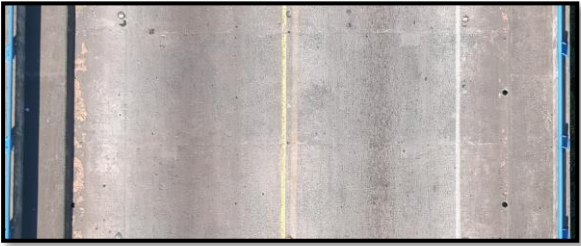

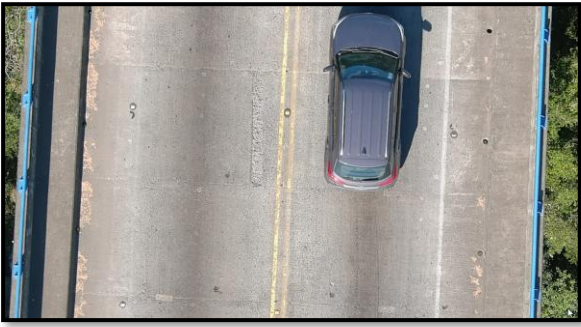
Fuente: Elaboración propia, 2024.

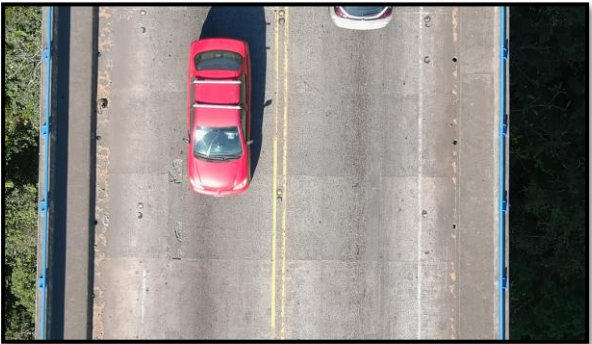

En el siguiente cuadro se presenta la descripción del elemento evaluado (**Relleno de aproximación, losa de aproximación y junta de expansión**), en conformidad con los hallazgos detectados, mediante el uso del insumo fotográfico o el insumo obtenido mediante el procesamiento de las imágenes, y el uso del *software* con el modelado 3D.

Fotografía / Imagen	Elemento Evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
<p>Fotografías n.ºs 1 y 2</p> 	<p>Relleno y losa de aproximación sur</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>1. Se denota carpeta asfáltica con envejecimiento. Junta entre el concreto y relleno de aproximación en buen estado. Se aprecia desgaste del concreto de la losa de aproximación.</p>	
<p>Fotografía n.º 3, 4</p> 	<p>Junta de expansión sur</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Se nota inexistencia de 4 o 5 tornillos de sujeción de la junta de expansión.</p>	

Inspección del Tablero del Puente


Fotografía / Imagen	Elemento Evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
<p>Fotografías n.ºs 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11.</p> 	Tablero del puente	Fotografía aérea	<p>Grietas muy pequeñas Degradación superficial o desintegración del concreto y mortero de la estructura. Delaminación y descascaramiento de la superficie del tablero a causa de pruebas físicas del concreto.</p>	

Inspección de la junta de expansión (costado norte) del puente

En el siguiente cuadro se tiene la descripción del elemento evaluado, en conformidad con los hallazgos detectados, mediante el uso del insumo fotográfico o el insumo obtenido mediante el procesamiento de las imágenes, y el uso del *software* con el modelado 3D.

Fotografía / Imagen	Elemento Evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
<p>Imágenes n.º 12 y 13</p> 	Junta de expansión norte	Fotografía aérea	Desgaste del acero del elemento. El elemento no brinda un sello integral al espacio correspondiente a la junta de expansión.	

Inspección de la losa de aproximación (costado norte) del puente


En el siguiente cuadro se tiene la descripción del elemento evaluado, en conformidad con los hallazgos detectados, mediante el uso del insumo fotográfico o el insumo obtenido mediante el procesamiento de las imágenes, y el uso del *software* con el modelado 3D.

Fotografía / Imagen	Elemento Evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
Imágenes n.º 14 y 15	Losa de aproximación al puente	Fotografía aérea	Agrietamiento de la losa. Degradación del concreto.	

			<p>Se denota separación del relleno de aproximación.</p>	



Inspección del relleno de aproximación del puente (costado norte)




En el siguiente cuadro se tiene la descripción del elemento evaluado, en conformidad con los hallazgos detectados, mediante el uso del insumo fotográfico o el insumo obtenido mediante el procesamiento de las imágenes, y el uso del *software* con el modelado 3D.



Fotografía / Imagen	Elemento Evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
<p>Fotografías n.ºs 16 y 17</p> 	Relleno de aproximación sur	Fotografía aérea	<p>1. Se denota carpeta asfáltica con envejecimiento. 2. Se denota separación de la losa de aproximación del puente. 3. Se denota asentamiento del asfalto respecto a la losa de aproximación del puente.</p>	

Inspección de la losa del puente

Las siguientes fotografías corresponden a la inspección de las losa principal del puente, el siguiente cuadro se presenta la descripción del elemento evaluado (**los pilares norte y sur**), en conformidad con los hallazgos detectados, mediante el uso del insumo fotográfico o el insumo obtenido mediante el procesamiento de las imágenes, y el uso del *software* con el modelado 3D.

Fotografía / Imagen	Elemento Evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
<p data-bbox="422 358 625 391">Imagen n.º 18</p> 	Losa del puente	Fotografía aérea	<p data-bbox="1346 358 1640 472">Nidos de piedra Solacamiento parcial de grietas</p> <p data-bbox="1346 521 1633 594">Eflorescencia en algunos segmentos</p>	
<p data-bbox="422 846 625 878">Imagen n.º 19</p> 	Losa del puente	Fotografía aérea	Contaminación por cloruros o corrosión del acero de refuerzo	

<p>Imagen n.º 20</p> 	<p>Losa del puente</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Solacamiento parcial de grietas. Eflorescencia en algunos segmentos.</p>	
<p>Imagen n.º 21</p> 	<p>Losa del puente</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Humedad en el elemento / posible reacción álcali-sílice. Elementos expuesto de estructuras de amarre del encofrado para colocación de concreto.</p>	
<p>Imagen n.º 22</p> 	<p>Losa del puente</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Solacamiento parcial de grietas. Eflorescencia en algunos segmentos.</p>	

<p>Imagen n.º 23</p> 	<p>Losa del puente</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Solacamiento parcial de grietas. Eflorescencia en algunos segmentos.</p>	
<p>Imágenes n.ºs 24, 25, 26, 27</p> 	<p>Losa del puente</p>	<p>Fotografía aérea</p>	<p>Humedecimiento de losa por orificios de desfogue del tablero del puente.</p>	



Imágenes n.ºs 28, 29, 30, 31

Losa del puente

Fotografía aérea

Humedecimiento de losa por orificios de desfogue del tablero del puente.
Delaminación y descascaramiento.
Agrietamiento.

Se denota un punto crítico de afectación por cercanía con el apoyo o pilar del puente.





Imagen n.º 32



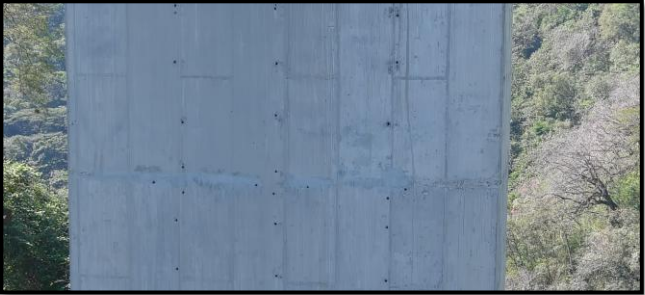

Losa del puente

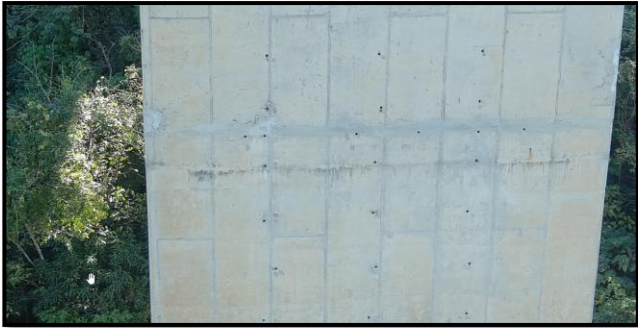
Fotografía
aérea

Humedecimiento de losa por orificios de desfogado del tablero del puente.
Delaminación y descascaramiento.
Solacamiento parcial.

Se denota un punto crítico de afectación por cercanía con el apoyo o pilar del puente.

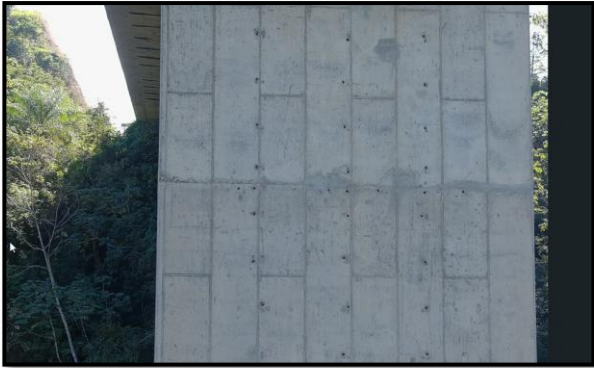
Inspeccion de pilares (estructura principal del puente)

Fotografía / Imagen	Elemento evaluado	Insumo para evaluación	Deficiencias	Observaciones
<p>Imagen n.º 33</p> 	Losa del puente	Fotografía aérea	Elementos expuestos de estructuras de amarre del encofrado para colocación de concreto. Solacamiento parcial de grietas.	
<p>Imágenes n.ºs 34, 35, 36, 37, 38, 39</p> 	Losa del puente	Fotografía aérea	Elementos expuestos de estructuras de amarre del encofrado para colocación de concreto. Solacamiento parcial de grietas. Rastros de corrosión.	



Pilar sur







--	--	--	--	--

Síntesis de resultados

Mediante la inspección del puente vehicular sobre el río Concepción (Ruta Nacional n.º 27) con RPAS reveló ciertas deficiencias. En términos generales, se observó envejecimiento de la carpeta asfáltica, lo cual podría obedecer a temperatura, radiación ultravioleta o humedad, desgaste en la losa de aproximación y la inexistencia de 4 o 5 tornillos en la junta de expansión.

En el tablero del puente se identificaron pequeñas grietas, degradación superficial del concreto y mortero, delaminación y descascaramiento, lo cual podría obedecer a la flexión propia de la estructura de estudio.

La junta de expansión mostró desgaste del acero, mientras que la losa de aproximación presentó agrietamientos, separación del relleno y asentamientos del asfalto. Además, se notaron eflorescencias (fenómeno que se produce cuando se visualizan manchas blancas en las superficies de los materiales de construcción debido a la humedad) contaminación por cloruros y signos de posible reacción álcali-sílice, la cual es una reacción química derivada entre los álcalis del cemento y los agregados de sílice en el hormigón, la cual puede causar grietas, expansiones y destrucción del hormigón, por lo que es importante mencionarla en esta síntesis. Finalmente, en los pilares se observaron elementos expuestos de estructuras de amarre del encofrado, grietas parciales, corrosión y algunos agrietamientos menores.

Procesamiento de imágenes en drone2map

Drone2Map es una aplicación de ESRI diseñada para transformar las imágenes tomadas por drones en mapas y modelos 3D de alta calidad. A continuación, se detalla el procesamiento realizado, para la obtención de los productos finales.

Antes de realizar el vuelo, se realizaron los análisis respectivos de:

- Área de interés: Determinar el área de mapeo y planeación del vuelo.
- Altitud de vuelo: Para este caso, se realizó un vuelo a 100 m de altura.

- Solapamiento: las imágenes deben contar con suficiente solapamiento (entre 60% y 80%) para facilitar el procesamiento.
- Condiciones meteorológicas: con la aplicación UAV Forecast se revisaron las condiciones meteorológicas previo a realizar el vuelo.

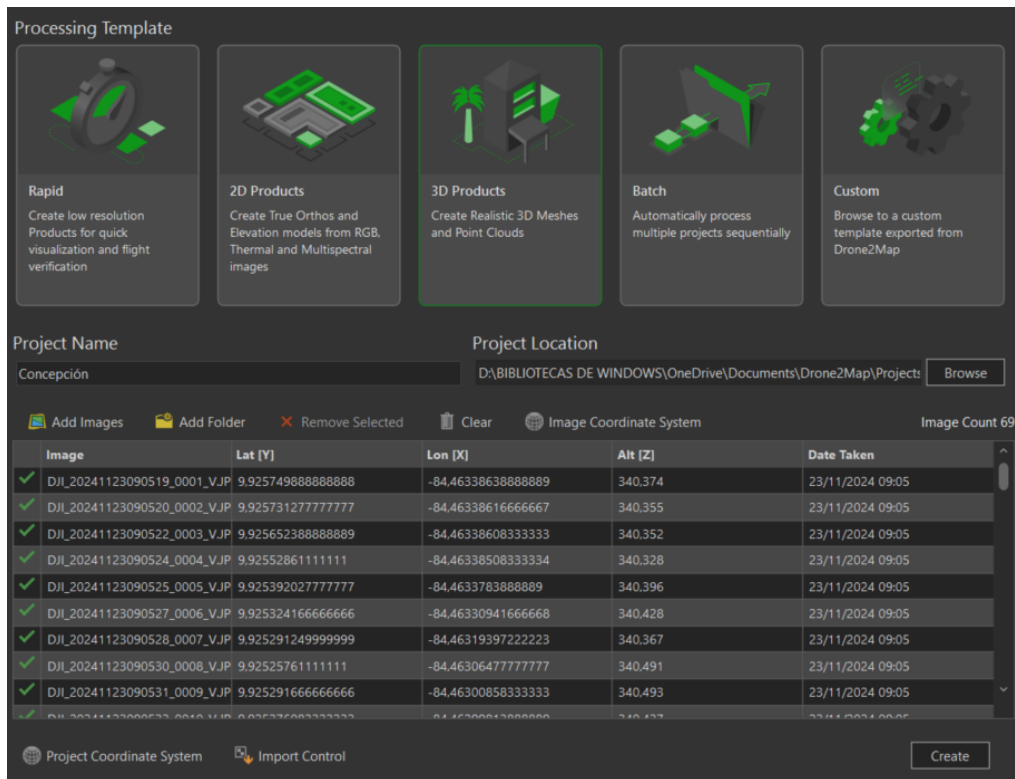
A la hora de realizar el vuelo, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Colocación de un punto con coordenadas nacionales georreferenciadas a la proyección CRTM05.
- Calibración de la cámara y otros sensores del dron antes del despegue.
- Vuelo siguiendo el plan de vuelo previamente establecido.
- Monitoreo del vuelo en tiempo real, asegurándose que todo funcione correctamente.

Seguidamente se realiza el procesamiento de imágenes

- Crear un nuevo proyecto: Seleccionar "Nuevo proyecto" e ingresar un nombre y ubicación para el proyecto.
- Importar imágenes: Cargar las imágenes capturadas durante el vuelo. Drone2Map reconoce automáticamente los metadatos de las imágenes.
- Configuración de procesamiento: Seleccionar el tipo de producto por generar (ortomosaico, DSM, DTM, 3D, etc.).

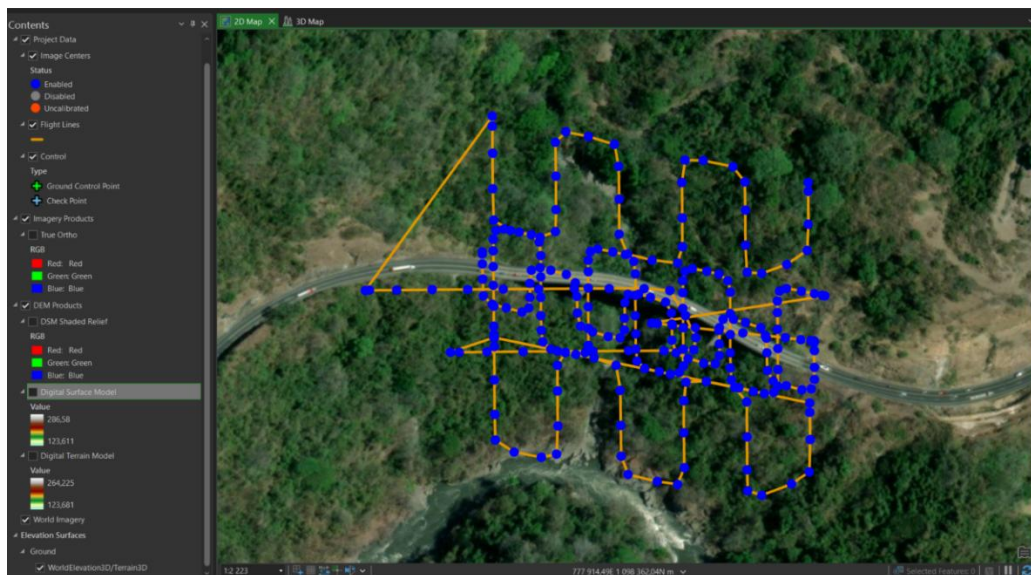
Imagen 39. Captura de pantalla de la selección del producto por generar



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Una vez que se genera el proyecto, se puede evidenciar el vuelo que realizó el dron y las fotografías capturadas:

Imagen 40. Captura de pantalla de la evidencia del vuelo realizado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 41. Captura de pantalla de la evidencia del vuelo realizado + las fotografías tomadas

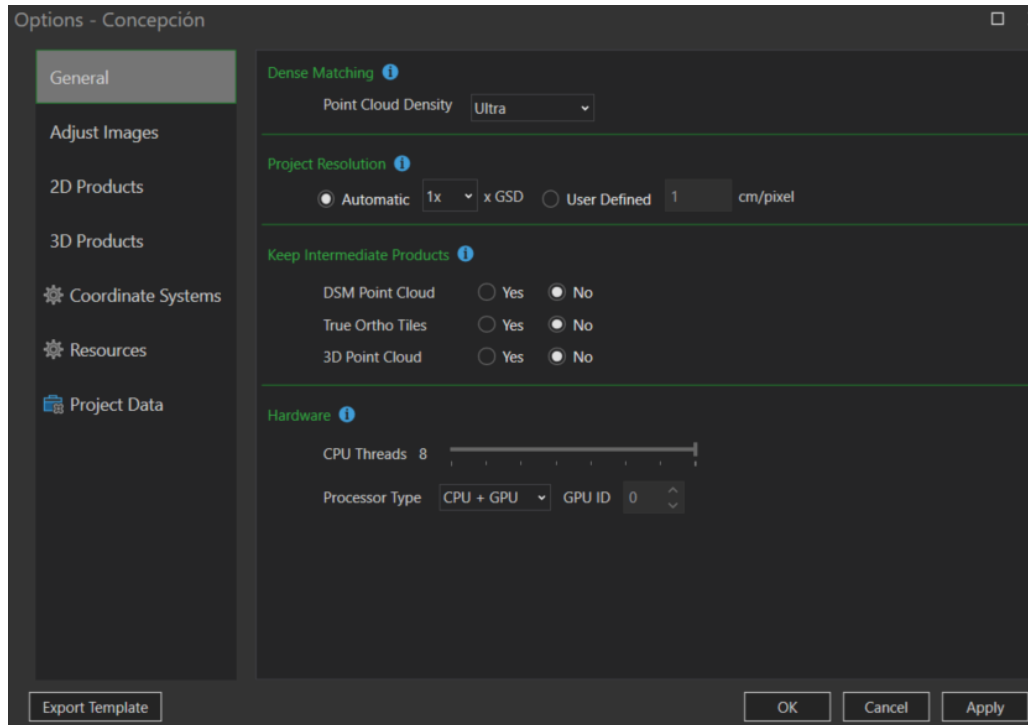


Fuente: Elaboración propia, 2025.

