

**INSPECCIÓN DE PUENTES EN CONCRETO REFORZADO EMPLEANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS
(VANTs): ESTUDIO DE CASO**

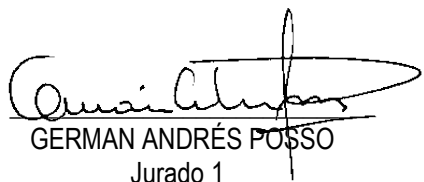
SERGIO RODOLFO PEREZ JIMENO

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.



MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO
Director



GERMAN ANDRÉS POSSO
Jurado 1



JOSE CAPA
Jurado 2

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister.

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias



JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali, 26 Abril 2023



Acta de Correcciones al Documento de Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 26 Abril 2023

Autor: SERGIO RODOLFO PEREZ JIMENO

Título del Trabajo de Grado: INSPECCIÓN DE PUENTES EN CONCRETO REFORZADO EMPLEANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs): ESTUDIO DE CASO.

Director:

Como indica el artículo 2.13 de las Directrices para Trabajo de Grado de Maestría, he verificado que el estudiante indicado arriba ha implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Trabajo de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Evaluación correspondiente.



Firma del Director del Trabajo de Grado

Santiago de Cali, 29 de 03 de 2022

DATOS DEL ESTUDIANTE

NOMBRE COMPLETO: Sergio Rodolfo Pérez Jimeno

DIRECCION: Carrera 65 Calle 70 – 29, Piso 2.

CIUDAD DE RESIDENCIA: Barranquilla, Atlántico

TELÉFONO DE CONTACTO: 3004926777

CORREO ELECTRÓNICO INSTITUCIONAL: sperezjimeno@javerianacali.edu.co

CORREO ELECTRÓNICO PERSONAL: ingsergio.pj@gmail.com

PROFESIÓN: Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD: Universidad del Norte

EMPRESA: Universidad De La Costa

CARGO: Docente Tiempo Completo



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**INSPECCIÓN DE PUENTES EN CONCRETO REFORZADO EMPLEANDO
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs): ESTUDIO DE CASO.**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

SERGIO RODOLFO PÉREZ JIMENO

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Marzo 2023

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Alcance del trabajo de investigación	6
1.3. Objetivo general.....	7
1.4. Objetivos específicos	7
1.5. Justificación del trabajo de investigación	8
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Inspección de Puentes.....	10
2.2. Patologías Estructurales En Puentes de Concreto Reforzado	16
2.3. Calificación Estado Estructural del Puente.....	26
2.4. Factor de clasificación de un puente.....	30
2.5. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)	36
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
4. RESULTADOS.....	77
5. CONCLUSIONES	105
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXO 1. INSPECCION VISUAL TRADICIONAL - PUENTE PILOTO	
ANEXO 2. INSPECCION VISUAL EMPLEANDO VANT - PUENTE PILOTO	
ANEXO 3. INSPECCION VISUAL TRADICIONAL - PUENTE CASO DE ESTUDIO “PUENTE RIO CLARO”	
ANEXO 4. INSPECCION VISUAL EMPLEANDO VANT - PUENTE CASO DE ESTUDIO “PUENTE RIO CLARO”	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Procedimiento inspección según (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).....	14
Figura 2 Carga del camión HL-93 (WSDOT, 2022)	34
Figura 3 Diagrama de Flujo. Metodología de Investigación	42
Figura 4 Puente Calle 13 entre Carrera 103 y 102. (Google Maps).	44
Figura 5 Plataforma Geovisor IDESC. Registro de Puentes y Box Culvert.....	45
Figura 6 Alternativas puentes vehicular para caso de estudio. (a) Carrera 2 Oeste Calle 14, Zoológico (b) Avenida Oeste Calle 23 Oeste, Barrio Aguacatal (c) Barrio Navarro (c) Calle 3 Carrera 125, Barrio Pance. (Geovisor IDESC).....	45
Figura 7 Puente Río Claro. Propio del Caso de Estudio	47
Figura 8 Misión Circular,50 m de altura, 70 m de diámetro, - 30° inclinación vertical de la cámara.	48
Figura 9 Misión Cuadrícula doble,50 m de altura, 60 m de longitud por trayecto, 20 m de separación entre trayecto, - 90° inclinación vertical de la cámara. (a) Dirección “y” (b) Dirección “x”	48
Figura 10 Misión Vuelo Libre, 1,5 m de altura, + 60° inclinación vertical de la cámara.	49
Figura 11.Localización puntos de control, etapa de entrenamiento, Edificio “El Cedro Rosado”	50
Figura 12. Modelado 3D Edificio “El Cedro Rosado”, etapa de entrenamiento.	51
Figura 13 Modelo 3D edificio “El cedro Rosado”. (a) Parte superior. (b) Pasillo lateral	52
Figura 14 Modelado 3D, “Pasillo Lateral”, Edificio “El Cedro Rosado”	52
Figura 15 Modelado 3D incompleto, edificio “El Cedro Rosado”	52
Figura 16 Resultado de la Información Puente Piloto, (Geovisor IDESC)	53
Figura 17 Puente Piloto, (Geovisor IDESC).....	53
Figura 18 Planta, Puente Piloto.....	54
Figura 19 Corte Transversal, Puente Piloto.	54
Figura 20 Corte Longitudinal, Puente Piloto.	54
Figura 21 Levantamiento geométrico elementos del Puente, espesor de losa y andén.	55
Figura 22 Chequeo de magnitudes registradas mediante modelo digital 3D en ContextCapture, espesor de losa y andén.....	55

Figura 23 Planificación misiones de vuelo libre. (a) Forma Circular, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (b) Forma Cuadrícula simple, 5,0m de altura sobre la superficie del puente, - 90° inclinación vertical de la cámara. (c) Forma Arco Longitudinal, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (d) Forma Arco Transversal, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (e) Trayecto debajo del puente, - 1,0m sobre la superficie del puente, +45° inclinación vertical de la cámara.....	57
Figura 24 Levantamiento puntos de control, Puente Piloto, Universidad del Valle. (a) Punto de Control 1 (b) Punto de Control 2 (c) Punto de Control 3.....	58
Figura 25 Localización puntos de control, Puente Piloto, Universidad del Valle	58
Figura 26 Planta Puente Río Claro	60
Figura 27 Alzado Longitudinal Puente Río Claro.	61
Figura 28 Exposición del inspector durante la inspección visual tradicional. Parte superior del puente.....	62
Figura 29 Exposición del inspector durante la inspección visual tradicional. Parte inferior del puente.....	62
Figura 30 Misión Cuadrícula, 20 m de altura sobre el nivel del tablero, 35 m de longitud por trayecto, 5 m de separación entre trayecto, - 90° inclinación vertical de la cámara.....	63
Figura 31 Misión libre, 1 m de altura sobre nivel del río Claro, 18 m de longitud por trayecto, + 30° inclinación vertical de la cámara.....	63
Figura 32 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 8,0m de altura sobre nivel del río Claro, 25 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 30° inclinaciones verticales de la cámara. Lado Derecho....	64
Figura 33 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 8,0m de altura sobre nivel del río Claro, 25 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 30° inclinaciones verticales de la cámara. Lado Izquierdo..	64
Figura 34 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 9,0m de altura sobre nivel del río Claro, 40 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. Hacia K0+000...	64
Figura 35 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 9,0m de altura sobre nivel del río Claro, 40 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. Hacia K0+028...	64
Figura 36 Capturas del Puente realizadas por el VANT. (a) Captura Superior. (b) Captura Lateral. (c) Inspección Lateral. (d) Inspección Superior. (e) Inspección Inferior. (f) Inspección Detallada.	65
Figura 37 Ubicación del inspector durante la inspección visual empleando VANT. Costado derecho del puente.	66
Figura 38. Localización puntos de control 1 y 2, Puente Río Claro.	67

Figura 39. Localización puntos de control 3, Puente Río Claro.	67
Figura 40 Medidas graficas de calidad en los puntos de enlace. (a) Numero de fotos capturando la escena. (b) Incertidumbre de posición de los puntos de enlace, valores medidos en metros (c) Numero de fotos observando los puntos de enlace. (d) Resolución en los puntos de enlace, medido en metros/pixel.	68
Figura 41 Procedimiento para obtener modelo 3D, software ContextCapture. (a) Adición de fotografías. (b) Asignación de puntos de control. (c) Configuración de la aerotriangulación. (d) Procesamiento de la aerotriangulación. (e) Análisis de la información generada en el proceso de aerotriangulación (f) Producción modelo 3D del puente.	69
Figura 42 Patologías evidenciadas durante inspección visual tradicional. (a) Fisuración Transversal (b) Golpe por impacto vehicular (c) Grieta por Movimiento Lateral (d) Exposición del acero de refuerzo.	71
Figura 43 Exposición del inspector durante la cuantificación de daños, inspección visual tradicional. Parte inferior del puente.	72
Figura 44 Identificación de daños severos sobre componentes estructurales del puente: (a) Segregación y discontinuidad elemento de enlace tablero-arco tipo muro (b) Detalle segregación y discontinuidad elemento de enlace tablero-arco tipo muro (c) Grieta por cortante elemento de enlace tablero-arco tipo muro (d) Detalle grieta por cortante elemento de enlace tablero-arco tipo muro (e) Grieta por movimiento lateral de estribo y aleta k0+028 lado izquierdo (f) Detalle grieta por movimiento lateral de estribo y aleta k0+028 lado izquierdo (g) Grieta por movimiento lateral de estribo k0+000 (h) Detalle grieta por movimiento lateral de estribo k0+000 (i) Separación del acero de refuerzo longitudinal (pobre detallado) (j) Detalle separación del acero de refuerzo longitudinal (pobre detallado).	73
Figura 45 Identificación y cuantificación de daño presente en muro de enlace tablero-arco, modelo digital 3D (a) Identificación de daño, segregación (b) Cuantificación área de daño.	74
Figura 46 Patologías evidenciadas durante inspección visual tradicional. (a) Segregación y Socavación Local (b) Eflorescencias (c) Fisura por Volcamiento (d) Infiltración.	78
Figura 47 Modelo digital 3D, ContextCapture.	79
Figura 48 Patologías evidenciadas durante inspección visual empleando VANT. (a) Contaminación del Concreto (b) Exposición del acero de refuerzo (c) Segregación (d) Fisura por Volcamiento.	80
Figura 49 Criterios de Selección Puente Caso de Estudio.	83
Figura 50 Relación de daños sobre puente Rio Claro, Vista en Planta, Inspección Tradicional.	86
Figura 51 Relación de daños sobre Puente Rio Claro, Vista en Corte, Inspección Tradicional.	87