Seguidamente se procede a configurar las opciones de generación de ortofotos y modelos digitales del terreno:

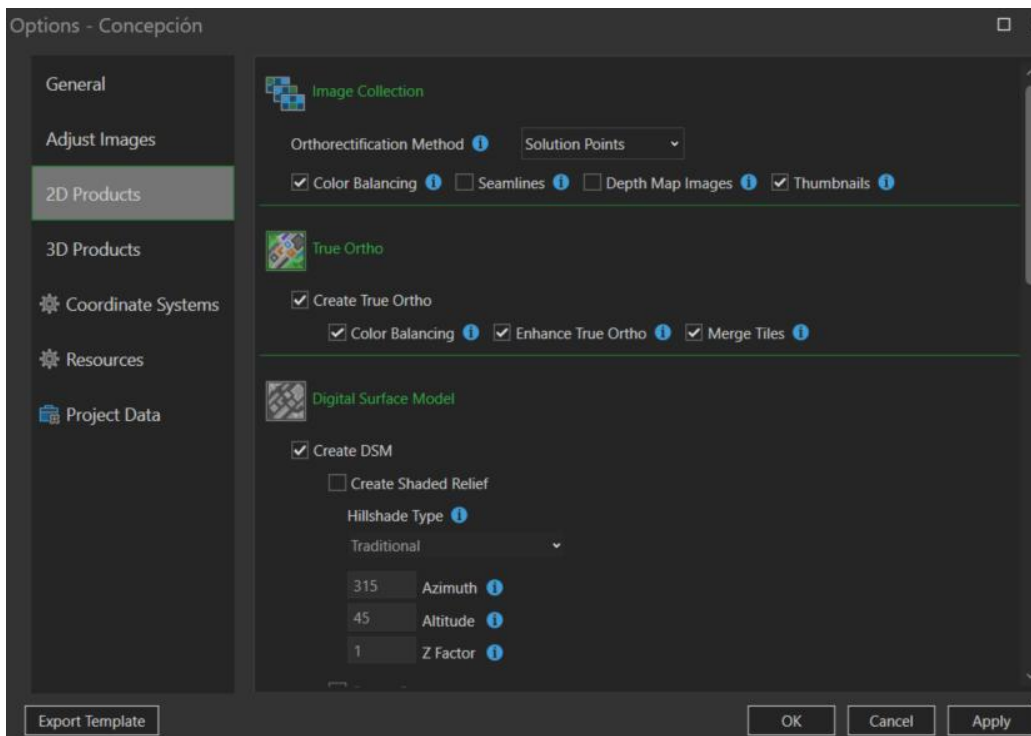
- Ortomosaico: Un mapa ortorrectificado con todas las imágenes combinadas.
- Modelo Digital de Superficie (DSM): Representa la elevación de la superficie incluyendo edificios y vegetación.
- Modelo Digital del Terreno (DTM): Muestra la elevación del terreno sin vegetación ni edificaciones.
- Modelo 3D: Un modelo tridimensional del área capturada.

Imagen 42. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 1



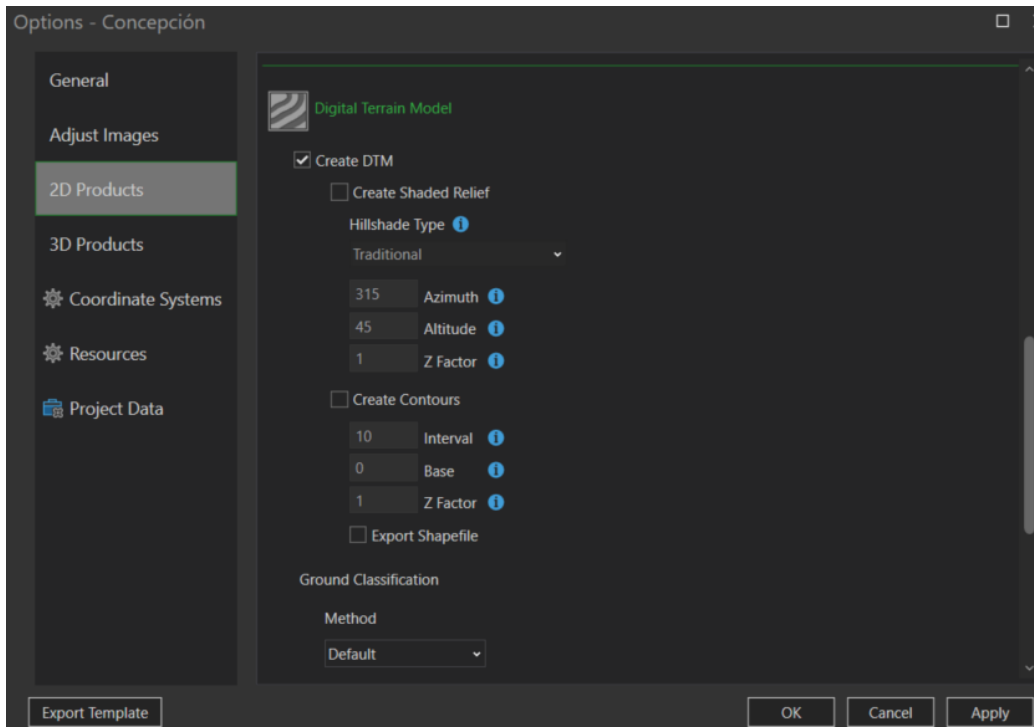
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 43. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 2



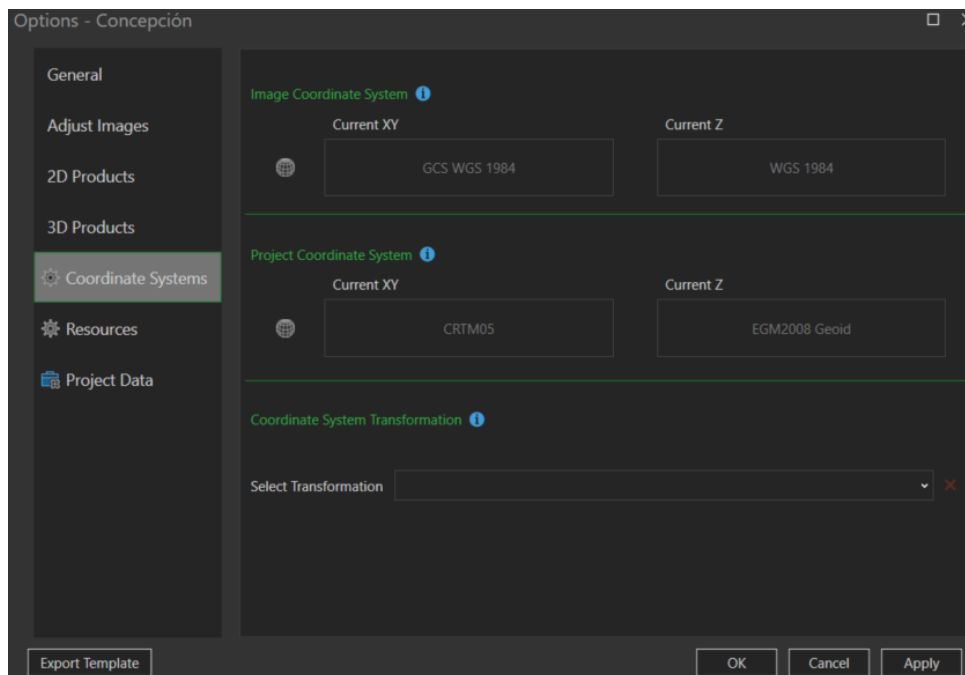
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 44. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 3



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 45. Captura de pantalla de la configuración para la generación de ortofotos paso 4



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Productos obtenidos:

1. Ortomosaico: Un mapa ortorectificado con todas las imágenes combinadas.

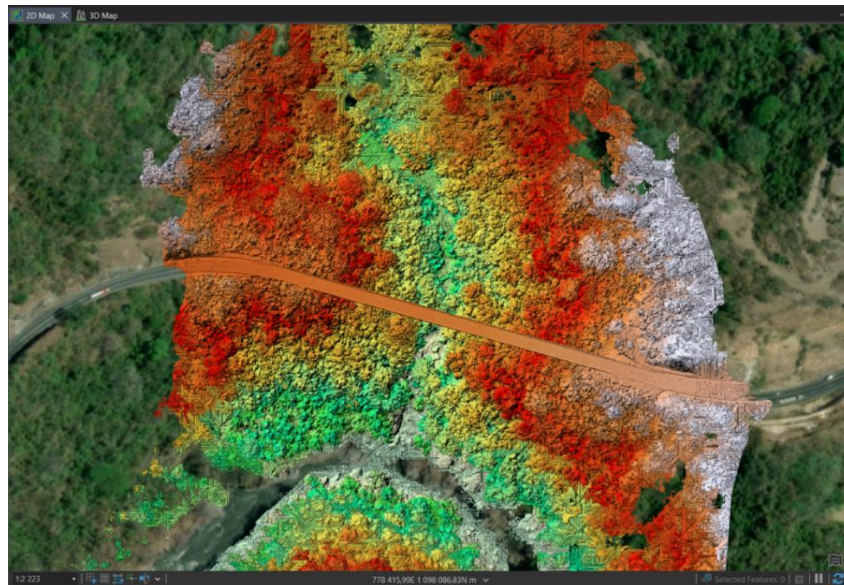
Imagen 46. Captura de pantalla del mapa ortorectificado



Fuente: Elaboración propia, 2025.

2. DSM: Modelo Digital de Superficie. Representa la elevación de la superficie incluyendo edificios (en este caso el puente) y vegetación.

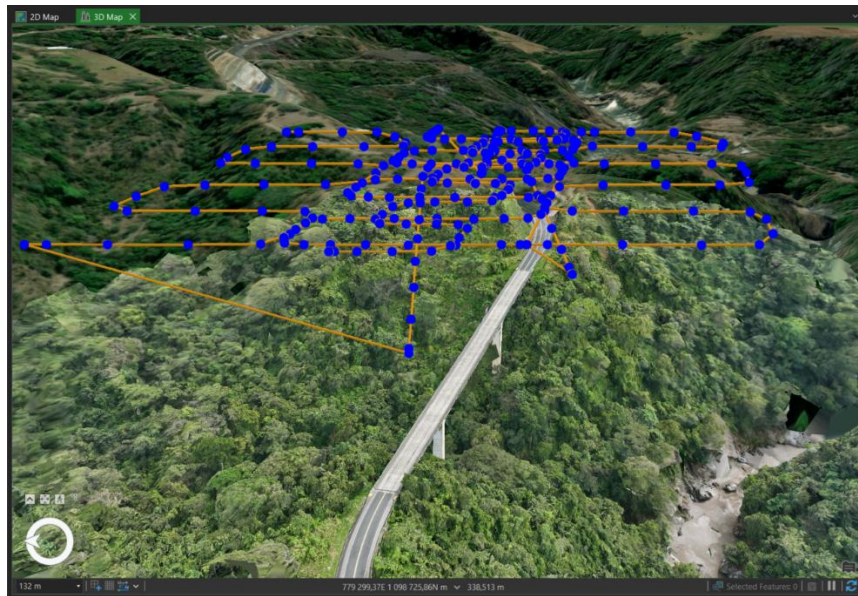
Imagen 47. Captura de pantalla del Modelo Digital de la Superficie



Fuente: Elaboración propia, 2025.

3. Vistas tridimensionales: Un modelo tridimensional del área capturada.

Imagen 48. Captura de pantalla del modelo 3D de área de interés



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 49. Captura de pantalla del modelo 3D de área de interés



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El procesamiento de fotos con Drone2Map es una herramienta muy poderosa para convertir imágenes aéreas en valiosos productos geospaciales, los cuales son la base para los posteriores análisis de deflexión que se realizarán.

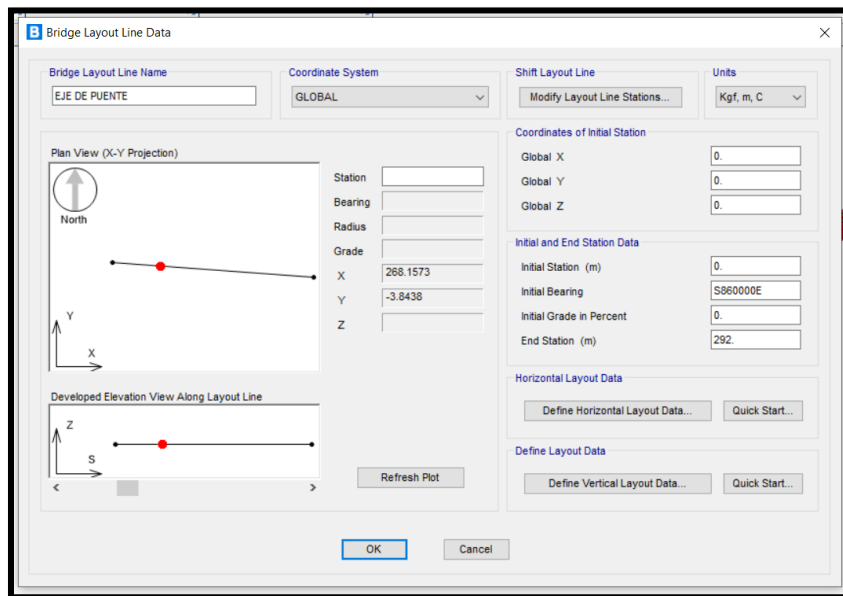
Procesamiento de la información en el *software* de análisis estructural.

Para llevar a cabo la modelación del puente sobre el río Concepción (Ruta Nacional n.º 27), se utiliza el *software* CSI Bridge.

- Inicialmente se realiza la definición de la dimensión del puente en cuanto a longitud, ancho (estructura principal y anchos de vía). En las siguientes imágenes se define la longitud del puente que según la información fotogramétrica se define en 292 m, y el ancho de cada carril se define en 4.95 m.

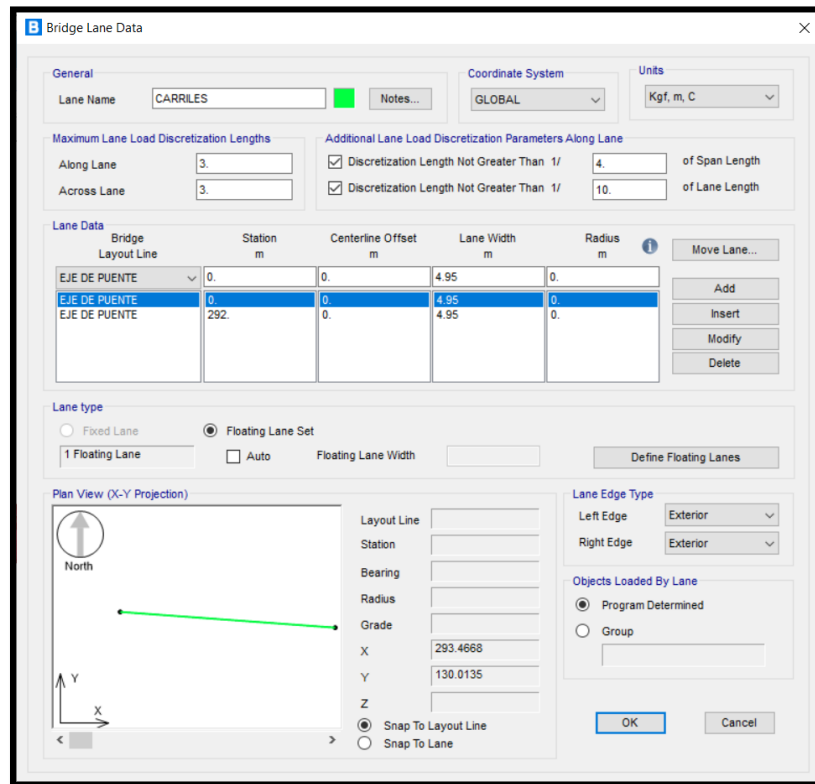
En este proceso se incluye el modelado de la pendiente del puente, definido en -4° , desde el sector de Atenas hacia Orotina.