Figura 52 Modelo digital 3D Puente Río Claro, Software ContextCapture. (a) Vista Lateral Derecha (b) Vista Lateral Izquierda (c) Vista en Planta (d) Vista Inferior.....	87
Figura 53 Relación de daños sobre puente Rio Claro, Vista en Planta, Inspección Empleando VANT.	90
Figura 54 Relación de daños sobre Puente Rio Claro, Vista en Corte, Inspección Empleando VANT.	91
Figura 55 Modelo Estructural. (a) Esquema 3D del modelo (b) Asignación geometría del tablero (c) Asignación geometría muro enlace (d) Asignación geometría losa arco.....	95
Figura 56 Tipos de apoyos modelo estructural. (a) Asignación de apoyos al modelo. (b) Apoyo articulado conexión losa inferior arco y estribos. (c) Apoyo articulado conexión losa inferior arco y tajamar. (d) Apoyo empotrado conexión losa superior tablero y estribos	95
Figura 57 Diagrama que relaciona el número de rebote, posición del esclerómetro y resistencia a la compresión aproximada. Manual de instrucciones esclerómetro CONTROLS.	97
Figura 58 Ensayo en campo, esclerometría. (a) Posición esclerómetro. (b) Número de rebote	97
Figura 59 Asignación de cargas sobre modelo estructural. (a) Peso propio componentes. (b) Peso propio carpeta de rodamiento. (c) Carga viva vehicular tándem. (d) Carga de carril	100
Figura 60 Deformación máxima del puente debido a carga viva vehicular y de carril	101
Figura 61 Fuerza por cortante componente muro. (a) Debido al peso propio de los componentes. (b) Debido al peso propio carpeta de rodadura. (c) Debido a la carga viva vehicular y de carril.	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Avance tipo de actividad, Concesiones 4G (ANI, 2022).....	2
Tabla 2 Movimiento de carga nacional por medio de transporte (Mintransporte, 2018)	3
Tabla 3 Porcentaje de Incidencia, Movimiento de carga nacional por medio de transporte ...	4
Tabla 4 Factores que afectan la inspección visual (Megaw, 1979)	12
Tabla 5 Descripción calificación cuantitativa. SIPUCOL	28
Tabla 6 Descripción de las condiciones de estado de un elemento según (Ministry of Transportation Ontario, 2008)	29
Tabla 7 Correlación entre la condición de estado por elemento y calificación numérica del elemento.....	30
Tabla 8 Factor de condición ϕ_c (WSDOT, 2022)	32
Tabla 9 Factor de sistema ϕ_s (WSDOT, 2022)	32
Tabla 10 Factor de Resistencia, ϕ_n . (AIS, 2014).....	33
Tabla 11 Factores de carga viva y muerta (WSDOT, 2022)	33
Tabla 12 Porcentaje incremento carga viva debido al impacto (WSDOT, 2022)	34
Tabla 13 Misión de los VANTs en la ingeniería civil.	38
Tabla 14 Cuadro Comparativo Especificaciones VANTs Phantom 4 PRO V2.0 y Parrot Anafi Work 4K.....	40
Tabla 15. Coordenadas Puntos de control, etapa entrenamiento, Edificio “El Cedro Rosado”	50
Tabla 16. Coordenadas Puntos de control, inspección Puente Piloto.....	59
Tabla 17. Coordenadas Puntos de control, inspección Puente Río Claro.....	66
Tabla 18 Comparación entre inspección visual tradicional e inspección empleando VANT.	81
Tabla 19 Calificación numérica y condición de estado de los componentes del Puente.....	82

Tabla 20 Informe Inspección Visual Tradicional, Puente Río Claro.....	84
Tabla 21 Informe Inspección Visual Empleando VANT, Puente Río Claro.....	88
Tabla 22 Comparación entre inspección visual tradicional e inspección empleando VANT. Puente Río Claro.	91
Tabla 23 Calificación numérica y condición de estado de los componentes del Puente Río Claro.....	93
Tabla 24 Datos obtenidos del ensayo en campo por esclerometría.	98
Tabla 25 Factor de tolerancia unilateral para un nivel defectuoso del 10%	98
Tabla 26 Propiedades mecánicas concreto puente caso de estudio	99
Tabla 27 Máximas fuerzas de cortante interna sobre muro de enlace, según sollicitación de carga.....	102

ABSTRACT

Bridges is a structure, that is characterized by connecting two or more locations, which present an obstacle between them. The stability and growth nation's economy depends on the gain of knowledge construction, maintenance, and performance of bridges. However, in Colombia, there is no updated information on the bridge's condition, because obtaining it, is necessary for hard-working and uneconomical efforts.

The target of the following research consisted to evaluate in detailed form, the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) use to bridge inspections. Reaching as possible results from an affordable, workable, and cost-effective alternative; As well as permitted to evaluate bridge condition in a brief period, through reliable and believable information.

The development of the investigation was realized through an organized process, based to choose a case study. Also, learn about, pilot, and control, the UAVs. As well as to evaluate the reinforce concrete bridge component's structural suitability, by means of pathology study, employing UAV images together with data recorded during a visual inspection, and the estimation of rating factor.

In summary, this paper exposed to indicate the advantages and disadvantages, and important aspects, of UAVs, use on bridge visual inspection, getting a very attractive and employed method.

RESUMEN

Los puentes son estructuras que se caracterizan por conectar dos o más puntos, los cuales presentan un obstáculo entre sí. Su construcción, conservación y funcionamiento influyen en la estabilidad y crecimiento en la economía de cualquier país. Sin embargo, a pesar de su gran importancia, en Colombia, no se cuenta con información actualizada de las condiciones estructurales de estos, puesto que para obtenerla se requiere de esfuerzos laboriosos y dispendiosos.

El siguiente trabajo de investigación buscó evaluar de forma prolija, el uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), como equipo adicional, para la inspección visual de puentes. Alcanzando como resultados una alternativa asequible, practicable y rentable; que permitió, además, evaluar las condiciones actuales de puentes en concreto reforzado en periodos cortos, a través de información confiable y convincente.

La investigación se llevó a cabo a través de un procedimiento estructurado el cual permitió seleccionar, a partir de criterios técnicos, el estudio de caso. También, el aprender de, maniobrar y dominar, los VANTs como equipo de inspección en puentes. Así como evaluar la idoneidad de los componentes estructurales de un puente en concreto reforzado mediante una evaluación patológica, utilizando imágenes obtenidas por el VANT junto con datos registrados durante la inspección visual tradicional, y la determinación del factor de clasificación.

En síntesis, con este trabajo se muestran las ventajas y desventajas, junto con los aspectos más relevantes del empleo de los VANTs, como herramienta complementaria para el método tradicional de inspección, logrando que este sea más atractivo y que se pueda ejecutar con mayor frecuencia.

1. INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras que permiten conectar dos o más caminos sobre depresiones u obstáculos. Su funcionamiento, estado de conservación y capacidad de carga es fundamental e influyente para la economía de cualquier país. Es por lo anterior que el Instituto Nacional de Vías de Colombia, ha implementado desde el 2013 un programa de infraestructura vial de cuarta generación (4G), el cual contempla la construcción de 751 puentes y el mejoramiento de 211.

Dada la importancia de este tipo de obras, es obligatorio tener un registro actualizado de las condiciones estructurales y capacidad de carga de cada puente. Aún más cuando se ha evidenciado, dentro del programa 4G, construcciones nuevas con fuertes patologías estructurales (e.g. Puente Hisgaura) e incluso desplome en otra (e.g. Puente Chirajara).

En Colombia se ha desarrollado un sistema de administración de puentes, SIPUCOL, el cual tiene como función además de, identificar mediante un conjunto de inspecciones y estudios de capacidad de carga la idoneidad de los puentes, establecer programas de mantenimientos y reforzamientos, según sea la prioridad.

Sin embargo, la implementación de este sistema no es frecuente debido a factores tales como: Altos costos de operación, extensos tiempos de ejecución, alto riesgo en la seguridad de los inspectores, obstaculización del tránsito vehicular y peatonal y adición de cargas debido a las plataformas requeridas para las inspecciones. Conllevando a ser un requisito fundamental poco aplicado.

De manera que, usar equipos tecnológicos e innovadores como son los vehículos aéreos no tripulados (VANTs), como herramienta complementaria para las inspecciones visuales de puentes, permitirá tener una alternativa atractiva desde la óptica económica, eficiencia y segura. Buscando, que se actualice con mayor frecuencia las condiciones y capacidades estructurales de los puentes, así como los programas de mantenimiento y reforzamiento.

1.1.Planteamiento del problema

En Colombia, de acuerdo con el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) hay registrados 3.266 puentes que hacen parte de la red vial nacional que interconecta a todo el país y desde el año 2013 se ha venido implementando un programa de infraestructura vial de cuarta generación (4G), dirigido a reducir la brecha en infraestructura y consolidar la red vial nacional a través de la conectividad continua y eficiente entre los centros de producción y de consumo, con las principales zonas portuarias y con la zonas fronteras del País (Conpes, 2013).

Este programa se está viendo reflejado con la construcción de 133 puentes de 751 planeados y de 75 mejoramientos de puentes de 211 planeados (ANI, 2022), como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Avance tipo de actividad, Concesiones 4G (ANI, 2022)

CONCESIONES 4G	CONSTRUCCIÓN DE PUENTE		MEJORAMIENTO DE PUENTES	
	PLANEADO	EJECUTADO	PLANEADO	EJECUTADO
Autopista al Mar 1	39	0	0	0
Autopista al Mar 2	62	0	0	0
Autopista al Río Magdalena 2	40	0	1	0
Autopista Conexión Norte	2	1	1	1
Autopista Conexión Pacífico 1	59	9	0	0
Autopista Conexión Pacífico 2	44	24	0	0
Autopista Conexión Pacífico 3	50	25	6	6
Bucaramanga - Barrancabermeja - Yondó	19	3	0	0
Bucaramanga - Pamplona	22	0	1	
Cartagena - Barranquilla y Circunvalar de la Prosperidad	31	28	8	8
Honda - Puerto Salgar - Girardot	0	0	0	0
IP - Accesos Norte a Bogotá	2	0	0	0
IP - Ampliación a tercer carril doble calzada Bogotá - Girardot	35	2	1	1
IP - Antioquía - Bolívar	15	7	9	6
IP - Cambao Manizales	0	0	0	0
IP - Chirajara - Fundadores	7	0	0	0
IP - GICA	67	17	0	0
IP - Malla vial del Meta	19	0	0	0
IP - Neiva - Girardot	39	9	78	53
IP - Vías del Nus	27	6	0	0
Mulaló - Loboguerrero	45	0	1	0
Pamplona - Cúcuta	25	0	0	0
Perimetral de Oriente de Cundinamarca	7	0	0	0
Popayán - Santander de Quilichao	36	0	0	0
Puerta de Hierro - Palmar de Varela y Carreto - Cruz del Viso	0	0	0	0

CONCESIONES 4G	CONSTRUCCIÓN DE PUENTE		MEJORAMIENTO DE PUENTES	
	PLANEADO	EJECUTADO	PLANEADO	EJECUTADO
	Rumichaca - Pasto	7	0	0
Santana - Mocoa - Neiva	0	0	0	0
Transversal del Sisga	3	2	0	0
Villavicencio - Yopal	49	0	105	0

Un puente es definido como una estructura, erigido sobre una depresión o un obstáculo, tal como el agua, carretera, vía férrea, que tiene una vía o camino para el transporte del tráfico u otra carga dinámica (Departments Of The Army And The Air Force., 1994). La Norma Colombiana de Diseño de Puentes (LRFD – CCP 14) define los puentes como cualquier estructura que tenga un ancho no menor de 6 m que forma parte de una carretera o que está localizado sobre o bajo una carretera.

El funcionamiento, el buen estado de conservación y la capacidad de carga de los puentes es importante para mantener la economía y el crecimiento del país, esto es apreciable en las estadísticas de movimiento de carga en el sector transporte de la economía colombiana donde se puede notar qué, para el año 2018, más del 80% de la carga nacional por modo de transporte es a través del sistema terrestre, como se puede observar en Tablas 2 y 3.

Tabla 2 Movimiento de carga nacional por medio de transporte (Mintransporte, 2018)

	TERRESTRE	FERROVIARIO			FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón	Total				
2002	84.019	ND	31.032	31.032	3.480	122	532	119.185
2003	99.782	37	42.744	42.781	3.725	132	928	147.348
2004	117.597	317	45.865	46.182	4.211	129	588	168.707
2005	139.646	308	48.919	49.227	4.863	135	400	194.271
2006	155.196	314	49.394	49.708	4.025	138	509	209.576
2007	183.126	375	52.829	53.204	4.563	137	454	241.484
2008	169.714	236	58.236	58.472	4.953	123	372	233.634
2009	173.558	254	59.144	59.398	4.070	109	364	237.499
2010	181.021	366	66.659	67.025	3.691	119	353	252.209
2011	191.701	204	74.350	74.554	3.650	124	646	270.029
2012	199.369	20	76.780	76.800	3.474	127	388	280.158
2013	220.309	97	76.684	76.781	2.968	149	774	300.980
2014	232.480	174	42.733	42.907	2.858	163	601	279.009
2015	235.112	230	47.705	47.935	3.524	179	969	287.719

	TERRESTRE	FERROVIARIO			FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón	Total				
2016	234.451	643,1	54.650	55.293	3.938	185	1.786	295.653
2017	233.964	15,9	50.419	50.435	5.200	177	3.563	293.339
2018	243.171	23,1	47.533	47.556	5.039	176,7	4.352	300.296

Nota: Miles de Toneladas

Tabla 3 Porcentaje de Incidencia, Movimiento de carga nacional por medio de transporte

AÑO	TERRESTRE	FERROVIARIO			FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón					
2002	70,49%	ND	26,04%	2,92%	0,10%	0,45%	100%	
2003	67,72%	0,03%	29,01%	2,53%	0,09%	0,63%	100%	
2004	69,70%	0,19%	27,19%	2,50%	0,08%	0,35%	100%	
2005	71,88%	0,16%	25,18%	2,50%	0,07%	0,21%	100%	
2006	74,05%	0,15%	23,57%	1,92%	0,07%	0,24%	100%	
2007	75,83%	0,16%	21,88%	1,89%	0,06%	0,19%	100%	
2008	72,64%	0,10%	24,93%	2,12%	0,05%	0,16%	100%	
2009	73,08%	0,11%	24,90%	1,71%	0,05%	0,15%	100%	
2010	71,77%	0,15%	26,43%	1,46%	0,05%	0,14%	100%	
2011	70,99%	0,08%	27,53%	1,35%	0,05%	0,24%	100%	
2012	71,16%	0,01%	27,41%	1,24%	0,05%	0,14%	100%	
2013	73,20%	0,03%	25,48%	0,99%	0,05%	0,26%	100%	
2014	83,32%	0,06%	15,32%	1,02%	0,06%	0,22%	100%	
2015	81,72%	0,08%	16,58%	1,22%	0,06%	0,34%	100%	
2016	79,30%	0,22%	18,48%	1,33%	0,06%	0,60%	100%	
2017	79,76%	0,01%	17,19%	1,77%	0,06%	1,21%	100%	
2018	80,98%	0,01%	15,83%	1,68%	0,06%	1,45%	100%	

Fuente: Elaboración propia

Dada la importancia de los puentes, es fundamental tener un registro actualizado de las condiciones estructurales de cada uno de estos. Por consiguiente, El INVIAS dentro de su proceso de mejoramiento ha desarrollado el Sistema de Administración de Puentes de Colombia, SIPUCOL, de la red vial nacional. El cual es un sistema que identifica los puentes que se encuentran en estado crítico y realiza la priorización de acuerdo con los resultados de las inspecciones principales, inspecciones especiales, inspecciones rutinarias y la capacidad de carga (Muñoz et al., 2005).

Las inspecciones en puentes deben ser realizadas de acuerdo con el Manual para la Inspección de Puentes y Pontones, el cual presenta unas recomendaciones para que un profesional calificado y su equipo de trabajo puedan realizar la inspección visual y obtener un informe de los daños encontrados durante la ejecución de esta, permitiendo identificar el tipo, la magnitud, la severidad y la localización de los elementos afectados.

Dentro del procedimiento a seguir, de acuerdo con el manual, el profesional calificado entre muchas actividades debe tomar mínimo dos fotografías panorámicas de la estructura, en superficie y perfil. También, debe verificar mediante inspección visual cada uno de los elementos de la estructura (equipamientos, superestructura, subestructuras, cimentación y el cauce) y posteriormente elaborar un esquema general de los elementos de la estructura que permita ubicar los diferentes daños identificados. Finalmente, debe realizar una cuantificación de los daños existentes y elaborar un informe general del estado de la estructura.

La inspección visual es el método más común utilizado para determinar el estado de los puentes en todo el mundo. Andamios, canastas de inspección y plataformas móviles, son los equipos más comunes usados para la inspección bajo puentes en Colombia y para zonas con acceso difíciles. Sin embargo, estos presentan un alto costo para su alquiler, compra o mantenimiento y son difíciles de programar debido a que son escasos en áreas donde se localizan los puentes.

Asimismo, al utilizar estos equipos, se generan cargas adicionales al puente, aumenta los riesgos en la seguridad del personal encargado de la inspección y dificulta el tránsito vehicular y peatonal. En consecuencia, hacen que la inspección visual en puentes sea una actividad necesaria y de suma importancia, pero al mismo tiempo un método de reconocimiento poco contratado.

Es por lo anterior que, emplear una herramienta alterna de inspección como son los VANTs en vez de andamios, canastas de inspección o plataformas, podrían causar una forma de inspección más económica, segura y eficiente. Generando además de un aumento en las frecuencias de inspección, registro valioso y en tiempo reducido de las patologías presentes en el puente, las cuales son la base para determinar su estado estructural y su factor de clasificación.

1.2. Alcance del trabajo de investigación

El presente trabajo de investigación, buscó evaluar el uso de los VANTs durante la etapa de inspección en puentes. De manera que, se tenga una alternativa adicional a la descrita actualmente por el Manual de Inspección Visual de Puentes del INVIAS que permita obtener de forma oportuna y bajo condiciones de seguridad y economía el estado de conservación de los puentes en Colombia, mediante la calificación y cuantificación de sus patologías.

Adicionalmente, admitió el hecho, a partir de la información obtenida durante las inspecciones, de determinar la capacidad estructural del puente para soportar las solicitaciones de cargas predominantes, a través del factor de clasificación o Rating Factor (En inglés).

Este trabajo se limitó a inspecciones de puentes en concreto reforzado, que presentan niveles de daños estructurales notorios, que hayan sido puestos en servicio antes del año 2015 y que cuenten con las condiciones necesarias para ser inspeccionado de manera tradicional y mediante el uso de VANTs.

Por último, esta investigación permitió que profesionales dedicados a la inspección de puentes e investigación, vean el uso de los VANTs como una herramienta innovadora y eficiente, que no solo logra reducir el tiempo de inspección, sino que a partir del procesamiento de imágenes y desarrollando algoritmos precisos, pueden lograr detectar daños estructurales de manera automática.



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**INSPECCIÓN DE PUENTES EN CONCRETO REFORZADO EMPLEANDO
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs): ESTUDIO DE CASO.**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

SERGIO RODOLFO PÉREZ JIMENO

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Marzo 2023



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**INSPECCIÓN DE PUENTES EN CONCRETO REFORZADO EMPLEANDO
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs): ESTUDIO DE CASO.**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

SERGIO RODOLFO PÉREZ JIMENO

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Enero 2023

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado

En Cumplimiento de los requisitos exigidos por la

Pontificia Universidad Javeriana para optar el título de

Magister En Ingeniería Civil.

Decano de la Facultad de Ingeniería,

Director Maestría en Ingeniería Civil, Dr. Juan Carlos Martínez Arias,

Director Trabajo de Grado, PhD. Manuel Alejandro Rojas Manzano

Codirector Trabajo de Grado, M.Sc. Javier Alexander Perez Caicedo

Jurado 1

Jurado 2

Dedicatoria

Agradecimiento infinito a quién con su amor y paciencia, escuchó cada una de mis oraciones e inspeccionó todo el desarrollo de este trabajo. A Dios padre – Dios hijo y Dios Espíritu Santo.

A quién, con su lealtad y tolerancia, me apoyó y recorrió a mi lado este arduo camino. A mi esposa Stephanie Prestan Gómez.

A quién, con su ternura y expresividad, alegraba cada momento de tribulación. A mi hermosa hija, Samantha Perez Prestan.

A quienes, con su sabiduría y amor, me encauzaron e impulsaron por el camino de la perseverancia. A mi mamá Orietta Jimeno Reales y a mi papá Rodolfo Perez Vásquez.

A quienes, con sus mensajes enérgicos, me saturaban de fuerzas para alcanzar cada meta propuesta. A mi familia y amigos.