Imagen 50. Captura de pantalla donde se realiza la definición del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 51. Captura de pantalla de la definición del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Definición del material por utilizar: como referencia para el material, y del cual el puente está construido, se define el uso de concreto estructural con una resistencia de 350 kg/cm².

Al no conocerse las calidades del acero de refuerzo, se definen las calidades específicas del *software*, según la proyección de este.

Imagen 52. Captura de pantalla de la definición de materiales del puente

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: 5000Psi = 350 KG/CM2

Material Type: Concrete

Material Grade: Fc 5000 psi

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 2402.7697

Mass per Unit Volume: 245.0143

Units

Kgf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E: 2.834E+09

Poisson, U: 0.2

Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 1.181E+09

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, Fc: 350.

Expected Concrete Compressive Strength: 350.

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

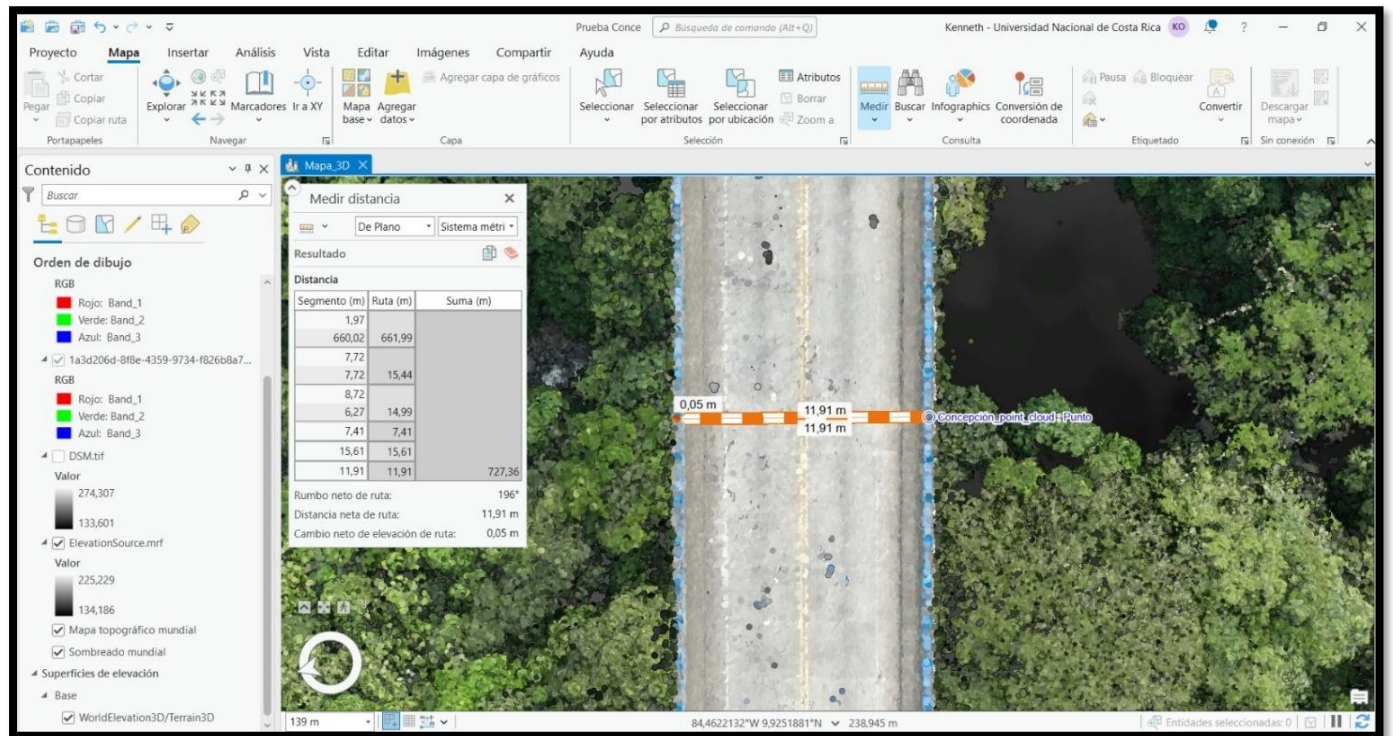
Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Definición de los elementos del puente: El *software* CSI BRIDGE utilizado confiere una flexibilidad, para escoger y modelar cada uno de los elementos del puente.

Los elementos modelados en este proceso refieren la estructura principal del puente, los pilares y los estribos.

- o Cajón del puente: en este caso el *software* permite utilizar elementos definidos a nivel mundial, comunes en la construcción de puentes. El puente modelado posee viga cajón de concreto, de un solo habitáculo.

Imagen 53. Captura de pantalla de la definición de dimensiones de los elementos del puente (ancho superior del cajón)



Fuente: Elaboración propia, 2025.

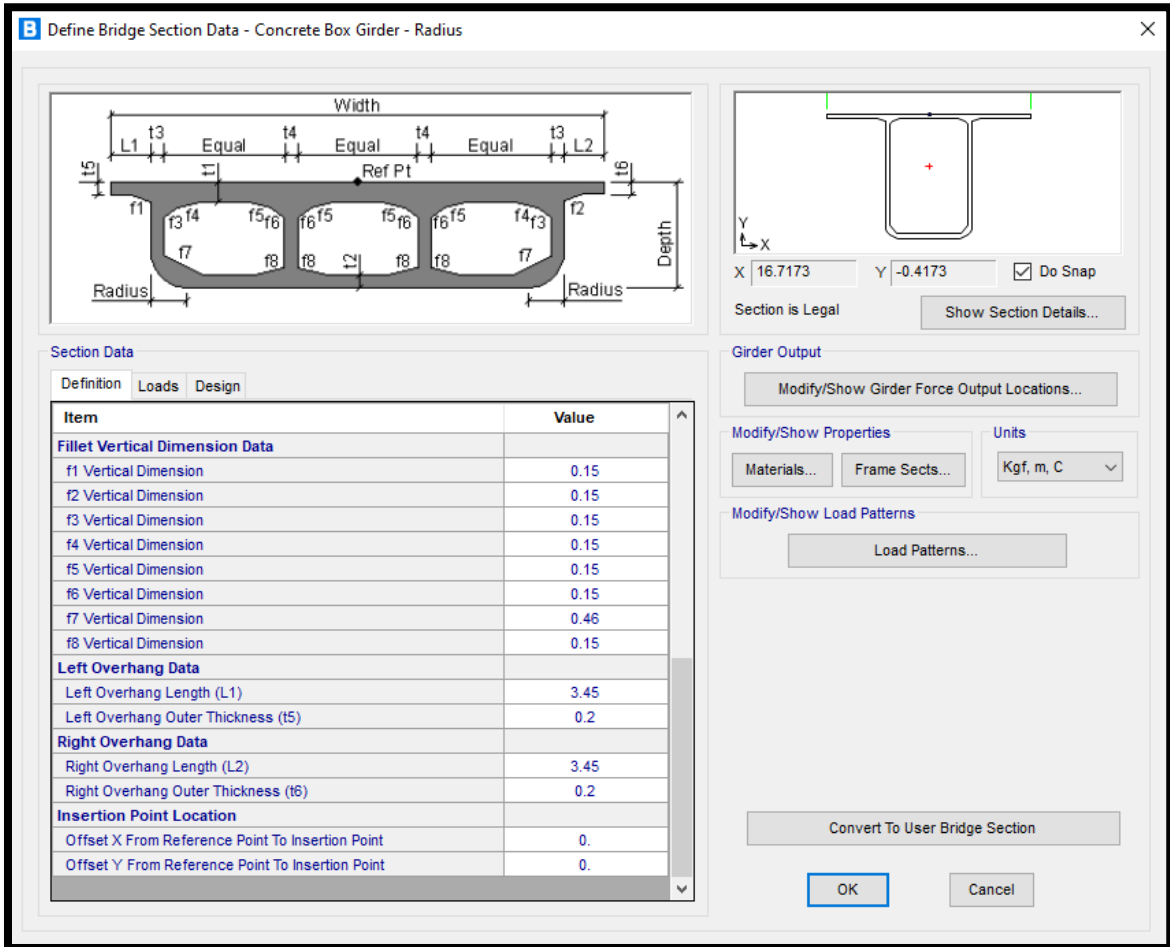
Imagen 54. Captura de pantalla de la definición de los elementos del puente

Section Data

Item	Value
General Data	
Bridge Section Name	SECCION_CAJON
Material Property	4000Psi
Number of Interior Girders	0
Total Width	11.91
Total Depth	6.98
Exterior Girder Bottom Radius	0.71
Keep Girders Vertical When Superelevate? (Area & Solid Mode...)	No
Slab and Girder Thickness	
Top Slab Thickness (t1)	0.2
Bottom Slab Thickness (t2)	0.3
Exterior Girder Thickness (t3)	0.2
Fillet Horizontal Dimension Data	
f1 Horizontal Dimension	0.46
f2 Horizontal Dimension	0.46
f3 Horizontal Dimension	0.15
f4 Horizontal Dimension	0.46
f5 Horizontal Dimension	0.46
f6 Horizontal Dimension	0.15

Fuente: Elaboración propia, 2025.

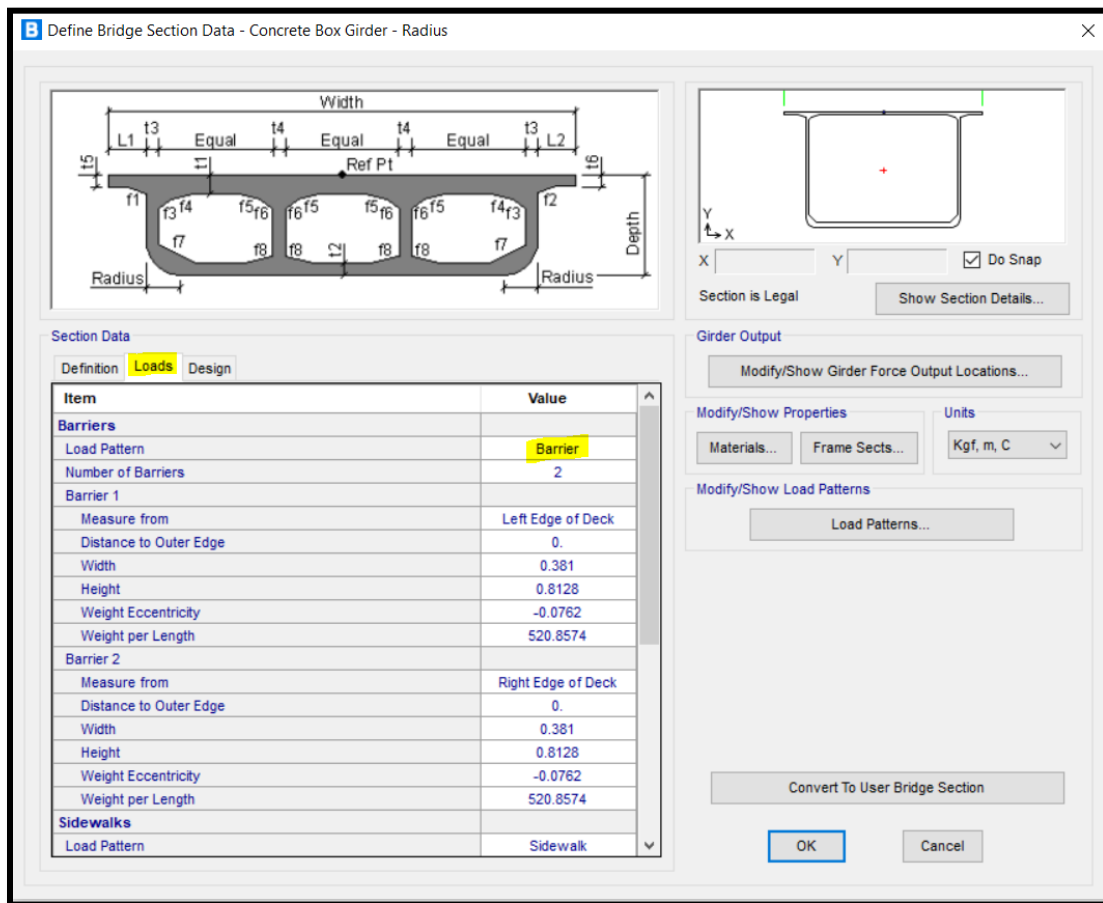
Imagen 55. Captura de pantalla de la definición de los elementos del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- En esta fase del modelado del cajón llamado “deck en el software”, modela el ancho del deck, incluyendo la acera y espaciamiento para las barandas, como el ancho de la viga, definido en los parámetros L2, L1, ancho total, y altura del cajón.

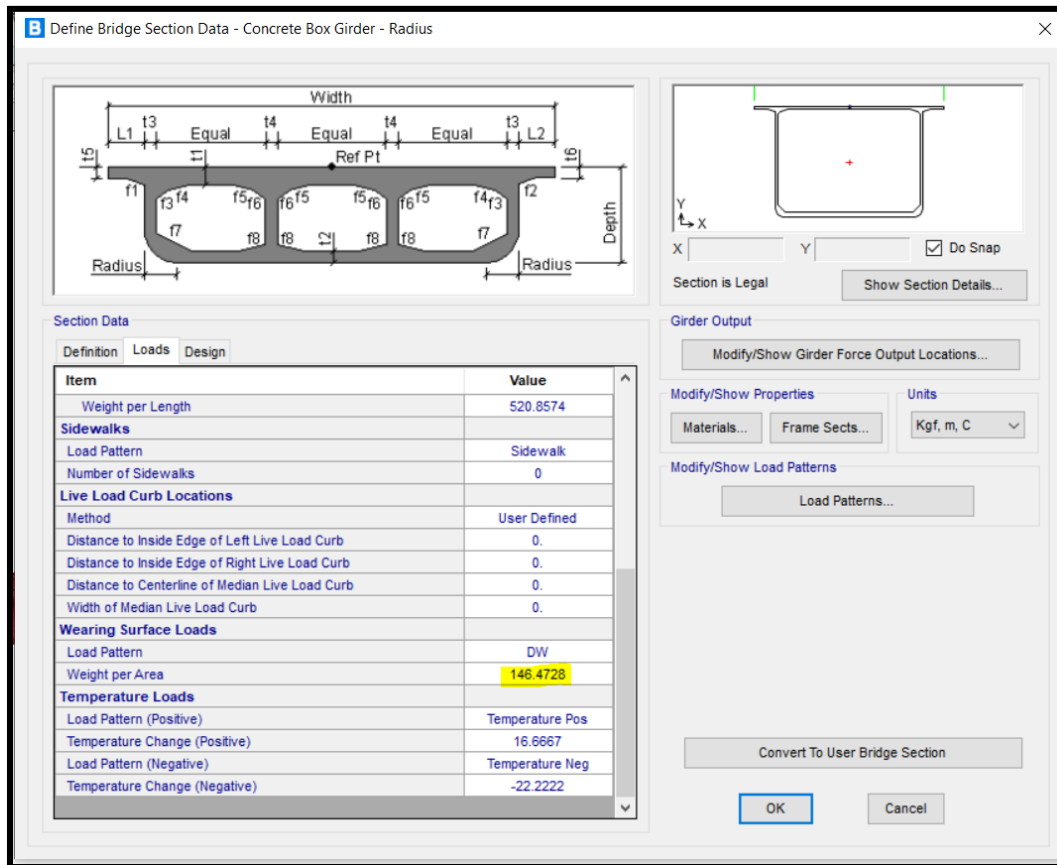
Imagen 56. Captura de pantalla del modelado del cajón del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En esta interfaz se pueden designar cargas específicas, como lo es DW, que confiere la carga específica por cargas de capa de desgaste, que permite proyectar la afectación estructural del puente por peso propio, como carga muerta y otras cargas dinámicas como paso vehicular y peatonal. Este valor lo determina el *software*, a partir de las dimensiones de la losa de concreto o rodamiento vehicular y peatonal.

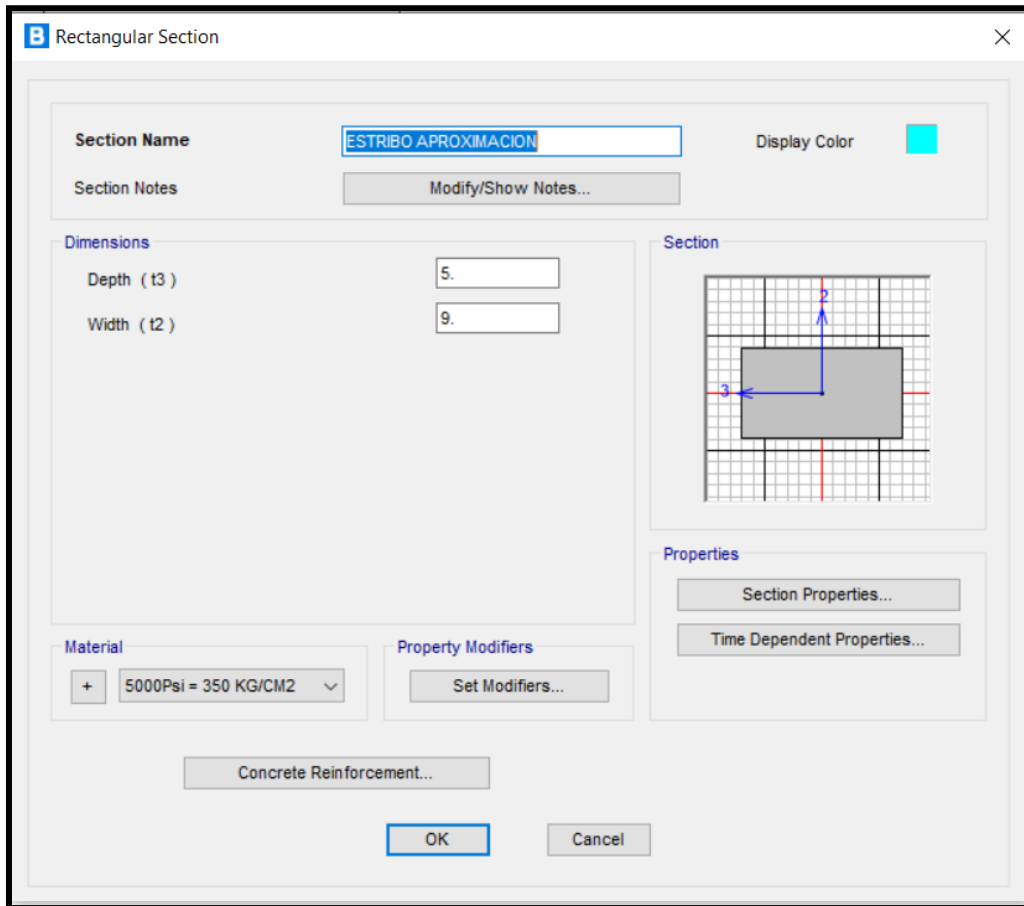
Imagen 57. Captura de pantalla del modelado del cajón del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Estribo o muro de retención (apoyo inicial y final): Los estribos de este puente se modelan conforme a información preliminar y estimada a partir del proceso fotogramétrico, donde no se pudo dimensionar de forma específica dichos elementos, y modelándose con dos dimensiones puntuales, y refiriendo una resistencia de 350 kg/cm². El elemento se dimensiona en 5 m x 9 de ancho.

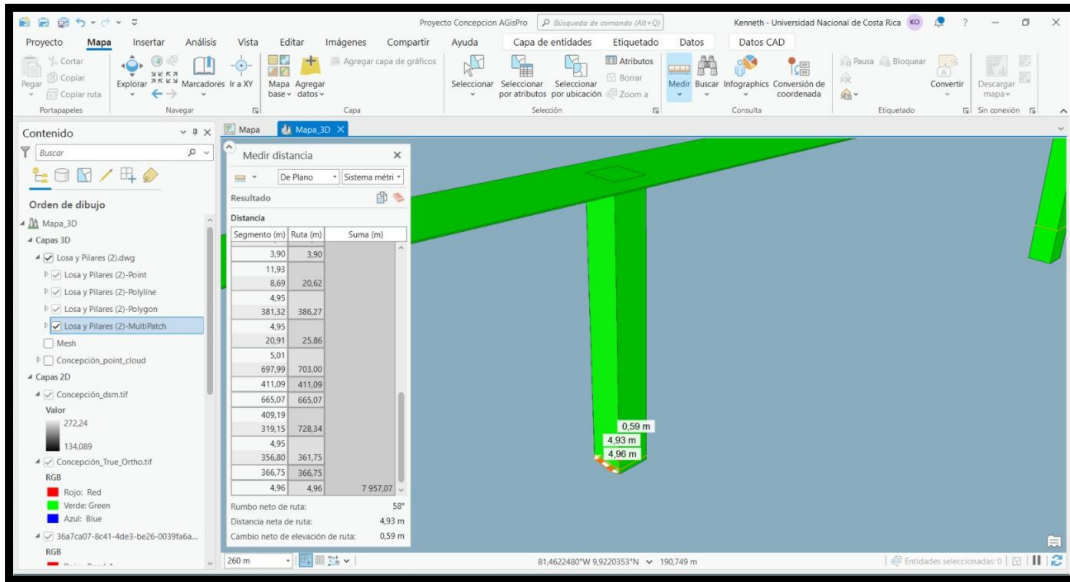
Imagen 58. Captura de pantalla del modelado del estribo o muro de retención del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

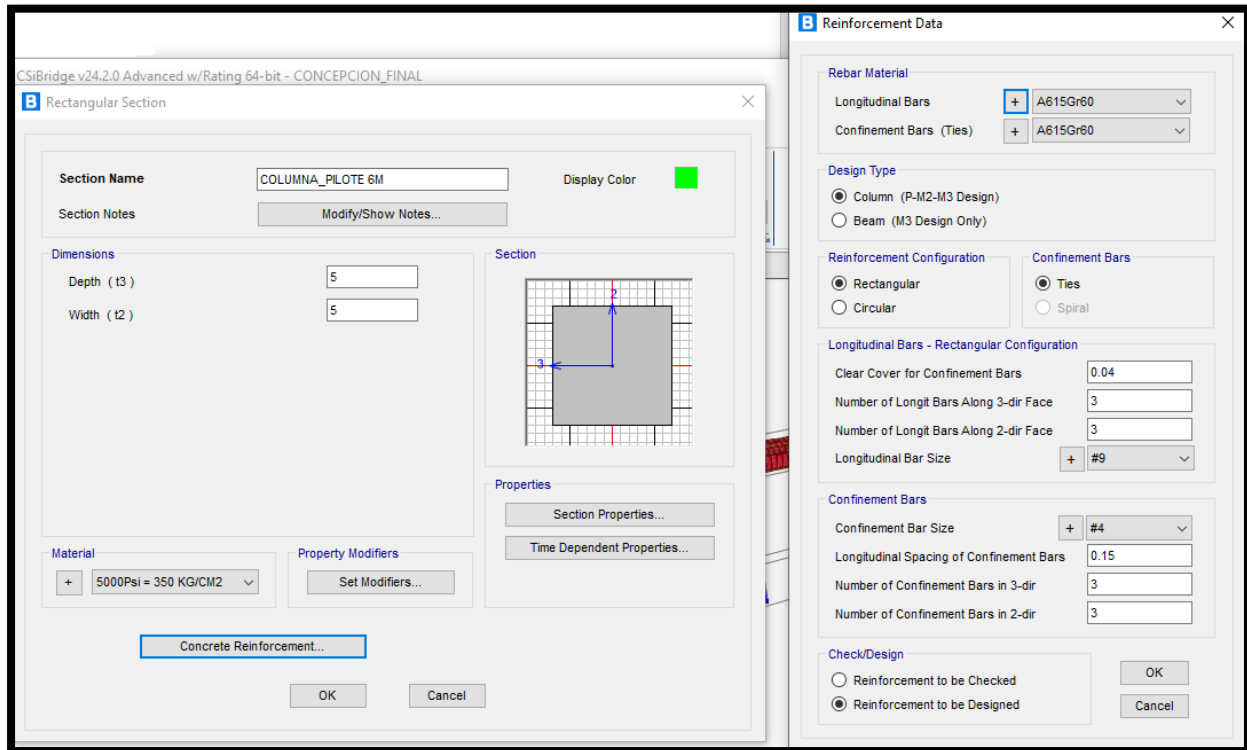
- Modulación de columnas o pilares: Los pilares del puente se dimensionan con un ancho y longitud de 5 m. por 5 m, donde la altura se define en 49 m.
- Del *software* de modelación 3D, se obtienen las dimensiones de las columnas o pilares del puente:
- Usamos 5 m de ancho por 5 metros de longitud, en sus ejes x y y.

Imagen 59. Captura de pantalla del modelado de la columna o pilar



Fuente: Elaboración propia, 2025.

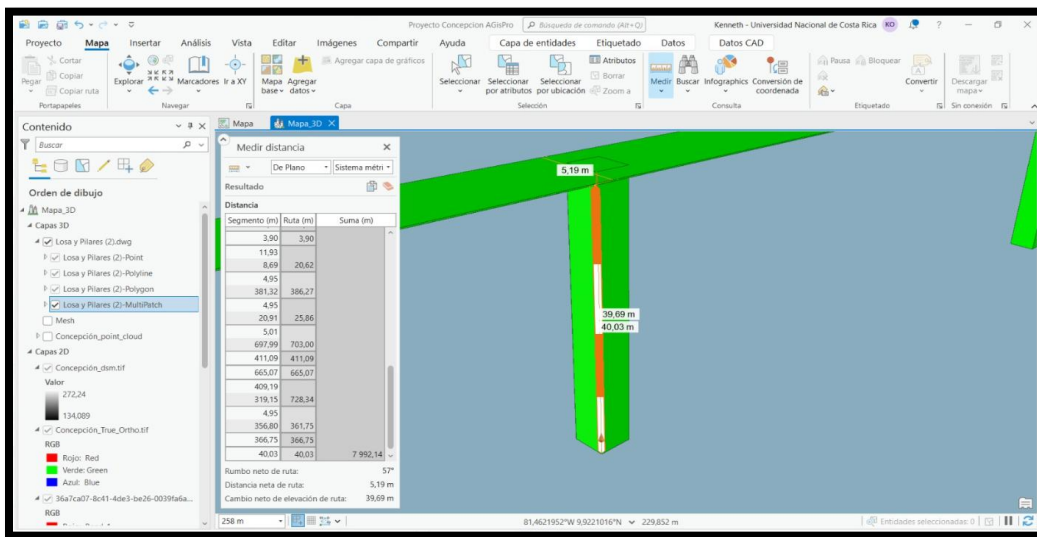
Imagen 60. Captura de pantalla del modelado de la columna o pilar



Fuente: Elaboración propia, 2025.

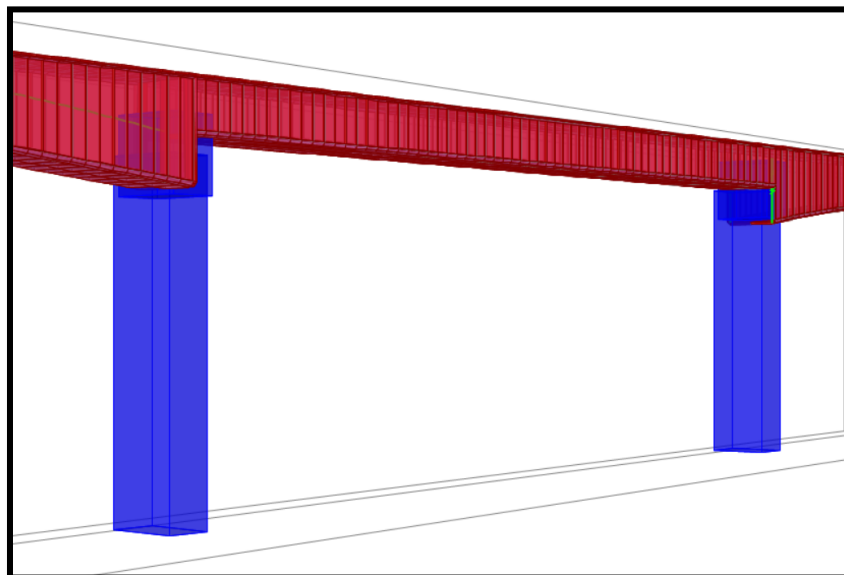
Para la longitud o altura de los pilares se define un valor de 40 m conforme al valor obtenido en el vuelo mediante equipo RPAS, siendo que no se logra un dato fiable por la vegetación existente.

Imagen 61. Captura de pantalla del modelado del pilar o columna del puente



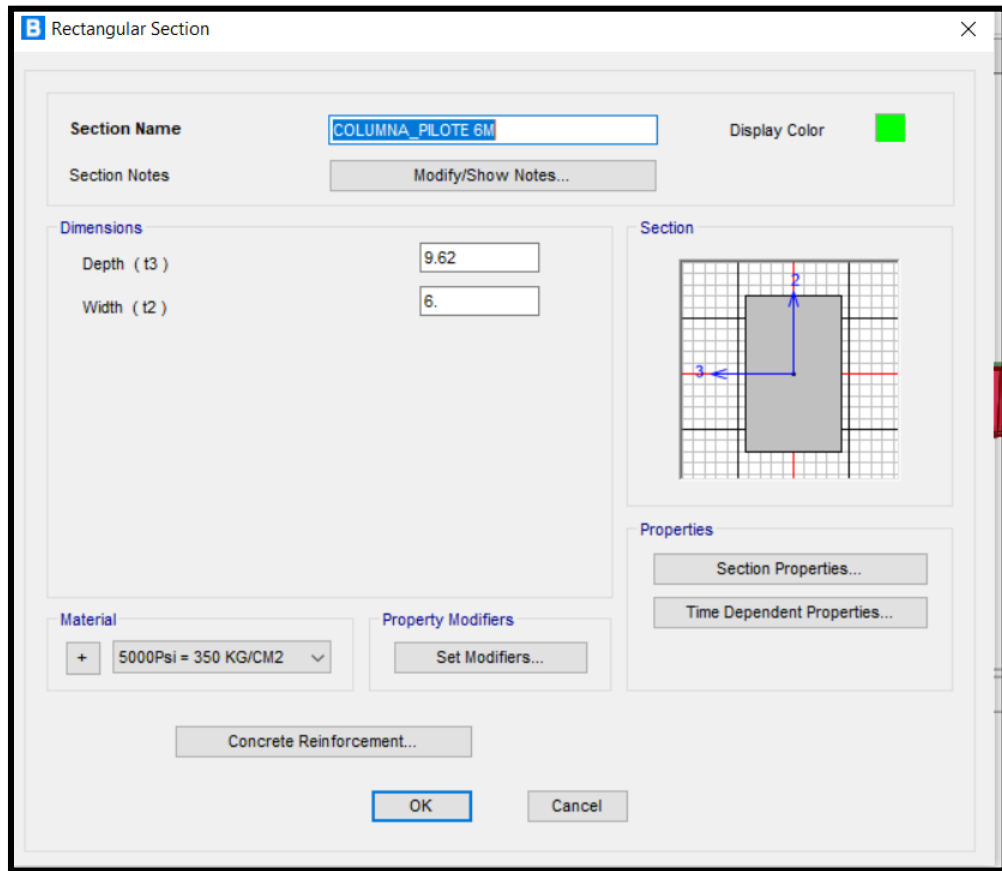
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 62. Captura de pantalla del modelado del pilar o columna del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

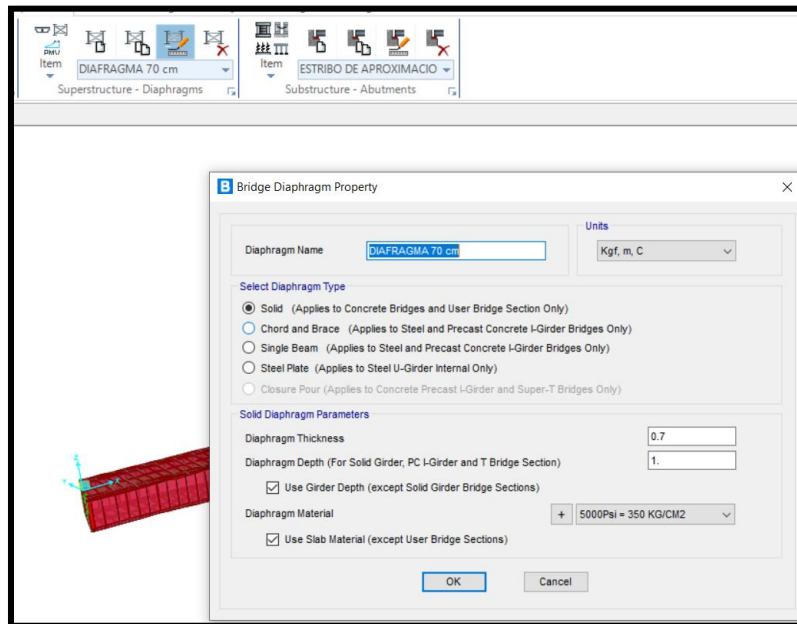
Imagen 63. Captura de pantalla del modelado del pilote del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

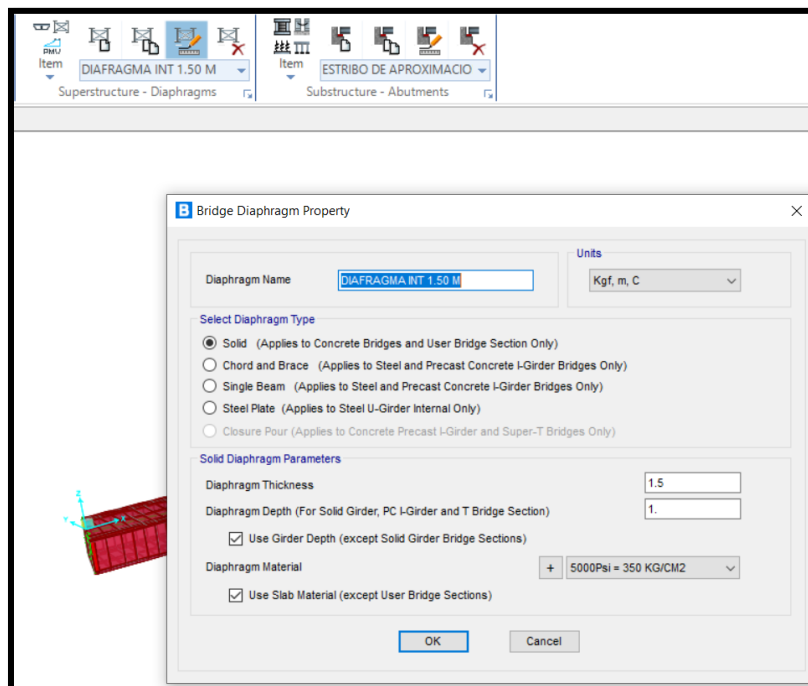
- Diafragmas: los diafragmas se integran como elementos de unión de la estructura del *deck*.