A quienes, con su sapiencia y humildad, me orientaron para la ejecución extraordinaria de esta investigación. PhD Manuel Alejandro Rojas Manzano y M.Sc. Javier Alexander Perez Caicedo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Alcance del trabajo de investigación	6
1.3. Objetivo general.....	7
1.4. Objetivos específicos	7
1.5. Justificación del trabajo de investigación	8
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Inspección de Puentes	10
2.2. Patologías Estructurales En Puentes de Concreto Reforzado	16
2.3. Calificación Estado Estructural del Puente.....	26
2.4. Factor de clasificación de un puente.....	30
2.5. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)	36
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	42
4. RESULTADOS.....	77
5. CONCLUSIONES	105
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXO 1. INSPECCION VISUAL TRADICIONAL - PUENTE PILOTO	
ANEXO 2. INSPECCION VISUAL EMPLEANDO VANT - PUENTE PILOTO	
ANEXO 3. INSPECCION VISUAL TRADICIONAL - PUENTE CASO DE ESTUDIO “PUENTE RIO CLARO”	
ANEXO 4. INSPECCION VISUAL EMPLEANDO VANT - PUENTE CASO DE ESTUDIO “PUENTE RIO CLARO”	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Procedimiento inspección según (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).....	14
Figura 2 Carga del camión HL-93 (WSDOT, 2022)	34
Figura 3 Diagrama de Flujo. Metodología de Investigación	42
Figura 4 Puente Calle 13 entre Carrera 103 y 102. (Google Maps).	44
Figura 5 Plataforma Geovisor IDESC. Registro de Puentes y Box Culvert.....	45
Figura 6 Alternativas puentes vehicular para caso de estudio. (a) Carrera 2 Oeste Calle 14, Zoológico (b) Avenida Oeste Calle 23 Oeste, Barrio Aguacatal (c) Barrio Navarro (c) Calle 3 Carrera 125, Barrio Pance. (Geovisor IDESC).....	45
Figura 7 Puente Río Claro. Propio del Caso de Estudio	47
Figura 8 Misión Circular,50 m de altura, 70 m de diámetro, - 30° inclinación vertical de la cámara.	48
Figura 9 Misión Cuadrícula doble,50 m de altura, 60 m de longitud por trayecto, 20 m de separación entre trayecto, - 90° inclinación vertical de la cámara. (a) Dirección “y” (b) Dirección “x”	48
Figura 10 Misión Vuelo Libre, 1,5 m de altura, + 60° inclinación vertical de la cámara.	49
Figura 11.Localización puntos de control, etapa de entrenamiento, Edificio “El Cedro Rosado”	50
Figura 12. Modelado 3D Edificio “El Cedro Rosado”, etapa de entrenamiento.	51
Figura 13 Modelo 3D edificio “El cedro Rosado”. (a) Parte superior. (b) Pasillo lateral	52
Figura 14 Modelado 3D, “Pasillo Lateral”, Edificio “El Cedro Rosado”	52
Figura 15 Modelado 3D incompleto, edificio “El Cedro Rosado”	52
Figura 16 Resultado de la Información Puente Piloto, (Geovisor IDESC)	53
Figura 17 Puente Piloto, (Geovisor IDESC).....	53
Figura 18 Planta, Puente Piloto.....	54
Figura 19 Corte Transversal, Puente Piloto.	54
Figura 20 Corte Longitudinal, Puente Piloto.	54
Figura 21 Levantamiento geométrico elementos del Puente, espesor de losa y andén.	55
Figura 22 Chequeo de magnitudes registradas mediante modelo digital 3D en ContextCapture, espesor de losa y andén.....	55

Figura 23 Planificación misiones de vuelo libre. (a) Forma Circular, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (b) Forma Cuadrícula simple, 5,0m de altura sobre la superficie del puente, - 90° inclinación vertical de la cámara. (c) Forma Arco Longitudinal, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (d) Forma Arco Transversal, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (e) Trayecto debajo del puente, - 1,0m sobre la superficie del puente, +45° inclinación vertical de la cámara.....	57
Figura 24 Levantamiento puntos de control, Puente Piloto, Universidad del Valle. (a) Punto de Control 1 (b) Punto de Control 2 (c) Punto de Control 3.....	58
Figura 25 Localización puntos de control, Puente Piloto, Universidad del Valle	58
Figura 26 Planta Puente Río Claro	60
Figura 27 Alzado Longitudinal Puente Río Claro.	61
Figura 28 Exposición del inspector durante la inspección visual tradicional. Parte superior del puente.....	62
Figura 29 Exposición del inspector durante la inspección visual tradicional. Parte inferior del puente.....	62
Figura 30 Misión Cuadrícula, 20 m de altura sobre el nivel del tablero, 35 m de longitud por trayecto, 5 m de separación entre trayecto, - 90° inclinación vertical de la cámara.....	63
Figura 31 Misión libre, 1 m de altura sobre nivel del río Claro, 18 m de longitud por trayecto, + 30° inclinación vertical de la cámara.....	63
Figura 32 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 8,0m de altura sobre nivel del río Claro, 25 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 30° inclinaciones verticales de la cámara. Lado Derecho....	64
Figura 33 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 8,0m de altura sobre nivel del río Claro, 25 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 30° inclinaciones verticales de la cámara. Lado Izquierdo..	64
Figura 34 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 9,0m de altura sobre nivel del río Claro, 40 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. Hacia K0+000...	64
Figura 35 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 9,0m de altura sobre nivel del río Claro, 40 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. Hacia K0+028...	64
Figura 36 Capturas del Puente realizadas por el VANT. (a) Captura Superior. (b) Captura Lateral. (c) Inspección Lateral. (d) Inspección Superior. (e) Inspección Inferior. (f) Inspección Detallada.	65
Figura 37 Ubicación del inspector durante la inspección visual empleando VANT. Costado derecho del puente.	66
Figura 38. Localización puntos de control 1 y 2, Puente Río Claro.	67

Figura 39. Localización puntos de control 3, Puente Río Claro.	67
Figura 40 Medidas graficas de calidad en los puntos de enlace. (a) Numero de fotos capturando la escena. (b) Incertidumbre de posición de los puntos de enlace, valores medidos en metros (c) Numero de fotos observando los puntos de enlace. (d) Resolución en los puntos de enlace, medido en metros/pixel.	68
Figura 41 Procedimiento para obtener modelo 3D, software ContextCapture. (a) Adición de fotografías. (b) Asignación de puntos de control. (c) Configuración de la aerotriangulación. (d) Procesamiento de la aerotriangulación. (e) Análisis de la información generada en el proceso de aerotriangulación (f) Producción modelo 3D del puente.	69
Figura 42 Patologías evidenciadas durante inspección visual tradicional. (a) Fisuración Transversal (b) Golpe por impacto vehicular (c) Grieta por Movimiento Lateral (d) Exposición del acero de refuerzo.	71
Figura 43 Exposición del inspector durante la cuantificación de daños, inspección visual tradicional. Parte inferior del puente.	72
Figura 44 Identificación de daños severos sobre componentes estructurales del puente: (a) Segregación y discontinuidad elemento de enlace tablero-arco tipo muro (b) Detalle segregación y discontinuidad elemento de enlace tablero-arco tipo muro (c) Grieta por cortante elemento de enlace tablero-arco tipo muro (d) Detalle grieta por cortante elemento de enlace tablero-arco tipo muro (e) Grieta por movimiento lateral de estribo y aleta k0+028 lado izquierdo (f) Detalle grieta por movimiento lateral de estribo y aleta k0+028 lado izquierdo (g) Grieta por movimiento lateral de estribo k0+000 (h) Detalle grieta por movimiento lateral de estribo k0+000 (i) Separación del acero de refuerzo longitudinal (pobre detallado) (j) Detalle separación del acero de refuerzo longitudinal (pobre detallado).	73
Figura 45 Identificación y cuantificación de daño presente en muro de enlace tablero-arco, modelo digital 3D (a) Identificación de daño, segregación (b) Cuantificación área de daño.	74
Figura 46 Patologías evidenciadas durante inspección visual tradicional. (a) Segregación y Socavación Local (b) Eflorescencias (c) Fisura por Volcamiento (d) Infiltración.	78
Figura 47 Modelo digital 3D, ContextCapture.	79
Figura 48 Patologías evidenciadas durante inspección visual empleando VANT. (a) Contaminación del Concreto (b) Exposición del acero de refuerzo (c) Segregación (d) Fisura por Volcamiento.	80
Figura 49 Criterios de Selección Puente Caso de Estudio.	83
Figura 50 Relación de daños sobre puente Rio Claro, Vista en Planta, Inspección Tradicional.	86
Figura 51 Relación de daños sobre Puente Rio Claro, Vista en Corte, Inspección Tradicional.	87

Figura 52 Modelo digital 3D Puente Río Claro, Software ContextCapture. (a) Vista Lateral Derecha (b) Vista Lateral Izquierda (c) Vista en Planta (d) Vista Inferior.....	87
Figura 53 Relación de daños sobre puente Rio Claro, Vista en Planta, Inspección Empleando VANT.	90
Figura 54 Relación de daños sobre Puente Rio Claro, Vista en Corte, Inspección Empleando VANT.	91
Figura 55 Modelo Estructural. (a) Esquema 3D del modelo (b) Asignación geometría del tablero (c) Asignación geometría muro enlace (d) Asignación geometría losa arco.....	95
Figura 56 Tipos de apoyos modelo estructural. (a) Asignación de apoyos al modelo. (b) Apoyo articulado conexión losa inferior arco y estribos. (c) Apoyo articulado conexión losa inferior arco y tajamar. (d) Apoyo empotrado conexión losa superior tablero y estribos	95
Figura 57 Diagrama que relaciona el número de rebote, posición del esclerómetro y resistencia a la compresión aproximada. Manual de instrucciones esclerómetro CONTROLS.	97
Figura 58 Ensayo en campo, esclerometría. (a) Posición esclerómetro. (b) Número de rebote	97
Figura 59 Asignación de cargas sobre modelo estructural. (a) Peso propio componentes. (b) Peso propio carpeta de rodamiento. (c) Carga viva vehicular tándem. (d) Carga de carril	100
Figura 60 Deformación máxima del puente debido a carga viva vehicular y de carril	101
Figura 61 Fuerza por cortante componente muro. (a) Debido al peso propio de los componentes. (b) Debido al peso propio carpeta de rodadura. (c) Debido a la carga viva vehicular y de carril.	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Avance tipo de actividad, Concesiones 4G (ANI, 2022).....	2
Tabla 2 Movimiento de carga nacional por medio de transporte (Mintransporte, 2018)	3
Tabla 3 Porcentaje de Incidencia, Movimiento de carga nacional por medio de transporte ...	4
Tabla 4 Factores que afectan la inspección visual (Megaw, 1979)	12
Tabla 5 Descripción calificación cuantitativa. SIPUCOL	28
Tabla 6 Descripción de las condiciones de estado de un elemento según (Ministry of Transportation Ontario, 2008)	29
Tabla 7 Correlación entre la condición de estado por elemento y calificación numérica del elemento.....	30
Tabla 8 Factor de condición ϕ_c (WSDOT, 2022)	32
Tabla 9 Factor de sistema ϕ_s (WSDOT, 2022)	32
Tabla 10 Factor de Resistencia, ϕ_n . (AIS, 2014).....	33
Tabla 11 Factores de carga viva y muerta (WSDOT, 2022)	33
Tabla 12 Porcentaje incremento carga viva debido al impacto (WSDOT, 2022)	34
Tabla 13 Misión de los VANTs en la ingeniería civil.	38
Tabla 14 Cuadro Comparativo Especificaciones VANTs Phantom 4 PRO V2.0 y Parrot Anafi Work 4K.....	40
Tabla 15. Coordenadas Puntos de control, etapa entrenamiento, Edificio “El Cedro Rosado”	50
Tabla 16. Coordenadas Puntos de control, inspección Puente Piloto.....	59
Tabla 17. Coordenadas Puntos de control, inspección Puente Río Claro.....	66
Tabla 18 Comparación entre inspección visual tradicional e inspección empleando VANT.	81
Tabla 19 Calificación numérica y condición de estado de los componentes del Puente.....	82