Imagen 64. Captura de pantalla del modelado del diafragma del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

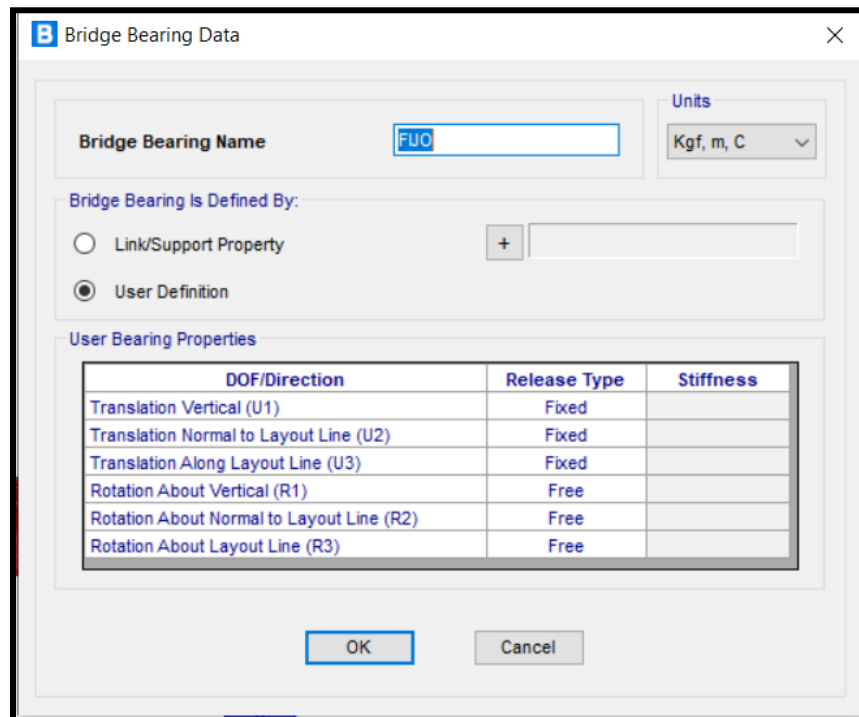
Imagen 65. Captura de pantalla del modelado del diafragma del puente



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Los apoyos se definen para las secciones de conexión con los pilares y los estribos, siendo que para pilares se modulan apoyos fijos mientras que para los estribos de ubican apoyos móviles.
 - Apoyo fijo: este apoyo refiere su empotramiento en todos sus extremos.

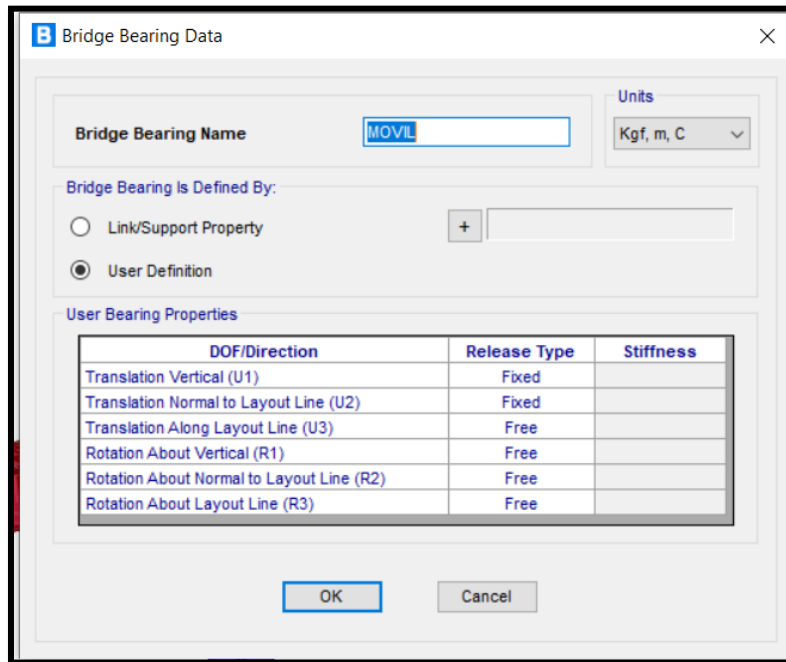
Imagen 66. Captura de pantalla del modelado del apoyo fijo



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Apoyo móvil: el apoyo móvil refiere un empotramiento no definido para la longitud del sentido de carriles del puente, no siendo así para su traslación vertical.

Imagen 67. Captura de pantalla del modelado del apoyo móvil



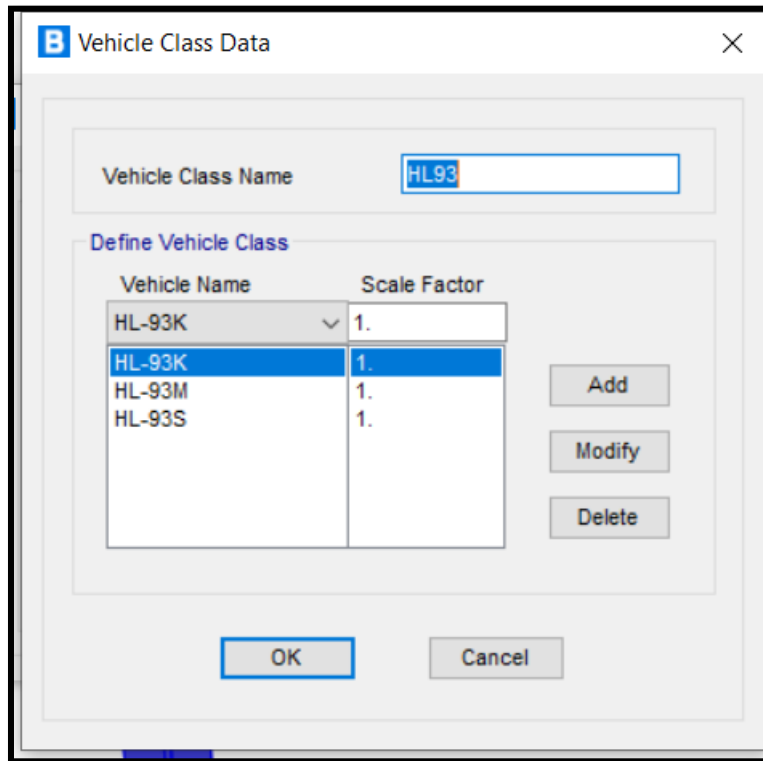
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Definición de cargas según AASHTO

- Tipo de vehículos de referencia

Se define como combinación de cargas, la del HL-93 del AASTHO, con referencia a las condiciones más críticas por carril.

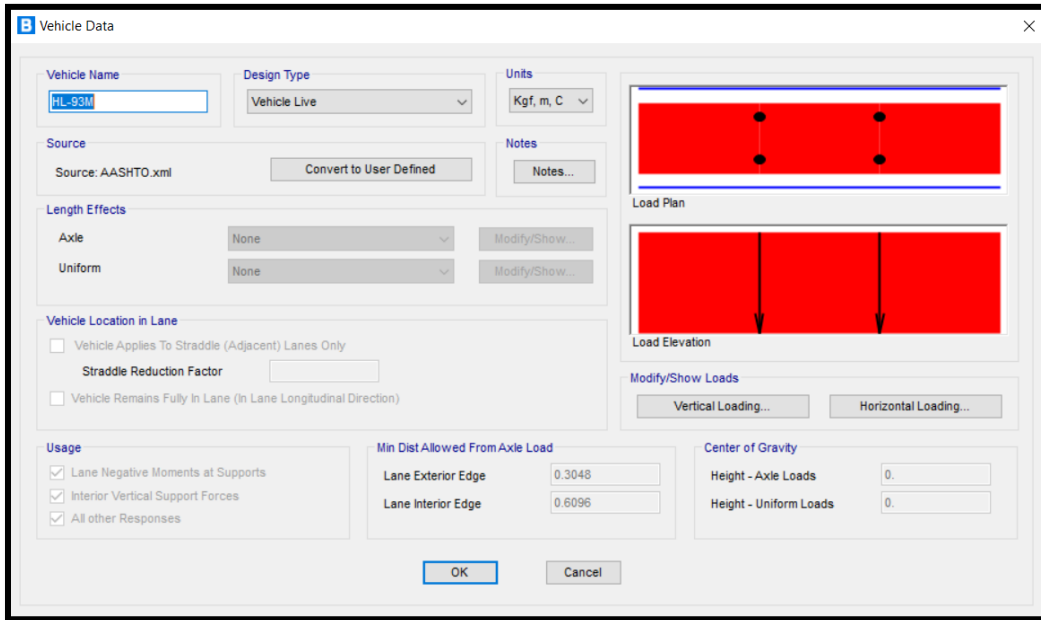
Imagen 68. Captura de pantalla de la definición de cargas



Fuente: Elaboración propia, 2025.

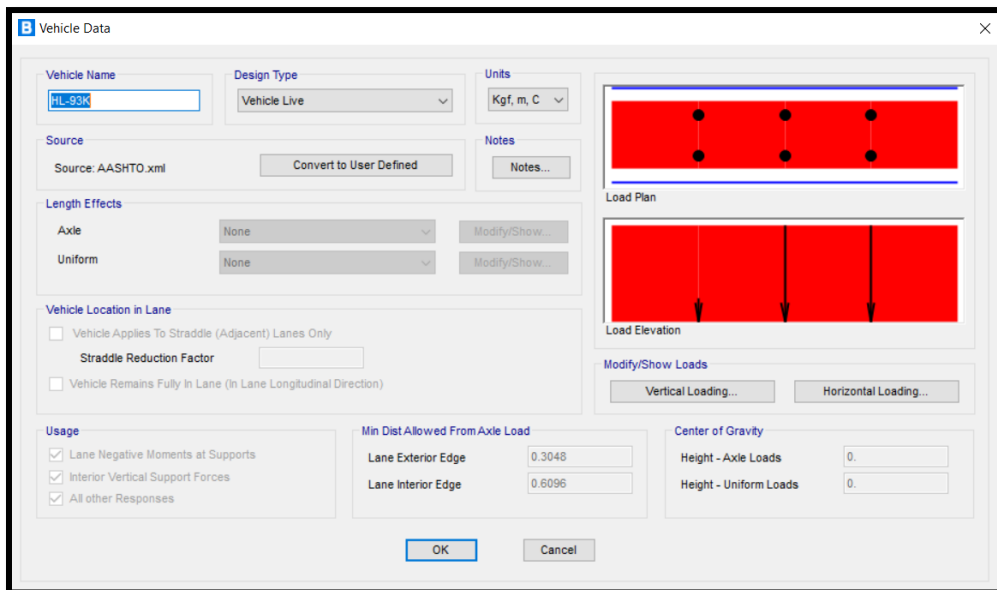
Las clases vehiculares de las cargas utilizadas son del grupo HL-93, corresponden a HL-93K, HL-93M, y HL-93S.

Imagen 69. Captura de pantalla de las clases de cargas utilizadas



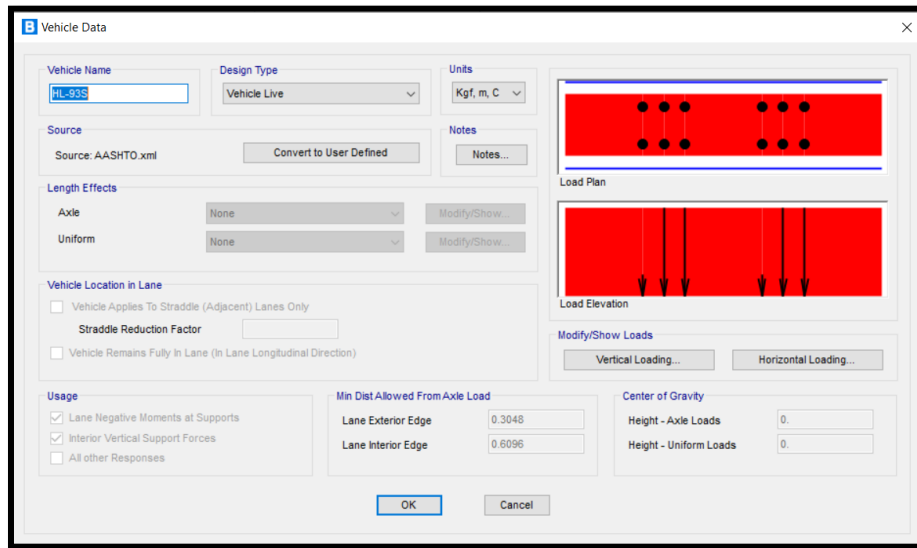
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 70. Captura de pantalla de las clases de cargas utilizadas



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 71. Captura de pantalla de las clases de cargas utilizadas



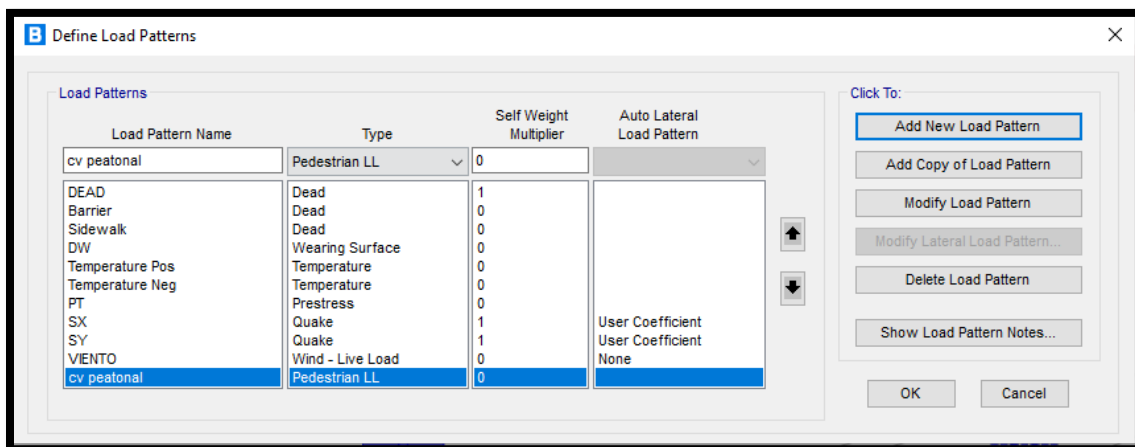
Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Patrones de carga

En cuanto a los patrones de carga definidos para el modelado de las cargas totales aplicadas sobre el puente, se tiene:

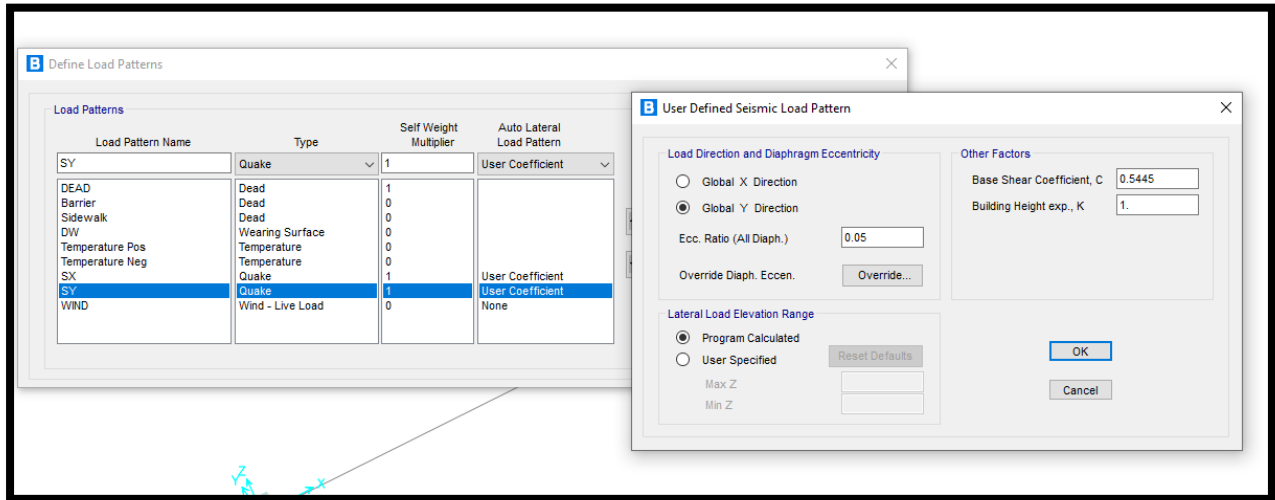
- 1- Carga muerta
- 2- Carga muerta (barandas)
- 3- Cargas por superficie de desgaste (DW)
- 4- Carga de postensado

Imagen 72. Captura de pantalla de los patrones de cargas



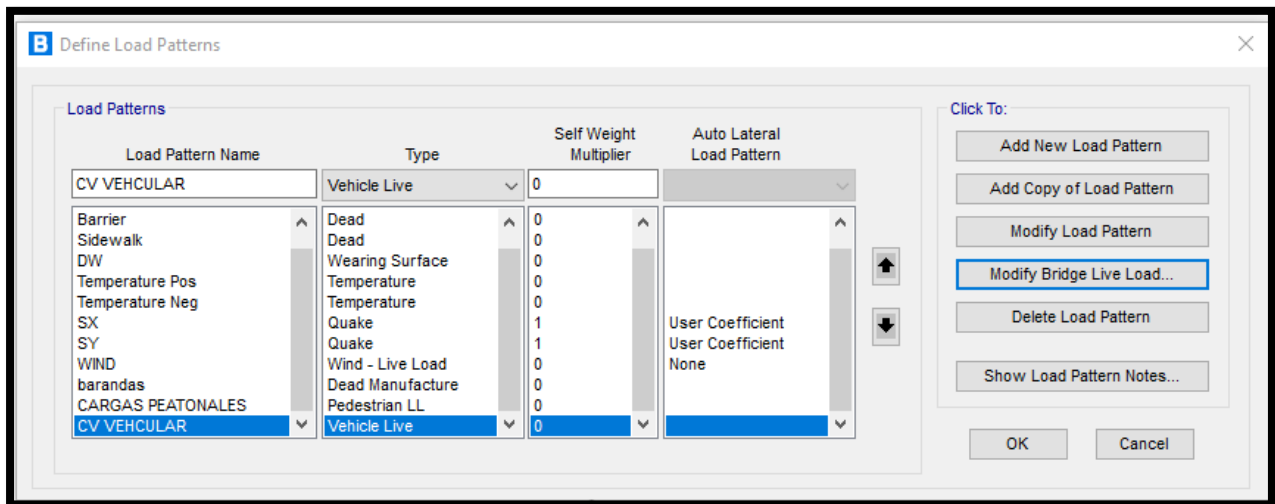
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 73. Inclusión de coeficiente sísmico



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 74. Inclusión de cargas vivas vehiculares

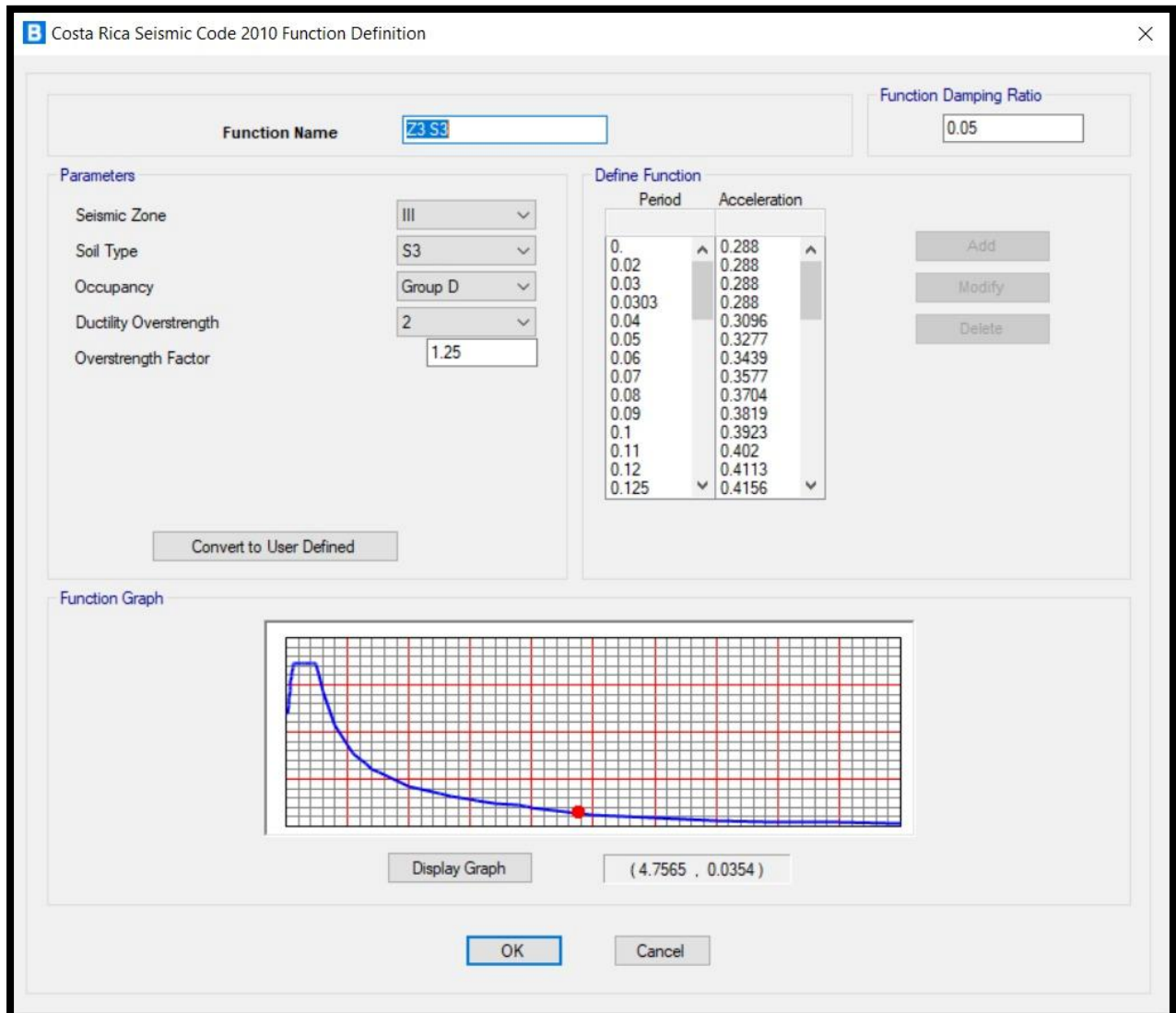


Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Configuración conforme al Código Sísmico de Costa Rica

Esta configuración se estima conforme a la situación de ubicación del puente y las referencias geológicas del sitio, así como la importancia de la estructura.

Imagen 75. Captura de pantalla de la configuración de acuerdo con el Código Sísmico



Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Inclusión del espectro de respuesta: el espectro determinado para el modelado se refiere conforme a los coeficientes sísmicos espectrales C_a y C_v , para el sitio y condiciones sísmicas de la zona.

Cálculo del coeficiente sísmico:

Según refiere el CSCR 2010, se estima para calcular el coeficiente sísmico, mediante la siguiente fórmula:

$$C = a_{ef} * I * FED / SR$$

$$T = \text{FACTOR} * N = 2 * 1 = 2$$

SR: factor de sobrerresistencia= 2

μ : 2, para un Sistema Marco, tipo dual.

Tabla 9: Ductilidad global asignada según Capítulo 4, CSCR2010

<i>Sistema estructural tipo marco</i>					
Tipo	Regular	<i>Irregular moderado</i>	<i>Ductilidad local óptima</i>	<i>Ductilidad local moderada</i>	<i>Ductilidad global asignada</i>
marco a	X		X		6.0
marco b	X			X	3.0
marco c		X	X		3.0
marco d		X		X	2.0
<i>Sistema estructural tipo dual</i>					
Tipo	Regular	<i>Irregular moderado</i>	<i>Ductilidad local óptima</i>	<i>Ductilidad local moderada</i>	<i>Ductilidad global asignada</i>
dual a	X		X		4.0
dual b	X			X	3.0
dual c		X	X		3.0
dual d		X		X	2.0
<i>Sistema estructural tipo muro</i>					
Tipo	Regular	<i>Irregular moderado</i>	<i>Ductilidad local óptima</i>	<i>Ductilidad local moderada</i>	<i>Ductilidad global asignada</i>
muro a	X		X		3.0
muro b	X			X	2.0
muro c		X	X		2.0
muro d		X		X	1.5
<i>Sistema estructural tipo voladizo</i>					
Tipo	Regular	Irregular	<i>Ductilidad local óptima</i>	<i>Ductilidad local moderada</i>	<i>Ductilidad global asignada</i>
voladizo a	X		X		1.5
voladizo b	X			X	1.0
voladizo c		X	X		1.0
voladizo d		X		X	1.0
<i>Sistema estructural tipo otros</i>					
Tipo	Regular	Irregular	<i>Ductilidad local óptima</i>	<i>Ductilidad local moderada</i>	<i>Ductilidad global asignada</i>
otros a	X		X		1.0
otros b	X			X	1.0
otros c		X	X		1.0
otros d		X		X	1.0

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010.

a- Aceleración pico-efectiva: 0.605 (conforme al Manual de Lineamiento para el diseño sismorresistente de puentes)

Tabla 10. Coeficientes sísmicos espectrales

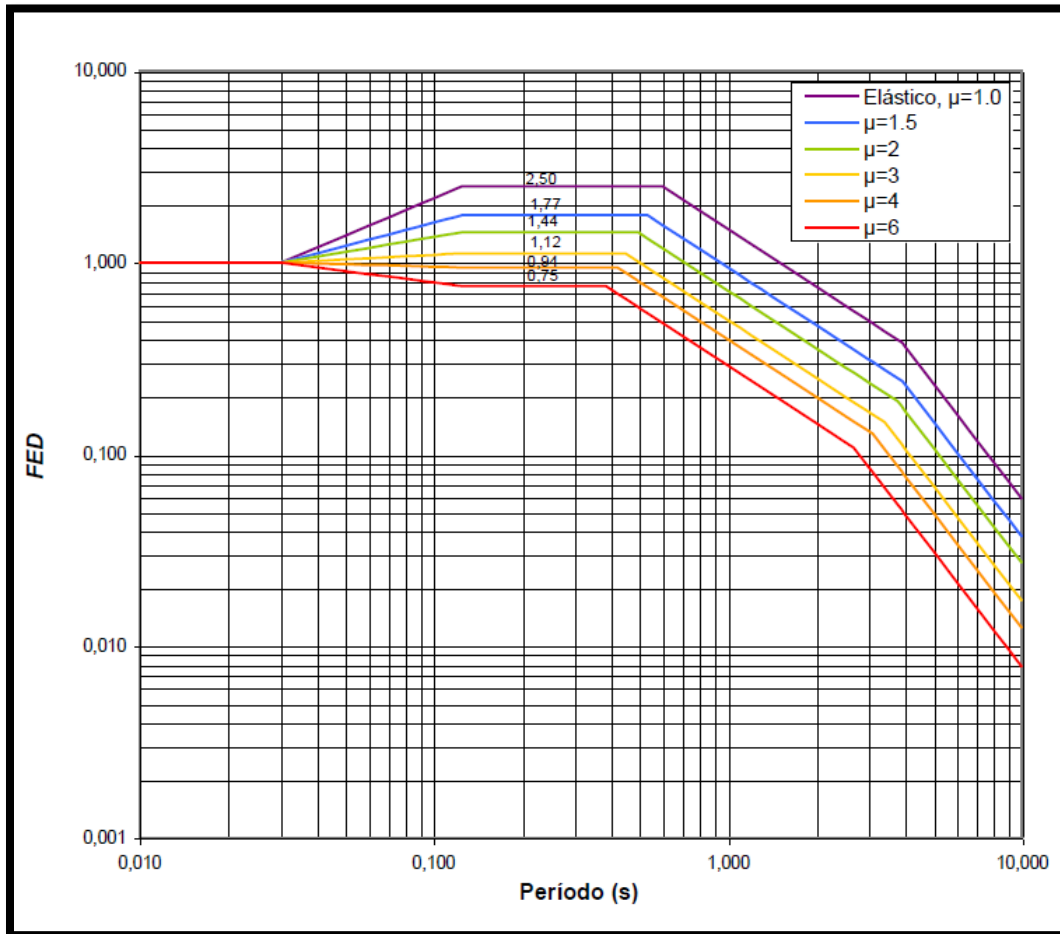
Coeficientes sísmicos espectrales	C_s			C_v		
	Zona de amenaza sísmica					
	II	III	IV	II	III	IV
S_1	0.240	0.360	0.480	0.240	0.360	0.480
S_2	0.278	0.374	0.480	0.374	0.518	0.634
S_3	0.317	0.410	0.490	0.461	0.605	0.730
S_4	0.360	0.367	0.432	0.730	0.922	1.152

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010.

b- Periodo fundamental T (Tabla 7.4, CSCR 2010: $T \cdot N = 2 \cdot 1 = T = 2$)

c- FED= 1.44, GRÁFICO FIGURA 5.7 DEL cscr2010

Imagen 76. Figura 5.7 Factor Espectral Dinámico del CSCR2010



Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, (2010)

d- Definición de la clasificación de edificaciones según importancia, tabla 4.1 del CSCR2010.

Tabla 11. Clasificación de edificaciones

Grupo	Descripción	Ocupación o función de la edificación	Factor <i>I</i>	Factor <i>I_p</i>
A	Edificaciones e instalaciones esenciales	Hospitales e instalaciones que poseen áreas de cirugía o atención de emergencias. Estaciones de policía y bomberos. Garajes y refugios para vehículos o aviones utilizados para emergencias. Instalaciones y refugios en centros de preparación para emergencias. Terminales aeroportuarias y torres de control aéreo. Edificaciones y equipo en centros de telecomunicaciones y otras instalaciones requeridas para responder a una emergencia. Generadores de emergencia para instalaciones pertenecientes al grupo A. Tanques de almacenamiento de agua y productos esenciales. Estructuras que contienen bombas u otros materiales o equipo para suprimir el fuego.	1.25	1.50

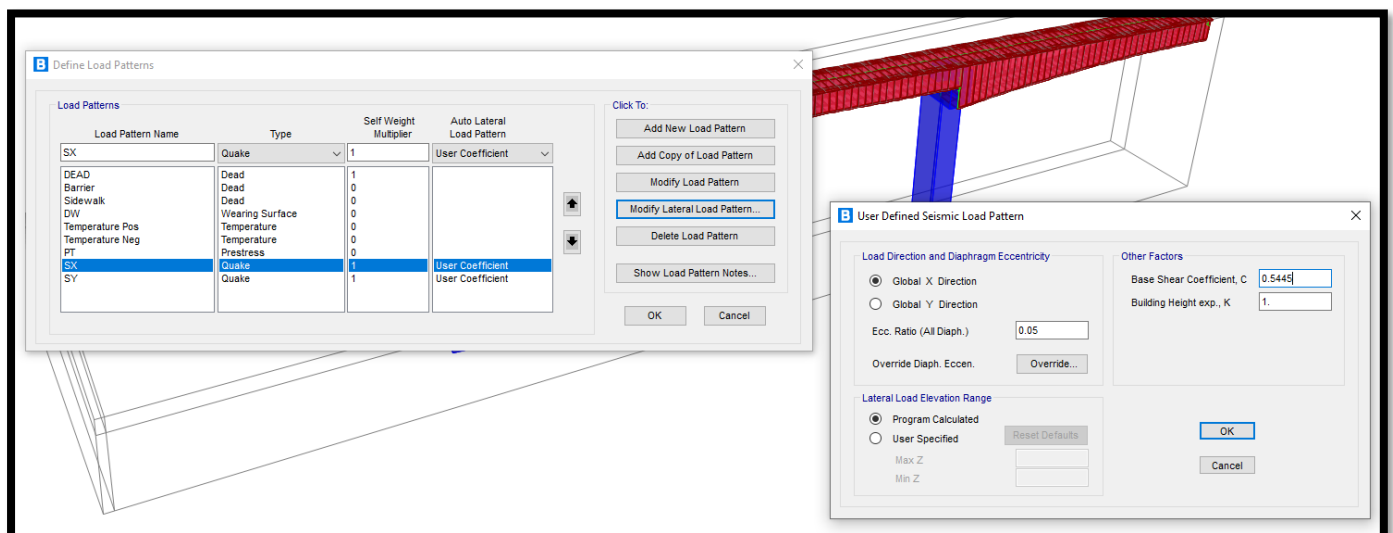
Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010.

$$I = 1.25$$

$$\text{Coeficiente sísmico: } C = a \cdot e_f \cdot I \cdot \text{FED} / \text{SR} = 0.605 \cdot 1.25 \cdot 1.44 / 2 = 0.5445$$

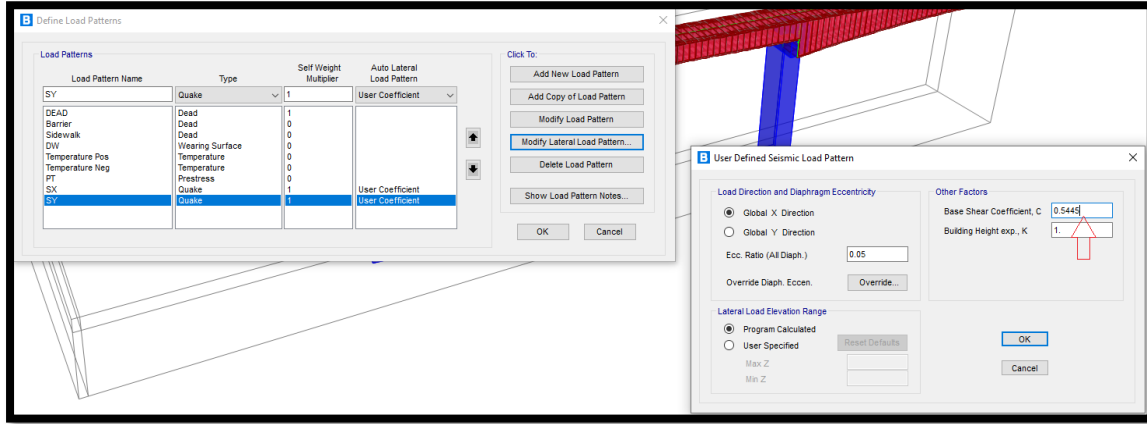
El coeficiente sísmico deberá incluirse en la función de cargas sísmicas para los ejes X y Y de la estructura.