Tabla 20 Informe Inspección Visual Tradicional, Puente Río Claro.....	84
Tabla 21 Informe Inspección Visual Empleando VANT, Puente Río Claro.....	88
Tabla 22 Comparación entre inspección visual tradicional e inspección empleando VANT. Puente Río Claro.	91
Tabla 23 Calificación numérica y condición de estado de los componentes del Puente Río Claro.....	93
Tabla 24 Datos obtenidos del ensayo en campo por esclerometría.	98
Tabla 25 Factor de tolerancia unilateral para un nivel defectuoso del 10%	98
Tabla 26 Propiedades mecánicas concreto puente caso de estudio	99
Tabla 27 Máximas fuerzas de cortante interna sobre muro de enlace, según sollicitación de carga.....	102

RESUMEN

Los puentes son estructuras que se caracterizan por conectar dos o más puntos, los cuales presentan un obstáculo entre sí. Su construcción, conservación y funcionamiento influyen en la estabilidad y crecimiento en la economía de cualquier país. Sin embargo, a pesar de su gran importancia, en Colombia, no se cuenta con información actualizada de las condiciones estructurales de estos, puesto que para obtenerla se requiere de esfuerzos laboriosos y dispendiosos.

El siguiente trabajo de investigación buscó evaluar de forma prolija, el uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs), como equipo adicional, para la inspección visual de puentes. Alcanzando como resultados una alternativa asequible, practicable y rentable; que permitió, además, evaluar las condiciones actuales de puentes en concreto reforzado en periodos cortos, a través de información confiable y convincente.

La investigación se llevó a cabo a través de un procedimiento estructurado el cual permitió seleccionar, a partir de criterios técnicos, el estudio de caso. También, el aprender de, maniobrar y dominar, los VANTs como equipo de inspección en puentes. Así como evaluar la idoneidad de los componentes estructurales de un puente en concreto reforzado mediante una evaluación patológica, utilizando imágenes obtenidas por el VANT junto con datos registrados durante la inspección visual tradicional, y la determinación del factor de clasificación.

En síntesis, con este trabajo se muestran las ventajas y desventajas, junto con los aspectos más relevantes del empleo de los VANTs, como herramienta complementaria para el método tradicional de inspección, logrando que este sea más atractivo y que se pueda ejecutar con mayor frecuencia.

ABSTRACT

Bridges is a structure, that is characterized by connecting two or more locations, which present an obstacle between them. The stability and growth nation's economy depends on the gain of knowledge construction, maintenance, and performance of bridges. However, in Colombia, there is no updated information on the bridge's condition, because obtaining it, is necessary for hard-working and uneconomical efforts.

The target of the following research consisted to evaluate in detailed form, the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) use to bridge inspections. Reaching as possible results from an affordable, workable, and cost-effective alternative; As well as permitted to evaluate bridge condition in a brief period, through reliable and believable information.

The development of the investigation was realized through an organized process, based to choose a case study. Also, learn about, pilot, and control, the UAVs. As well as to evaluate the reinforce concrete bridge component's structural suitability, by means of pathology study, employing UAV images together with data recorded during a visual inspection, and the estimation of rating factor.

In summary, this paper exposed to indicate the advantages and disadvantages, and important aspects, of UAVs, use on bridge visual inspection, getting a very attractive and employed method.

1. INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras que permiten conectar dos o más caminos sobre depresiones u obstáculos. Su funcionamiento, estado de conservación y capacidad de carga es fundamental e influyente para la economía de cualquier país. Es por lo anterior que el Instituto Nacional de Vías de Colombia, ha implementado desde el 2013 un programa de infraestructura vial de cuarta generación (4G), el cual contempla la construcción de 751 puentes y el mejoramiento de 211.

Dada la importancia de este tipo de obras, es obligatorio tener un registro actualizado de las condiciones estructurales y capacidad de carga de cada puente. Aún más cuando se ha evidenciado, dentro del programa 4G, construcciones nuevas con fuertes patologías estructurales (e.g. Puente Hisgaura) e incluso desplome en otra (e.g. Puente Chirajara).

En Colombia se ha desarrollado un sistema de administración de puentes, SIPUCOL, el cual tiene como función además de, identificar mediante un conjunto de inspecciones y estudios de capacidad de carga la idoneidad de los puentes, establecer programas de mantenimientos y reforzamientos, según sea la prioridad.

Sin embargo, la implementación de este sistema no es frecuente debido a factores tales como: Altos costos de operación, extensos tiempos de ejecución, alto riesgo en la seguridad de los inspectores, obstaculización del tránsito vehicular y peatonal y adición de cargas debido a las plataformas requeridas para las inspecciones. Conllevando a ser un requisito fundamental poco aplicado.

De manera que, usar equipos tecnológicos e innovadores como son los vehículos aéreos no tripulados (VANTs), como herramienta complementaria para las inspecciones visuales de puentes, permitirá tener una alternativa atractiva desde la óptica económica, eficiencia y segura. Buscando, que se actualice con mayor frecuencia las condiciones y capacidades estructurales de los puentes, así como los programas de mantenimiento y reforzamiento.

1.1.Planteamiento del problema

En Colombia, de acuerdo con el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) hay registrados 3.266 puentes que hacen parte de la red vial nacional que interconecta a todo el país y desde el año 2013 se ha venido implementando un programa de infraestructura vial de cuarta generación (4G), dirigido a reducir la brecha en infraestructura y consolidar la red vial nacional a través de la conectividad continua y eficiente entre los centros de producción y de consumo, con las principales zonas portuarias y con la zonas fronteras del País (Conpes, 2013).

Este programa se está viendo reflejado con la construcción de 133 puentes de 751 planeados y de 75 mejoramientos de puentes de 211 planeados (ANI, 2022), como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Avance tipo de actividad, Concesiones 4G (ANI, 2022)

CONCESIONES 4G	CONSTRUCCIÓN DE PUENTE		MEJORAMIENTO DE PUENTES	
	PLANEADO	EJECUTADO	PLANEADO	EJECUTADO
Autopista al Mar 1	39	0	0	0
Autopista al Mar 2	62	0	0	0
Autopista al Río Magdalena 2	40	0	1	0
Autopista Conexión Norte	2	1	1	1
Autopista Conexión Pacífico 1	59	9	0	0
Autopista Conexión Pacífico 2	44	24	0	0
Autopista Conexión Pacífico 3	50	25	6	6
Bucaramanga - Barrancabermeja - Yondó	19	3	0	0
Bucaramanga - Pamplona	22	0	1	
Cartagena - Barranquilla y Circunvalar de la Prosperidad	31	28	8	8
Honda - Puerto Salgar - Girardot	0	0	0	0
IP - Accesos Norte a Bogotá	2	0	0	0
IP - Ampliación a tercer carril doble calzada Bogotá - Girardot	35	2	1	1
IP - Antioquía - Bolívar	15	7	9	6
IP - Cambao Manizales	0	0	0	0
IP - Chirajara - Fundadores	7	0	0	0
IP - GICA	67	17	0	0
IP - Malla vial del Meta	19	0	0	0
IP - Neiva - Girardot	39	9	78	53
IP - Vías del Nus	27	6	0	0
Mulaló - Loboguerrero	45	0	1	0
Pamplona - Cúcuta	25	0	0	0
Perimetral de Oriente de Cundinamarca	7	0	0	0
Popayán - Santander de Quilichao	36	0	0	0
Puerta de Hierro - Palmar de Varela y Carreto - Cruz del Viso	0	0	0	0

CONCESIONES 4G	CONSTRUCCIÓN DE PUENTE		MEJORAMIENTO DE PUENTES	
	PLANEADO	EJECUTADO	PLANEADO	EJECUTADO
	Rumichaca - Pasto	7	0	0
Santana - Mocoa - Neiva	0	0	0	0
Transversal del Sisga	3	2	0	0
Villavicencio - Yopal	49	0	105	0

Un puente es definido como una estructura, erigido sobre una depresión o un obstáculo, tal como el agua, carretera, vía férrea, que tiene una vía o camino para el transporte del tráfico u otra carga dinámica (Departments Of The Army And The Air Force., 1994). La Norma Colombiana de Diseño de Puentes (LRFD – CCP 14) define los puentes como cualquier estructura que tenga un ancho no menor de 6 m que forma parte de una carretera o que está localizado sobre o bajo una carretera.

El funcionamiento, el buen estado de conservación y la capacidad de carga de los puentes es importante para mantener la economía y el crecimiento del país, esto es apreciable en las estadísticas de movimiento de carga en el sector transporte de la economía colombiana donde se puede notar qué, para el año 2018, más del 80% de la carga nacional por modo de transporte es a través del sistema terrestre, como se puede observar en Tablas 2 y 3.