Imagen 77. Captura de pantalla de la inclusión de las cargas



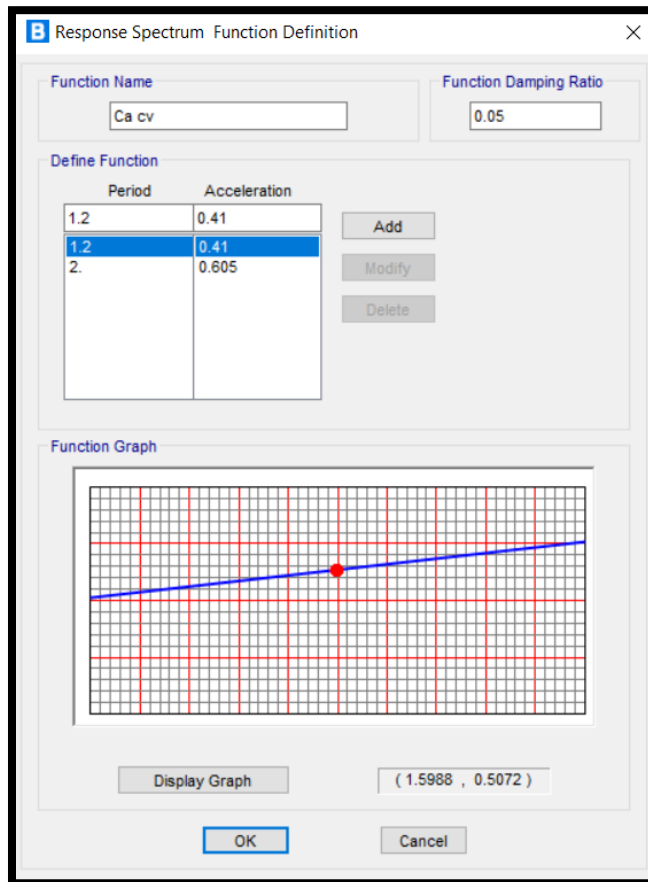
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 78. Captura de pantalla de la inclusión del coeficiente “C”



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 79. Captura de pantalla de la inclusión del espectro de respuesta

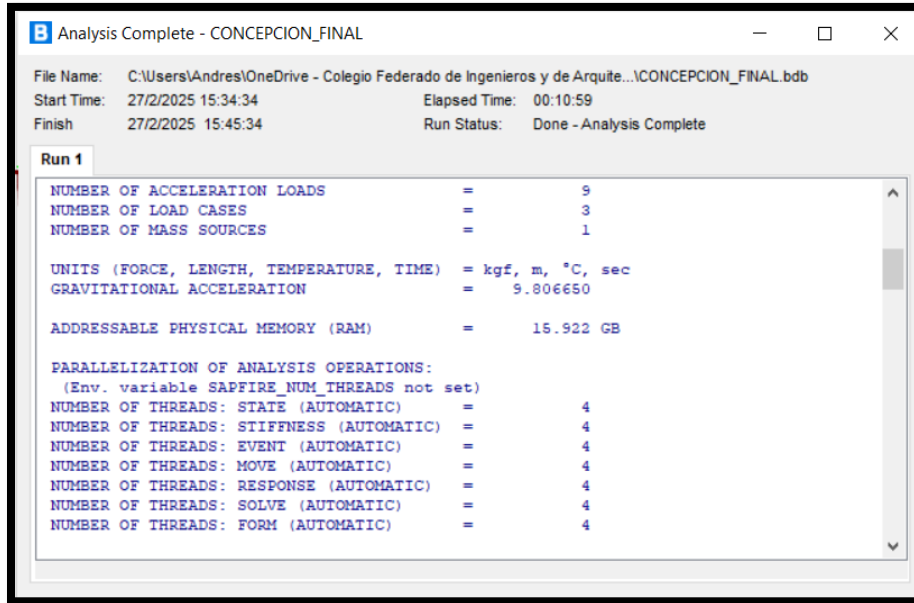


Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Proceso de análisis “corrida del modelo”

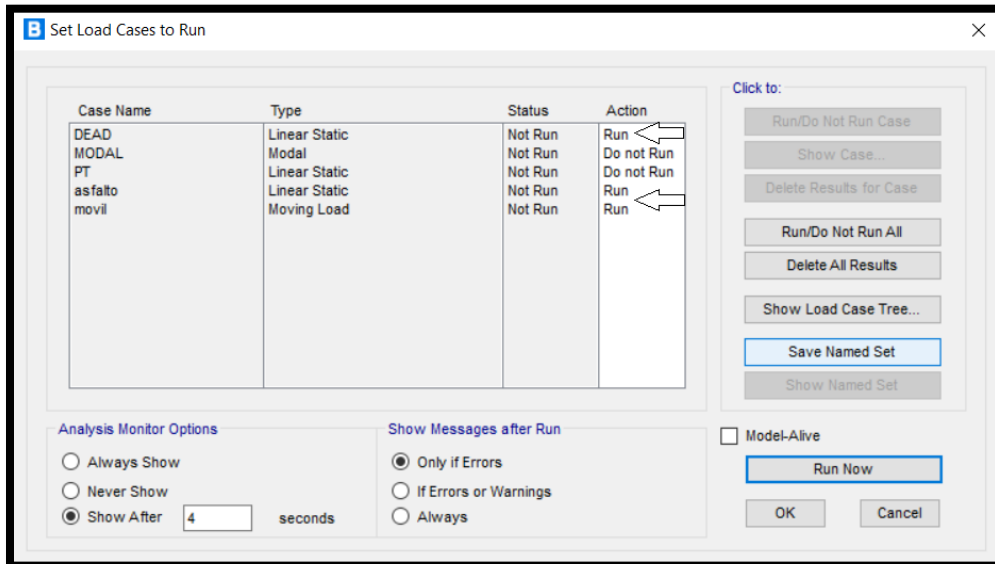
Una vez que se diseña el modelo se procede a modelar o correr el diseño aplicando los casos de carga muerta, cargas por asfalto y carga móvil.

Imagen 80. Captura de pantalla de la inclusión del espectro de respuesta



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 81. Captura de pantalla del análisis de las cargas utilizadas para la corrida del modelo

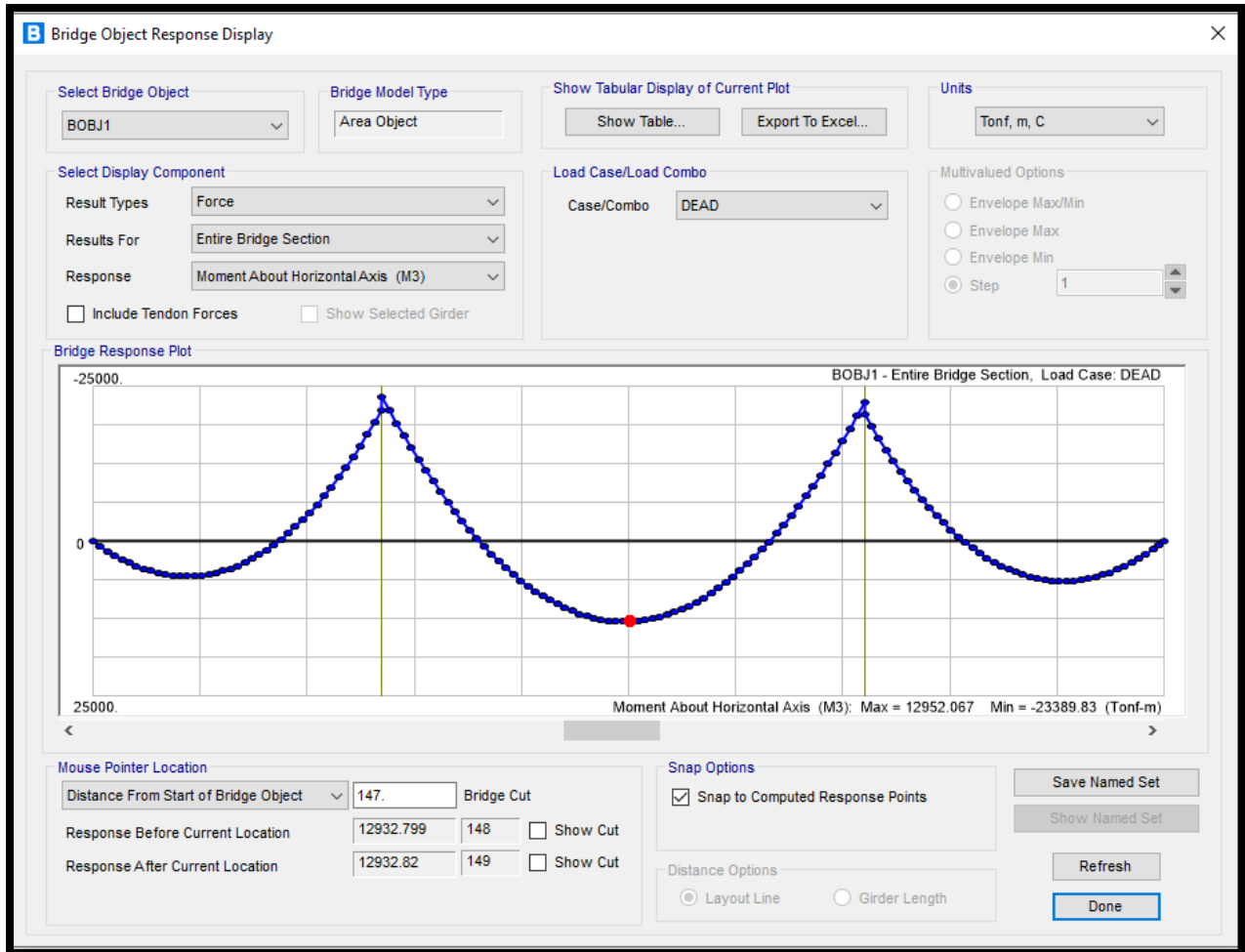


Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Análisis de resultados obtenidos

En la Imagen 82 se puede observar que, para momento máximo, respecto a la carga muerta, a partir del modelo se obtiene un valor de 12952.067 tonf-m, siendo esto en el vano más largo del puente o el tramo central.

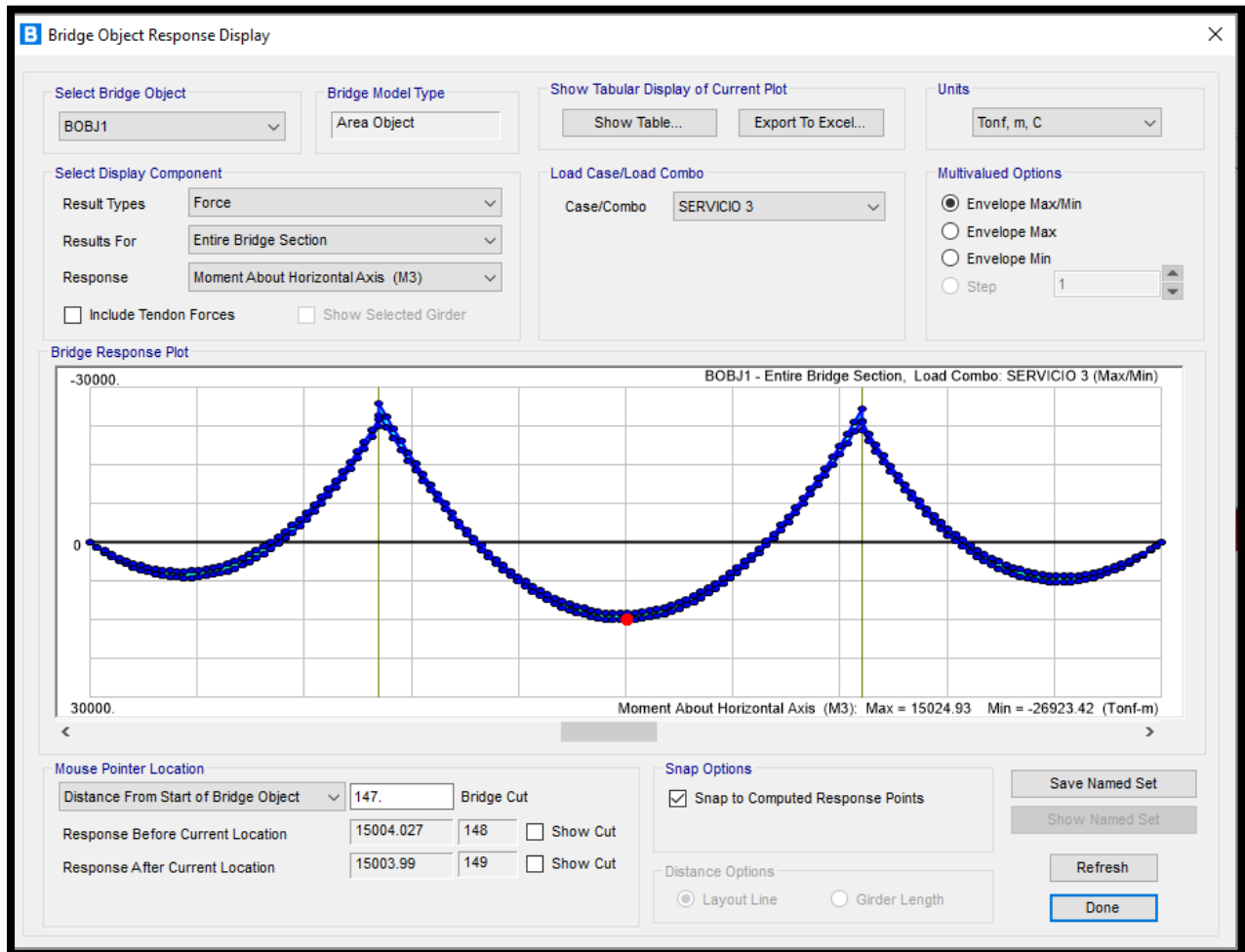
Imagen 82. Captura de pantalla del análisis de resultados para las cargas muertas



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Para la modelación relacionada con la situación de servicio del puente o cargas móviles, se obtiene un valor del momento máximo en el vano central del puente o el más extenso, de -23389.83 tonf-m.

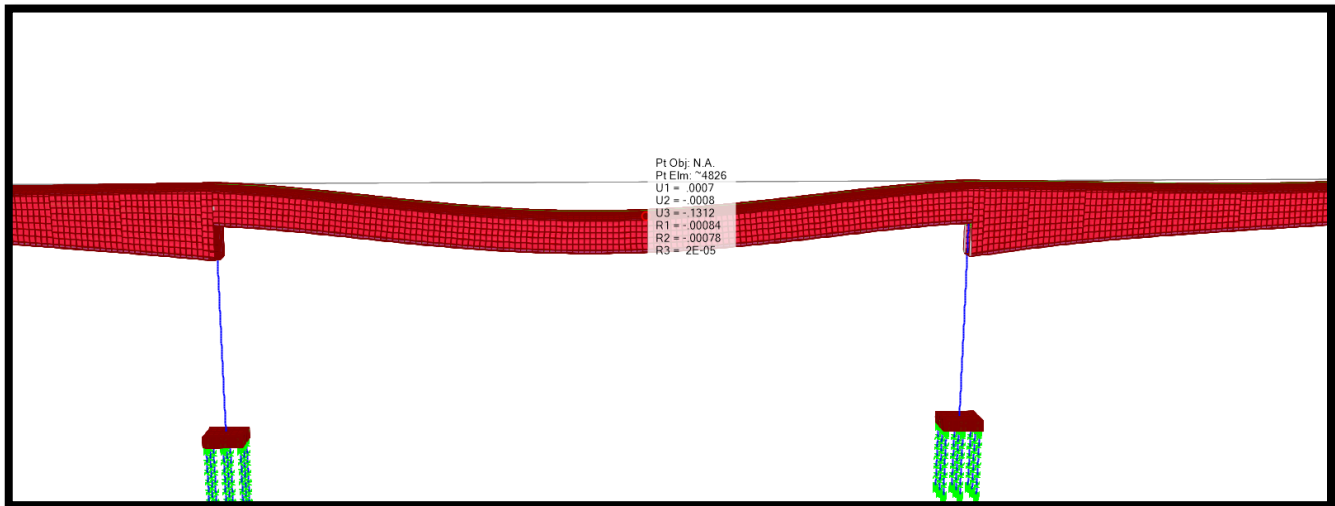
Imagen 83. Captura de pantalla del análisis de resultados para las cargas móviles



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la siguiente imagen adjunta se demuestra el resultado correspondiente:

Imagen 84. Captura de pantalla de los resultados de la deflexión generados por el *software*



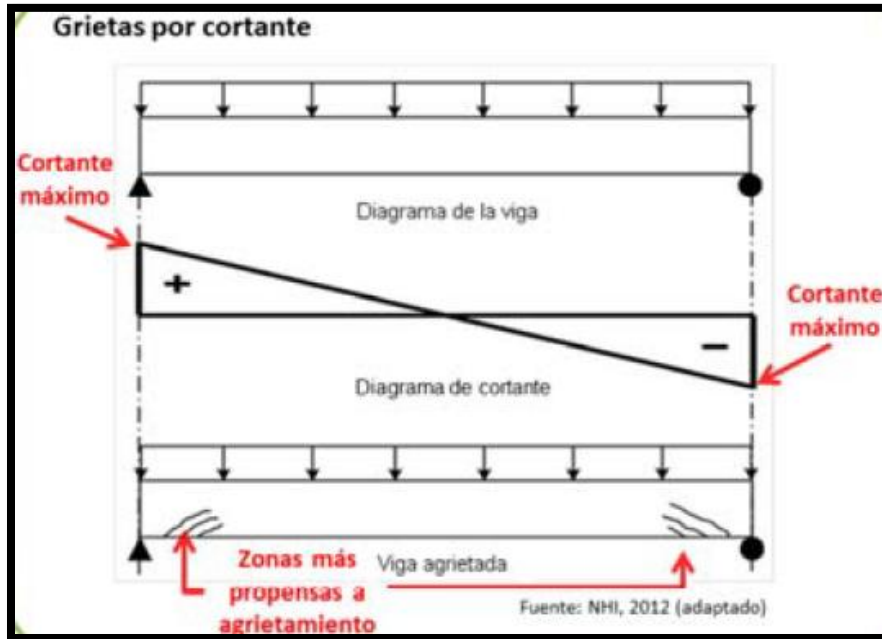
Fuente: Elaboración propia, 2025.

- Comparación de resultados versus inspección de campo:

Al realizar el modelado del puente, mediante la simulación de este en el *software* CSI BRIDGE, y en contraste con la inspección realizada, se puede determinar que las afectaciones principales en la estructura del puente se integran con la teoría de evaluación de momentos flectores y momentos cortantes.

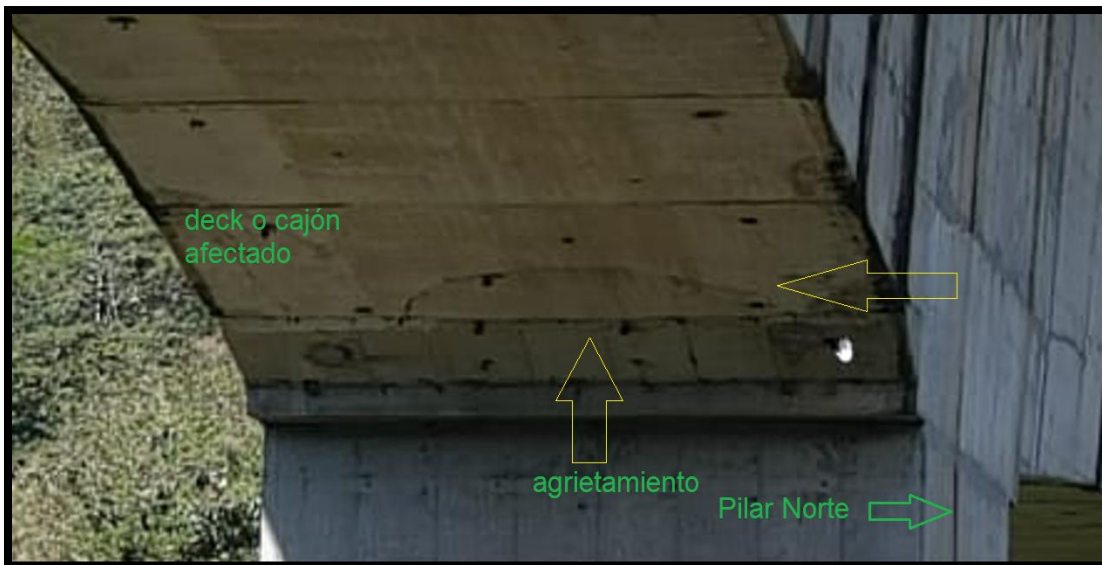
Nótese que el momento cortante se refiere en los apoyos, afectando el sector inmediato a estos, de aquí y de los resultados obtenidos se contrasta la afectación que tiene más representación respecto a la inspección realizada mediante equipo RPAS, corresponde al *deck* inmediato a la columna o pilar norte, aplicándose la teoría específica del caso.

Imagen 85. Captura de pantalla situación de la reacción por cortante en apoyos



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Imagen 86. Fotografía de inspección mediante equipo RPAS



Fuente: Elaboración propia, 2025.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se detallan las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo del presente estudio.

Conclusiones

- El CSI Bridge es un *software* muy completo y avanzado de modelado estructural el cual se utiliza para diseñar, analizar y modelar puentes. La capacidad de este *software* permite integrar datos de diferentes fuentes, lo que lo hace muy robusto en proyectos de inspección, análisis y modelación estructural de puentes, razón fundamental por la cual se decidió utilizarlo en este proyecto.
- La toma de datos se realizó con el dron DJI Mavic 3 Enterprise RTK, el cual es capaz de generar una nube de puntos. No obstante, para este caso específico, el *software* no permitió incorporar datos obtenidos del dron para realizar el modelo digital del puente, probablemente debido a la incompatibilidad de formatos o limitaciones técnicas del *software* para procesar directamente este tipo de datos. Por lo tanto, se recurrió al uso de RealWorks, un *software* especializado en la gestión y procesamiento de nubes de puntos. Este *software* permitió limpiar, ajustar y transformar la nube de puntos en un formato que pudiera ser importado y utilizado en el CSI Bridge, facilitando así la creación de un modelo 3D más preciso del puente.
- Las patologías constructivas en puentes incluyen defectos como grietas, corrosión, deformaciones, entre otros, que afectan la integridad estructural del puente. Para detectarlas con mayor precisión, es necesario utilizar *software* especializado en el procesamiento de nubes de puntos generadas por escáneres láser 3D, como el Cyclone de Leica. Este *software* permite un análisis detallado de las nubes de puntos y puede identificar de forma más precisa pequeñas irregularidades o defectos en la estructura del puente que podrían ser pasados por alto mediante una simple inspección visual. Este tipo de *software* es altamente efectivo para la inspección de infraestructuras complejas, donde es necesario realizar una evaluación exhaustiva y exacta de cada componente estructural.

- El dron utilizado (Mavic 3 Enterprise RTK), aunque es tecnología moderna y robusta, no cuenta con la capacidad de capturar información debajo del puente, ya que no está equipado con tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*). El LiDAR es un sistema de escaneo láser que permite capturar detalles de la superficie de los objetos, incluso en lugares de difícil acceso, como debajo de un puente. Sin el LiDAR, el dron no puede obtener datos de esas áreas ocultas, lo que genera deficiencias en el modelado completo del puente. Esto significa que, aunque el dron puede ser muy útil para la inspección visual y la captura de datos en áreas visibles, no proporciona un análisis completo de toda la estructura. Por ello fue necesaria la búsqueda de *softwares* alternativos (RealWorks) que permitieran el modelado de la nube de puntos obtenida.
- El dron se utilizó inicialmente para realizar una inspección visual de la estructura del puente, lo que permitió identificar posibles patologías constructivas a simple vista, como grietas, corrosión o deformaciones. Gracias a la alta resolución de las cámaras del dron, se logró obtener imágenes detalladas que permitieron identificar zonas que requerían atención, sin necesidad de intervención directa en el lugar. La inspección visual con el dron es una herramienta muy útil en la detección inicial de problemas, pero tiene limitaciones en cuanto a la precisión y la capacidad para detectar defectos más pequeños o internos.
- Uno de los beneficios más importantes del dron es su capacidad para acceder a lugares de difícil acceso, como zonas elevadas o estructuras complejas, donde sería muy difícil o peligroso para un inspector humano llegar. Sin embargo, a pesar de esta ventaja, el dron también enfrenta limitaciones. Por ejemplo, en puentes con obstrucciones físicas, como cables, árboles, vegetación abundante u otras estructuras cercanas, la visibilidad y el acceso pueden verse comprometidos, lo que impide realizar una inspección detallada de todas las áreas del puente. En estos casos, la inspección con dron puede no ser suficiente para obtener una evaluación completa y podría requerir el uso de otros métodos de inspección, como la inspección manual o el uso de cámaras especializadas.

- El CSI Bridge permitió realizar el modelado de los componentes principales del puente, como vigas, columnas, tablero y otros elementos esenciales de la superestructura. Este modelado es crucial para realizar un análisis estructural simplificado, es decir, evaluar cómo se comportan esos elementos bajo diferentes cargas y condiciones, como el tráfico vehicular y factores climáticos. Aunque el análisis realizado fue simplificado, es suficiente para obtener una idea general de la capacidad de carga y la estabilidad estructural del puente. Es importante destacar que la superestructura es una de las partes más críticas del puente, ya que es la que soporta el peso y las tensiones.
- Del análisis de estructuras mediante la tecnología RPAS se infiere adicionalmente que el profesional encargado de este proceso sea capaz técnicamente de abordar las patologías que afectan los materiales de los que se construyen los puentes, siendo este insumo esencial en un adecuado proceso de inspección de puente, que maximiza el tiempo de análisis en campo y oficina y aporta fiabilidad al trabajo de inspección realizado.

Recomendaciones

- Adopción de tecnología LiDAR para una captura más precisa: Se recomienda explorar el uso de drones equipados con tecnología LiDAR para futuras inspecciones de puentes. Esta tecnología tiene la capacidad de capturar detalles de superficies ocultas, como el área debajo de los puentes, lo cual es esencial para obtener una visión más completa y precisa de la estructura. Integrar LiDAR en la inspección ayudaría a minimizar las deficiencias actuales de la captura de datos del dron Mavic 3 Enterprise RTK, ampliando el alcance de la inspección sin la necesidad de intervención humana directa en zonas de difícil acceso.
- Uso complementario de *software* especializado en análisis de nubes de puntos: Dado que las nubes de puntos generadas por drones pueden presentar algunas limitaciones en su procesamiento directo por parte de ciertos programas, se recomienda que en proyectos similares se utilicen herramientas especializadas en la gestión y análisis de nubes de puntos, como Leica Cyclone, para realizar un

análisis detallado de posibles patologías constructivas. Este tipo de *software* puede identificar con mayor precisión defectos pequeños o internos que no podrían ser observados a simple vista, mejorando la efectividad de las inspecciones.

- Mejoras en la inspección visual: Aunque la inspección visual a través del dron resulta útil para detectar problemas evidentes en la estructura del puente, se sugiere que, en futuras investigaciones, se complementen estas inspecciones con otros métodos de inspección más avanzados, como cámaras de alta resolución o el uso de técnicas de escaneo 3D. Esto permitiría obtener una evaluación más exhaustiva, especialmente en áreas donde el dron no tiene acceso o en defectos que no son visibles en imágenes estándar.
- Planificación ante obstrucciones físicas: Se recomienda tener en cuenta la posible presencia de obstrucciones físicas (cables, árboles, vegetación, etc.) al planificar las inspecciones de puentes con drones. La visibilidad y el acceso del dron pueden verse comprometidos, limitando la capacidad de realizar una evaluación completa de la estructura. En estos casos, es recomendable considerar el uso de otros métodos, como la inspección manual o la incorporación de cámaras especializadas (con otro tipo de sensor) que complementen la inspección aérea.
- Análisis estructural complementario con CSI Bridge: Si bien el CSI Bridge permite realizar un modelado simplificado de la estructura del puente, se recomienda que, para obtener un análisis más detallado y preciso, se complementen los resultados con otros métodos de evaluación estructural. Un análisis más completo podría incluir la evaluación de la fatiga estructural, las interacciones entre componentes y el comportamiento del puente bajo condiciones más específicas, lo que sería de gran ayuda para una gestión más eficiente del mantenimiento y la rehabilitación de infraestructuras.
- Capacitación continua en el uso de *software* y drones: Es recomendable que los profesionales encargados de las inspecciones y modelado estructural reciban capacitación constante sobre el uso avanzado del CSI Bridge y otras herramientas de *software* especializadas, así como en el manejo de drones y su integración con

sistemas de modelado 3D. Esto garantizaría que los equipos de trabajo puedan aprovechar al máximo el potencial de estas tecnologías, minimizando errores y optimizando los procesos de inspección y diseño.

- **Colaboración interdisciplinaria:** Se recomienda promover la colaboración entre ingenieros estructurales, especialistas en tecnologías de drones y expertos en procesamiento de nubes de puntos para proyectos futuros. Esta colaboración interdisciplinaria puede resultar fundamental para optimizar el uso de herramientas avanzadas como los drones y *software* especializado, asegurando que se maximicen sus capacidades y se integren de manera eficiente en los procesos de modelado y análisis estructural. La interacción entre estas disciplinas permitirá detectar y solucionar problemas técnicos más rápidamente y generar modelos más precisos y completos.
- **Implementación de protocolos de verificación y validación de datos:** Es fundamental establecer protocolos rigurosos de verificación y validación de los datos obtenidos durante las inspecciones, especialmente aquellos provenientes de tecnologías avanzadas como drones y escáneres 3D. Se recomienda crear procedimientos estandarizados que aseguren la calidad y exactitud de los datos antes de su integración en los modelos digitales.
- **Garantizar la seguridad y el bienestar del personal en el uso de drones y equipos especializados:** Se recomienda implementar medidas estrictas de seguridad ocupacional para el personal que operará drones y equipos tecnológicos en proyectos de inspección de puentes. Es esencial proporcionar formación sobre el uso seguro de los drones, así como equipos de protección personal adecuados, como cascos, lentes, chalecos reflectivos. Así mismo, se debe regular el paso vehicular, principalmente en el momento de despegue y aterrizaje del dron. Además, se deben seguir los protocolos de seguridad establecidos para la operación de drones, evitando el contacto cercano con las estructuras y realizando inspecciones en horarios y condiciones que minimicen los riesgos de accidentes. Se recomienda que los pilotos de dron cuenten con licencia para la manipulación de estos equipos.

- Finalmente, se recomienda hacer una comparación de los datos obtenidos con el levantamiento de campo (nube de puntos) contra los planos constructivos de los puentes, para determinar la homogeneidad de la información.
- Se podría incluir la valoración de edificaciones en cuanto a asentamientos, pandeo de columnas deformaciones del edificio en general, para una valoración preliminar de edificaciones con una vida útil ya superada, o como peritaje de una edificación en proceso o ya construida.
- Se debe considerar señalar en los puentes cuál es el peso máximo permitido, para evitar sobre cargas.
- Se debe considerar incluir un monitoreo posterior a un sismo o una avenida máxima que afecte los bastiones o la integridad física del puente.

REFERENCIAS

Manuales o Instructivos

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2013). *Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes*. Lanamme UCR. Codigosismico.or.cr. <https://www.codigosismico.or.cr/images/lineamientos.pdf>

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (2011). *Código Sísmico*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Codigosismico.or.cr. <https://www.codigosismico.or.cr/descargas/CSCR2010.pdf>

Libros

Quirós Rosado, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Universidad de Extremadura, España.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw Hill Education.

Proyectos de investigación

Barrio, R. (2017). *Uso de Drones en la Inspección para la Rehabilitación del Patrimonio. Iglesia de la Merced*. (Tesis doctoral). Universidad de Burgos. España.

Sánchez, J. y Pereda, R. (2014). *Metodologías topográficas y aplicaciones. Introducción a la Fotogrametría digital en Ingeniería Civil*. (Trabajo de graduación para optar por el grado en Ingeniería Civil). Universidad de Cantabria. España.

Sancho, R. (2021). *Aplicación de la Fotogrametría con Drones al Control Deformacional de Estructuras y Terreno*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. España.

Vargas, L. y Villalobos, E. (2019). *Condición Estructural y de Conservación de los Puentes en Rutas Estratégicas de la Red Vial Nacional Costarricense: Estado, Causas y Enfoques para atender el Problema*. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería Estructural, LanammeUCR.

Fuentes de Internet

Conavi.go.cr. (s.f.). *Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP)*. https://saep.conavi.go.cr/SAEP_CONAVI_Web/login.faces

Flores, B. (2023, 28 diciembre). ¿Cuántas veces se cerró la ruta 32 este año? Repasamos los datos y las repercusiones para el sector productivo. *El Financiero*. <https://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/cuantas-veces-se-cerro-la-ruta-32-este-ano/KYWUV73IKREUHPAUFROVISQE2M/story/>

Global Mediterránea&Geomática. (2023, 10 julio). *Fotogrametría, evolución y uso*. Global - Mediterránea&Geomática. <https://www.globalmediterranea.es/fotogrametria-evolucion-uso/>

Gobierno de España. (n.d.). *Plan Estratégico para el Desarrollo del Sector Civil de los Drones en España 2018-2021*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/plan_estrategico_drones_2018-2021_0.pdf

Guillermo, V. A. L. (2017). *Historia, comportamiento y retos del puente Rafael Iglesias*. <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1117>

Contreras M., G. (2020). *LanammeUCR evaluó puentes de la ruta 32, 36 y 256, con el fin de ofrecer información reciente de estas estructuras*.

<https://www.lanamme.ucr.ac.cr/ultimas-noticias/416-evaluacion-puentes-ruta-32-36-y-256-informacion-reciente-estructuras>

Piñero, I., Lasarte, N., Torres, J., & Hurtado-Alonso, N. (2024). *Dronix: inspección automatizada de infraestructuras mediante drones*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/382001946_DRONIX_INSPECCION_AUTOMATIZADA_DE_INFRAESTRUCTURAS_MEDIANTE_DRONES

Sivasuriyan, A., Vijayan, D. (2022, 30 enero). *Performance of RC beams utilizing various sensors under fundamental static loading*. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*. https://www.researchgate.net/publication/358243542_Performance_of_RC_beams_utilizing_various_sensors_under_fundamental_static_loading

Structuralia. (n.d.). La deflexión en vigas y elementos esbeltos. <https://blog.structuralia.com/la-deflexion-vigas-y-elementos-esbeltos>

Uav, A., & Uav, A. (2024, July 30). *¿Qué es y para qué sirve la fotogrametría?* - *UAVLatam*. UAVLatam - Soluciones Empresariales con Drones. <https://uavlatam.com/que-es-la-fotogrametria-como-funciona/>

Utah State University. (2018, October 15). *USU researchers evaluate drones for bridge inspections*. <https://www.usu.edu/today/story/usu-researchers-evaluate-drones-for-bridge-inspections>

Wa-Chong, T. G. (2024, 21 febrero). Cierres constantes en la ruta 32 impactan en aumento de precios. *La República*. [www.larepublica.net. https://www.larepublica.net/noticia/cierres-constantes-en-la-ruta-32-impactan-en-aumento-de-precios#:~:text=El%20cierre%20de%20la%20ruta,de%20la%20C%3%A1%20de%20Exportadores](https://www.larepublica.net/noticia/cierres-constantes-en-la-ruta-32-impactan-en-aumento-de-precios#:~:text=El%20cierre%20de%20la%20ruta,de%20la%20C%3%A1%20de%20Exportadores).