Tabla 2 Movimiento de carga nacional por medio de transporte (Mintransporte, 2018)

	TERRESTRE	FERROVIARIO			FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón	Total				
2002	84.019	ND	31.032	31.032	3.480	122	532	119.185
2003	99.782	37	42.744	42.781	3.725	132	928	147.348
2004	117.597	317	45.865	46.182	4.211	129	588	168.707
2005	139.646	308	48.919	49.227	4.863	135	400	194.271
2006	155.196	314	49.394	49.708	4.025	138	509	209.576
2007	183.126	375	52.829	53.204	4.563	137	454	241.484
2008	169.714	236	58.236	58.472	4.953	123	372	233.634
2009	173.558	254	59.144	59.398	4.070	109	364	237.499
2010	181.021	366	66.659	67.025	3.691	119	353	252.209
2011	191.701	204	74.350	74.554	3.650	124	646	270.029
2012	199.369	20	76.780	76.800	3.474	127	388	280.158
2013	220.309	97	76.684	76.781	2.968	149	774	300.980
2014	232.480	174	42.733	42.907	2.858	163	601	279.009
2015	235.112	230	47.705	47.935	3.524	179	969	287.719

	TERRESTRE	FERROVIARIO			FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón	Total				
2016	234.451	643,1	54.650	55.293	3.938	185	1.786	295.653
2017	233.964	15,9	50.419	50.435	5.200	177	3.563	293.339
2018	243.171	23,1	47.533	47.556	5.039	176,7	4.352	300.296

Nota: Miles de Toneladas

Tabla 3 Porcentaje de Incidencia, Movimiento de carga nacional por medio de transporte

AÑO	TERRESTRE	FERROVIARIO			FLUVIAL	AÉREO	CABOTAJE	TOTAL
		Concesiones (sin incluir carbón)	Carbón					
2002	70,49%	ND	26,04%	2,92%	0,10%	0,45%	100%	
2003	67,72%	0,03%	29,01%	2,53%	0,09%	0,63%	100%	
2004	69,70%	0,19%	27,19%	2,50%	0,08%	0,35%	100%	
2005	71,88%	0,16%	25,18%	2,50%	0,07%	0,21%	100%	
2006	74,05%	0,15%	23,57%	1,92%	0,07%	0,24%	100%	
2007	75,83%	0,16%	21,88%	1,89%	0,06%	0,19%	100%	
2008	72,64%	0,10%	24,93%	2,12%	0,05%	0,16%	100%	
2009	73,08%	0,11%	24,90%	1,71%	0,05%	0,15%	100%	
2010	71,77%	0,15%	26,43%	1,46%	0,05%	0,14%	100%	
2011	70,99%	0,08%	27,53%	1,35%	0,05%	0,24%	100%	
2012	71,16%	0,01%	27,41%	1,24%	0,05%	0,14%	100%	
2013	73,20%	0,03%	25,48%	0,99%	0,05%	0,26%	100%	
2014	83,32%	0,06%	15,32%	1,02%	0,06%	0,22%	100%	
2015	81,72%	0,08%	16,58%	1,22%	0,06%	0,34%	100%	
2016	79,30%	0,22%	18,48%	1,33%	0,06%	0,60%	100%	
2017	79,76%	0,01%	17,19%	1,77%	0,06%	1,21%	100%	
2018	80,98%	0,01%	15,83%	1,68%	0,06%	1,45%	100%	

Fuente: Elaboración propia

Dada la importancia de los puentes, es fundamental tener un registro actualizado de las condiciones estructurales de cada uno de estos. Por consiguiente, El INVIAS dentro de su proceso de mejoramiento ha desarrollado el Sistema de Administración de Puentes de Colombia, SIPUCOL, de la red vial nacional. El cual es un sistema que identifica los puentes que se encuentran en estado crítico y realiza la priorización de acuerdo con los resultados de las inspecciones principales, inspecciones especiales, inspecciones rutinarias y la capacidad de carga (Muñoz et al., 2005).

Las inspecciones en puentes deben ser realizadas de acuerdo con el Manual para la Inspección de Puentes y Pontones, el cual presenta unas recomendaciones para que un profesional calificado y su equipo de trabajo puedan realizar la inspección visual y obtener un informe de los daños encontrados durante la ejecución de esta, permitiendo identificar el tipo, la magnitud, la severidad y la localización de los elementos afectados.

Dentro del procedimiento a seguir, de acuerdo con el manual, el profesional calificado entre muchas actividades debe tomar mínimo dos fotografías panorámicas de la estructura, en superficie y perfil. También, debe verificar mediante inspección visual cada uno de los elementos de la estructura (equipamientos, superestructura, subestructuras, cimentación y el cauce) y posteriormente elaborar un esquema general de los elementos de la estructura que permita ubicar los diferentes daños identificados. Finalmente, debe realizar una cuantificación de los daños existentes y elaborar un informe general del estado de la estructura.

La inspección visual es el método más común utilizado para determinar el estado de los puentes en todo el mundo. Andamios, canastas de inspección y plataformas móviles, son los equipos más comunes usados para la inspección bajo puentes en Colombia y para zonas con acceso difíciles. Sin embargo, estos presentan un alto costo para su alquiler, compra o mantenimiento y son difíciles de programar debido a que son escasos en áreas donde se localizan los puentes.

Asimismo, al utilizar estos equipos, se generan cargas adicionales al puente, aumenta los riesgos en la seguridad del personal encargado de la inspección y dificulta el tránsito vehicular y peatonal. En consecuencia, hacen que la inspección visual en puentes sea una actividad necesaria y de suma importancia, pero al mismo tiempo un método de reconocimiento poco contratado.

Es por lo anterior que, emplear una herramienta alterna de inspección como son los VANTs en vez de andamios, canastas de inspección o plataformas, podrían causar una forma de inspección más económica, segura y eficiente. Generando además de un aumento en las frecuencias de inspección, registro valioso y en tiempo reducido de las patologías presentes en el puente, las cuales son la base para determinar su estado estructural y su factor de clasificación.

1.2. Alcance del trabajo de investigación

El presente trabajo de investigación, buscó evaluar el uso de los VANTs durante la etapa de inspección en puentes. De manera que, se tenga una alternativa adicional a la descrita actualmente por el Manual de Inspección Visual de Puentes del INVIAS que permita obtener de forma oportuna y bajo condiciones de seguridad y economía el estado de conservación de los puentes en Colombia, mediante la calificación y cuantificación de sus patologías.

Adicionalmente, admitió el hecho, a partir de la información obtenida durante las inspecciones, de determinar la capacidad estructural del puente para soportar las solicitaciones de cargas predominantes, a través del factor de clasificación o Rating Factor (En inglés).

Este trabajo se limitó a inspecciones de puentes en concreto reforzado, que presentan niveles de daños estructurales notorios, que hayan sido puestos en servicio antes del año 2015 y que cuenten con las condiciones necesarias para ser inspeccionado de manera tradicional y mediante el uso de VANTs.

Por último, esta investigación permitió que profesionales dedicados a la inspección de puentes e investigación, vean el uso de los VANTs como una herramienta innovadora y eficiente, que no solo logra reducir el tiempo de inspección, sino que a partir del procesamiento de imágenes y desarrollando algoritmos precisos, pueden lograr detectar daños estructurales de manera automática.

1.3.Objetivo general

Evaluar el uso de VANTs para la inspección visual de puentes.

1.4.Objetivos específicos

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Establecer criterios técnicos que permitan la selección adecuada del puente en concreto reforzado objeto del estudio de caso.
- Proponer una técnica de inspección visual de puentes utilizando vehículos aéreos no tripulados (VANTs).
- Evaluar la idoneidad del sistema estructural de un puente a base de su estado de conservación y factor de clasificación (Rating Factor).

1.5. Justificación del trabajo de investigación

Los puentes son unas estructuras implementadas por el ingeniero civil para comunicar de una manera más eficiente dos o más puntos geográficos que presentan algún tipo de obstáculos, por ejemplo, vías o puentes existentes, depresiones geográficas o un cuerpo de agua entre otros. Sus construcciones y altos desempeño permiten un buen comportamiento en la economía de cualquier país. Este es el caso de Colombia, que bajo el programa de infraestructura vial de cuarta generación (4G), quiere consolidar la red vial a través de conectividad continua y eficiente entre los centros de producción y de consumo.

Siendo consecuente con lo anterior, para garantizar esa consolidación, se requiere de puentes bien estudiados, iniciando desde la etapa de concepción hasta la etapa de mantenimiento. Buscando siempre el buen funcionamiento de estos.

En Colombia hay una realidad difícil de disipar y es que se están diseñando y construyendo obras sin pensar en su durabilidad y estabilidad. Ejemplo preciso lo podemos encontrar en dos grandes proyectos que hacen parte del programa 4G y que han terminado, uno en colapso (Puente Chirajara) y otro puesto es funcionamiento (Puente Hisgaura) con aspectos estructurales inapropiados, colocando en juicio el buen funcionamiento de la ingeniería en Colombia.

Siendo estos proyectos nuevos, desarrollados con altas tecnologías, estudios avanzados, materiales innovadores y que presentaron patologías durante su construcción. Surgen los siguientes interrogantes, ¿Cuál es el estado actual de todo los puentes nuevos y existentes en Colombia?, ¿Qué programa está implementando el INVIAS, para tener actualizado estos estados?, ¿Con que frecuencia se realizan las inspecciones, para determinar el estado de los puentes en Colombia? y ¿Cuál es la metodología de inspección de puentes actualmente en Colombia?

Gran parte de estos interrogantes, se pueden resolver gracias al Sistema de Administración de Puentes en Colombia, SIPUCOL, implementado por el INVIAS, con el objeto de mejorar y complementar la gestión técnica y administrativa de los puentes en el país. Este sistema integra cuatro módulos: Inventario, inspección principal, inspección especial, inspección rutinaria y capacidad de carga.

Sin embargo, el sistema no es claro con respecto a la frecuencia con que se debe realizar estas inspecciones. Muñoz y Gómez (2013), mencionan que se han realizado tres periodos de

inspección, un primer periodo comprendido entre 1996 – 1997, un segundo entre 2001 – 2002 y un tercero entre 2007 – 2008. De lo anterior podemos observar que las frecuencias con que se realizan las inspecciones en puentes en Colombia son aproximadamente de 4 a 5 años. Mientras que en países potencias esta frecuencia es de 2 años.

La implementación de este sistema no es frecuente debido a la complejidad y a los costos elevados que se generan al realizar las inspecciones visuales.

Por lo tanto, evaluar el uso de los VANTs para inspecciones conllevó a tener una herramienta tecnológica alterna, que complementa a las utilizadas actualmente, permitiendo determinar con mayor frecuencia y a costos reducidos, el estado físico y la capacidad de soporte de los puentes en Colombia. Resultados que conducen a tomar decisiones acertadas en consideración a intervenciones futuras, garantizando su funcionalidad, seguridad y durabilidad.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Inspección de Puentes

Inspección es un procedimiento planificado, organizado y sistemático, empleado para examinar y evaluar las condiciones y el estado de una estructura. Sus objetivos principales, de acuerdo con el Manual de Inspección de Ontario – Canadá (Ministry of Transportation Ontario., 2008) son: Mantener las estructuras en condiciones seguras, proteger y prolongar su vida útil, identificar el mantenimiento, reparación y rehabilitación necesario y proporcionar una base al sistema de administración de estructuras para la planificación y financiamiento del mantenimiento y rehabilitación de estructuras.

Evaluar el estado estructural de un puente y determinar si este requiere de mantenimiento, reforzamiento, rehabilitación e incluso reemplazo de elementos, debería ser planeado con tiempo, basándose de información detallada y actualizada de sus condiciones y las cuales deben estar registrada en el sistema de administración de puentes. Esta información es recopilada con el tiempo a través de inspecciones periódicas.

Existen diversos tipos de inspecciones de puentes, las cuales dependen de su metodología de aplicación. Hay inspecciones que, para su ejecución, es indispensable intervenir las estructuras. Este tipo de inspección son conocidas como técnicas de evaluación destructivas. Sin embargo, existen otras las cuales se pueden ejecutar sin la necesidad de intervenir la estructura. Esta última es conocida como técnicas de evaluación no destructivas.

Según el manual de inspección de puentes que se emplee, se podrá encontrar diversos tipos de inspecciones o técnicas de evaluación destructivas o no destructivas. Ryan et al (2012), describen siete tipos de inspecciones: Inicial o inventario, rutinaria, de daños, profundas, críticas para fracturas, bajo el agua y especiales. Por su parte *Ministry of Transportation Ontario* (2008), describe cinco tipos: Inventario, general, detallado, de emergencia y evaluación adicional. En cambio, el Sistema de administración de Puentes de México menciona dos tipos de inspecciones: De evaluación y detallada. Por último, en Colombia, en el SIPUCOL presentan cuatro tipos de inspecciones: Tipo inventario, principal, especial y rutinaria, las cuales son descritas a continuación.

2.1.1. Inspección tipo inventario

Inventario es empleado para obtener información general, ordenada y eficiente del puente, así como de su geometría, sus bienes representativos y su operación. Es importante establecer en esta inspección inicial o de inventario, aspectos como son el nombre de la estructura, número de identificación, localización geográfica, departamento, municipio, tipo de estructura y subestructura, año de construcción y reparación o rehabilitación, entidad encargada entre otros.

El inventario debe incluir exclusivamente datos de carácter casi permanente, útiles para tomar decisiones básicas y no para decisiones de ingeniería. Además, de acuerdo con (IMT., 1994) debe separarse de la forma del inventario las cuestiones referentes a la detección y evaluación de daños.

La información de inventario también puede ser obtenida durante la construcción del puente o antes de la inspección inicial y verificada durante su ejecución. Esta información es modificada únicamente después de una rehabilitación, reconstrucción o cambios administrativos. (Mintransporte, 2017).

2.1.2. Inspección Principal

En cuanto a la inspección principal o visuales, la información que se registra tiene como finalidad identificar y localizar los daños presentes en la estructura, así como de definir su condición de estado. De igual importancia debe mantener la seguridad del tránsito, estimar la necesidad de reparación, vigilar los cambios de condiciones de los puentes y evaluar las ejecuciones de mantenimiento rutinario y limpieza de los puentes (Mintransporte, 2017).

La inspección visual es el método de evaluación más antiguo. Barba et al (2012), las define como el método de exploración física que se efectúa por medio de la vista. Sin embargo, Moore et al (2001) mencionan que la definición más común de la inspección visual incluye todas las técnicas de inspección y evaluación donde se emplean los cinco sentidos con solo herramientas muy básicas como, por ejemplo, linternas, martillos que suenan, cintas métricas, plomadas, etc. Por otra parte, el sistema de administración de puentes (SIPUCOL) define la inspección principal como una investigación visual sistemática de todas las partes accesibles de una estructura.

De todas las inspecciones descritas en los diferentes manuales, la correspondiente a la inspección visual es la técnica de evaluación, no destructiva, más frecuente (Moore et al., 2001) y es la primera herramienta en emplearse en una inspección de puentes (Rolander et al., 2001).

A pesar de ello, estudios han revelado que existen factores que afectan la inspección visual. Megaw (1979), propone cuatro factores, los cuales son: Factores relacionados al inspector, factores físicos y ambientales, factores relacionados con las actividades a ejecutar y factores organizacionales. Adicionalmente, en la Tabla 4 se presenta la siguiente lista de factores según su categoría.

Tabla 4 Factores que afectan la inspección visual (Megaw, 1979)

Factor relacionado con el inspector	Factores físicos y ambientales	Factores relacionados con las actividades a ejecutar	Factores Organizacionales
<ul style="list-style-type: none"> ● Agudeza visual ● Color de la visión ● Movimiento de los ojos ● Estrategia de escaneo ● Edad ● Experiencia ● Personalidad ● Sexo ● Inteligencia 	<ul style="list-style-type: none"> ● Iluminación ● Ruidos ● Plataforma de trabajo 	<ul style="list-style-type: none"> ● Tiempo de inspección ● Ritmo vs Sin Ritmo ● Dirección del movimiento ● Forma del área de visualización ● Densidad de actividades ● Distribución de las actividades ● Probabilidades de fallas ● Mezclas de fallas ● Visibilidad de las fallas ● Complejidad del producto 	<ul style="list-style-type: none"> ● Número de inspectores ● Instrucciones ● Retroalimentación ● Avances ● Entrenamiento ● Selección ● Estándares ● Tiempo de ejecución de la actividad ● Turno de trabajo ● Privación del sueño ● Factores sociales ● Motivación ● Incentivos ● Información sobre el precio del producto ● Rotación de trabajo

En cuanto a la frecuencia con que se ejecute la inspección visual, se podrá alcanzar los objetivos planteados. Presentar un rango de tiempo conlleva a tener un mayor control del estado de los puentes. Es por lo anterior que países como Estados Unidos, Canadá, Dinamarca, entre otros, presentan intervalos de tiempo precisos entre 1 a 3 años, dependiendo la importancia de las estructuras. Sin embargo, Colombia, en su manual menciona el intervalo de forma imprecisa mediante la expresión “intervalos regulares” conllevado a realizar inspecciones con frecuencias distintas en los diferentes puentes del país. Incluso, como se puede evidenciar en los informes de inspección principal del INVIAS, existen frecuencias de ejecución con más de 5 años. Periodo que, para el autor de este documento, es considerado peligroso por todo lo que se puede presentar, en cuanto a deterioro, en un puente de concreto reforzado.

A pesar de que no se puede explicar el motivo exacto del porque en Colombia se presentan grandes intervalos para la ejecución de una inspección principal, se puede pensar que uno es debido a las grandes desventajas que este método presenta. Sin duda alguna, la inspección visual a pesar de ser el método de evaluación más empleado en los países, son inherentes al peligro del inspector (Stromberg, 2011). Adicionalmente debido a la necesidad de utilizar equipos especiales para llegar a inspeccionar lugares de difíciles accesos (p. ej. andamios, plataformas colgantes, camiones, canastillas móviles, planchones, etc) y los altos costos que generan la movilización de estos, hacen que este tipo de inspecciones se conviertan en técnicas poco llamativas a las entidades encargadas de la administración y conservación de los puentes, sobre todo en países subdesarrollados como es el caso de Colombia.

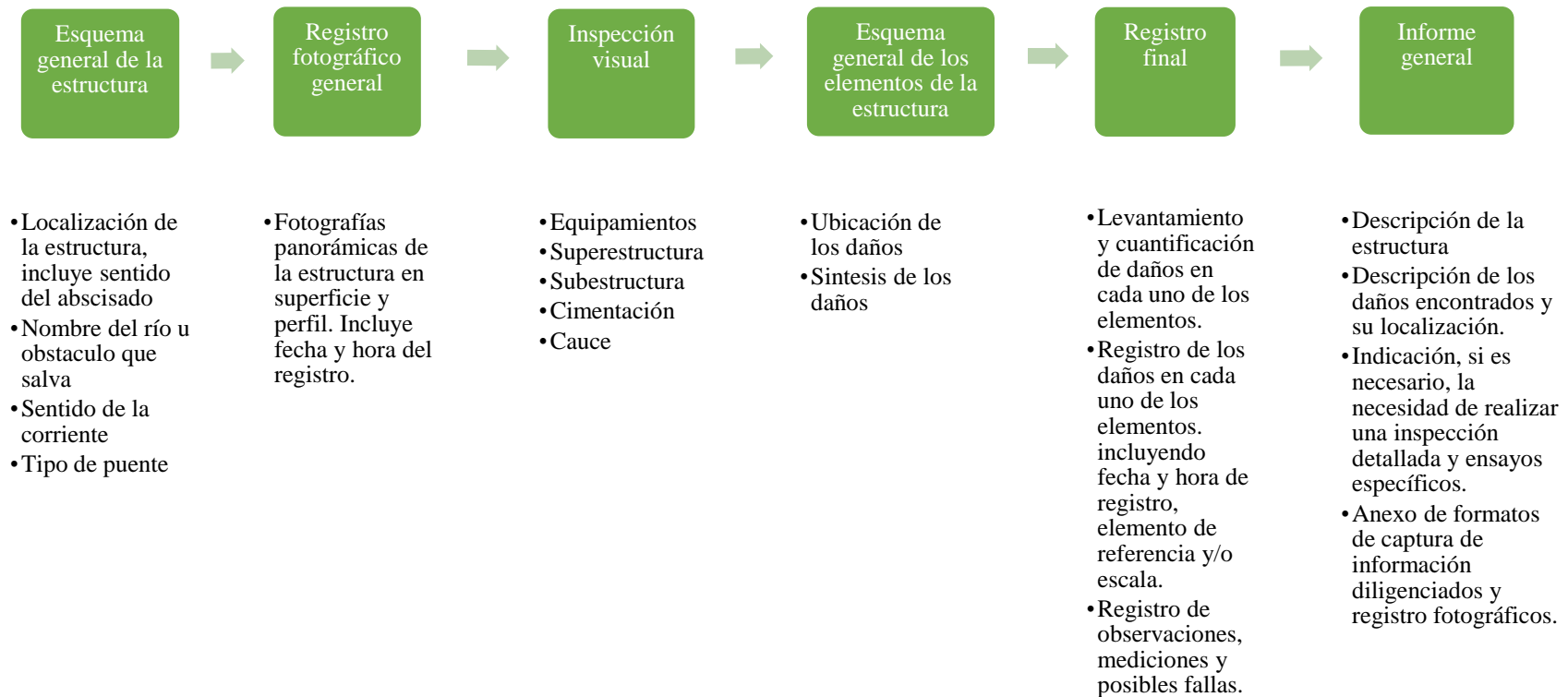
Es por lo anterior y buscando la forma de implementar nuevas tecnologías en el campo de la inspección visual, con el objetivo de reducir el peligro del inspector y los costos directos e indirectos de este tipo de actividad, es que se propone el empleo de VANTs en la inspección visual de puentes, el cual es uno de los objetivos principales de este documento.

Por otra parte, como resultado de la inspección se deberá presentar como mínimo un esquema general de la estructura, los formatos de captura de información diligenciados, observaciones claras y detalladas, registro fotográfico y un informe general con reporte de daños y estado de la estructura (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

En la Figura 1 se relaciona todo el procedimiento que se debe seguir al momento de realizar una inspección visual de un puente según (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Con relación a los equipos, se debe contar con herramientas mínimas necesarias para adelantar la inspección visual. Entre las que se encuentran como fundamentales están: La cámara fotográfica preferiblemente digital y/o cámara de video, binóculo, lupa, cinta métrica y/o flexómetro, comparador de fisuras o fisurómetro de bolsillo, linterna, grabadora, formato de captura de

Figura 1 Procedimiento inspección según (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).



información, crayolas o marcadores para resaltar fisuras, martillo, cincel, escalera, andamios, plataformas colgantes, elementos de seguridad y protección.

Por último, debido a la importancia de los resultados que se obtienen en este tipo de inspección, en cuanto a la decisión de programar un mantenimiento preventivo o una inspección especial para una posterior rehabilitación, reforzamiento o reemplazo de elementos. El equipo de trabajo encargado debe estar compuesto por un ingeniero civil calificado y un grupo de auxiliares que éste considere necesario.

2.1.3. Inspección Especial

Referente a la inspección especial son auscultaciones profundas de la estructura que incluyen ensayos destructivos y no destructivos especializados en campos y en laboratorio (INVIAS & DCD, 1996). Aquí se investiga, con mayor determinación, los elementos cuyo estado estructural se encuentran en condiciones alarmantes y que fueron identificados en la inspección principal o visual. Por su alta complejidad la hace una actividad costosa debido a que se requiere además de profesionales capacitados, con experiencia en el campo de la inspección y del diseño estructural, equipos exclusivos y de altas tecnologías.

Este tipo de inspección también se ejecuta en circunstancias especiales como la ocurrencia de un sismo, la aplicación de una carga intensa no convencional, por colisión de un vehículo, por explosiones, inundaciones, creciente de ríos etc.

La inspección especial comprende las siguientes actividades: Planeación inicial, planeación detallada de pruebas, ejecución de pruebas, determinación de causas y extensión de daños con base en los resultados de las pruebas, establecimiento de estrategias de reparación, análisis económicos de las estrategias, elaboración de informe (INVIAS & DCD, 1996). También se puede considerar un análisis estructural del puente.

En relación con su frecuencia de ejecución, esta podría ser determinada de acuerdo con la importancia de la estructura, condiciones ambientales y el costo (Raina, 2010)

2.1.4. Inspección Rutinaria

Por su parte las inspecciones rutinarias, incluye una frecuente revisión superficial de la estructura con el propósito de garantizar la utilidad y seguridad del tránsito a diario, evitar o

demorar el desarrollo del deterioro (mantenimiento preventivo) y restituir a la estructura o a cualquiera de sus componentes a una condición aceptable (INVIAS & DCD, 1996).

Por otra parte, de acuerdo con NCHRP (2016), una inspección rutinaria: Regularmente consiste en una inspección agendada donde se observa y/o se mide una determinada condición física o funcional del puente, identificando algún tipo de cambio con respecto a las condiciones iniciales y asegurar que la estructura continúa satisfaciendo los requisitos de servicios actuales.

Los propósitos en una inspección rutinaria se pueden alcanzar de acuerdo con los trabajos de mantenimiento menor o rutinario y limpieza, o de mantenimiento mayor y limpieza.

Por lo que se refiere a su frecuencia, esta podría ser mensualmente inclusive anualmente.

2.2.Patologías Estructurales En Puentes de Concreto Reforzado

El planteamiento y ejecución de un proyecto en cuanto a diseño, construcción y funcionamiento de un puente están relacionados con su serviciabilidad y durabilidad. Una mala concepción de estas son las causantes iniciales de las patologías estructurales. Por lo tanto, comprender y estudiar dichas patologías nos permitió, no solo conocer su origen, sino que nos permitió evaluar el estado estructural de un puente, su capacidad de carga y el efecto en su durabilidad.

La patología estructural es la ciencia que estudia y analiza los daños presentes en el concreto u otro material estructural. Identificando el tipo, su origen, consecuencias y reparación.

Sánchez De Guzmán (2006) define la patología como el estudio sistemático de los procesos y características de las “enfermedades” o los “defectos” y “daños” que pueden sufrir el concreto, sus causas, sus consecuencias y sus remedios.

También se puede entender la patología estructural como el nuevo campo de la ingeniería de la construcción que se ocupa del estudio de los orígenes, formas de manifestación, consecuencias y mecanismos de ocurrencia de fallas y sistemas de degradación estructural (Moreira de Souza & Ripper, 2009).

2.2.1. Daños por diseño

Estos tipos de daños nacen de la misma etapa de concepción y diseño del proyecto. De acuerdo con (INVIAS & Universidad Nacional, 2006) las fallas más comunes en esta etapa tienen las siguientes causas:

- Ausencia de cálculos.
- Estimación inadecuada de cargas y condiciones de servicios.
- No considerar juntas de construcción.
- Uso inadecuado de los programas de computador.
- Mal dimensionamientos de los elementos estructurales.
- Faltas de especificaciones y característica de los materiales.
- Ausencia o falta de detalles constructivos y estructurales.
- Inapropiada disposición o por insuficiencia del acero de refuerzo.
- Uso de especificaciones obsoletas.

A continuación, se hace una descripción de las fallas más representativas que se originan por el deficiente desarrollo del diseño de un puente.

2.2.1.1. Fisuras

Las fisuras se originan debido a los esfuerzos que actúan en los elementos estructurales y se caracterizan por su localización, intensidad y magnitud. Su probabilidad de ocurrencia es alta ya que se pueden manifestar simplemente con la aplicación de las cargas de servicio, en este caso las fisuras presentan un ancho igual o menor a 0,5mm (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Cuando el ancho de la fisura supera los 0,5mm se considera que el elemento presenta patología y su resistencia y estabilidad puede estar en suspenso, debido a un posible error de cálculo. En este plano de falla generado, la fisura, adquiere la denominación de “grieta” (Sanchez De Guzmán, 2006).

Para su estudio y comprensión, es importante describirla a través de las medidas de su longitud, ancho, profundidad, sentido de ocurrencia, inclinación, cantidad y separación entre estas.

El ancho de la fisura o grietas se puede medir a través de un comparador de fisuras. Su longitud mediante una cinta métrica. Su profundidad puede obtenerse con un calibrador pie de rey y su inclinación a través de una regla tipo transportador.

Dependiendo las negligencias cometidas en la etapa de diseño, se pueden manifestar fisuras por flexión, cortante, torsión o combinaciones de estas.

- Fisuras por flexión

Las fisuras por flexión generalmente tienen una orientación perpendicular a la dirección del acero de refuerzo longitudinal. Estas inician en la fibra extrema sometida a tracción del elemento y se prolonga hasta el eje neutro. Se puede presentar por insuficiencia en la cantidad de acero de refuerzo a tracción, deficiente estimación de las hipótesis de cargas o por sobrecargas.

El ancho de las fisuras indica el nivel del esfuerzo de tracción al que han sido sometidas el acero de refuerzo. Anchos pronunciados indican altos esfuerzos por sobrecargas (INVIAS & Universidad Nacional, 2006)

- Fisuras por cortante

Las fisuras por cortante presentan una orientación de 45° con respecto al acero de refuerzo longitudinal. Su ancho es variable y normalmente se encuentran separadas a la misma distancia de separación del acero de refuerzo transversal (estribos). Las fisuras por cortante se presentan cercas a los apoyos de los elementos o en aquellos lugares donde actúen cargas puntuales y son originadas por diversas razones las cuales se encuentran deficiente sección transversal del elemento, insuficiente resistencia específica a la compresión del concreto, separaciones excesivas del acero de refuerzo transversal (estribos) o baja resistencia específica a la fluencia del acero de refuerzo transversal (estribos) (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Las fisuras por cortante siempre atraviesan todo el espesor de la viga y su ancho depende de la sección de la viga (ancho grande en secciones altas y esbeltas) y/o la magnitud de los esfuerzos de cortante (más anchas si el esfuerzo es grande) (Sanchez De Guzmán, 2006).

- Fisuras por torsión

Las fisuras por torsión son muy similares a las de cortante, diferenciándose en que estas rodean en forma de espiral o helicoidal la sección de un elemento estructural. Se pueden presentar por

grandes esfuerzos a torsión e insuficiente acero de refuerzo tanto longitudinal como transversal que puedan resistir estos esfuerzos.

- Aplastamiento local

Las fracturas o grietas por aplastamiento tienen origen en la alta concentración de cargas que se presentan en las zonas de apoyo de los elementos simplemente apoyados, o en las zonas de anclaje para el preesfuerzo de torones y cables (Sanchez De Guzmán, 2006)

Los daños producidos por aplastamiento tienden a fracturar la sección de concreto localizada directamente bajo la carga concentrada. Cuando en los elementos de apoyos no existen una transición adecuada mediante mecanismos de amortiguamiento, es común la presencia de fracturas por aplastamiento, en el concreto del elemento de apoyo (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

2.2.1.2. Deflexiones excesivas

Las deflexiones excesivas son las deformaciones que sufren los elementos de la estructura y cuyos valores sobrepasan los límites máximos permitidos por el código colombiano de diseño sísmico de puentes. Estas deflexiones pueden ser ocasionadas por una deficiente rigidez de la estructura o debido a la aplicación de cargas no contempladas en el diseño inicial. Adicionalmente, como se presenta en el capítulo de asentamientos, las deflexiones excesivas también pueden ser ocasionadas por movimientos diferenciales de la cimentación.

2.2.1.3. Asentamientos

Corresponde a los movimientos verticales diferenciales de la estructura. Se originan por un inadecuado estudio geotécnico o de la cimentación. Se manifiesta a través de fisuras en la parte superior e inferior de las vigas adyacentes a los apoyos, fisuras o fracturas en las conexiones entre las vigas y los apoyos, deformaciones y giros en la subestructura y superestructuras.

Dependiendo de los movimientos diferenciales de la estructura se pueden presentar fallas superficiales, si los movimientos son pequeños y el problema es carácter visual, o profundas, si los movimientos son grandes y la estructura no sea lo suficientemente rígida lo cual se generan fracturas en los elementos.

2.2.1.4. Volcamiento

Este proceso puede presentarse directamente en las estructuras por mal dimensionamiento de los elementos, por diseños inadecuados o insuficientes (cimentación-estructura), e indirectamente como consecuencia de la generalización de los daños presentes en la estructura (socavación, asentamientos diferenciales) y como resultados de eventos fortuitos no previstos tales como sismos, deslizamientos y explosiones, entre otros (INVIAS & Universidad Nacional, 2006)

2.2.1.5. Vibración excesiva

Son movimientos en las estructuras debido a las vibraciones generadas por sobrecargas, deficiencia en la rigidez, elementos esbeltos y/o cargas no consideradas en la etapa de diseño. Este tipo de fallas son consideradas peligrosas dado que su efecto es acumulativo, lo que puede representar en los elementos y en la estructura en general, microfisuras, fisuras, grietas, aumento en el ancho de las fisuras preexistente, deflexiones, sobreesfuerzos e inclusive el colapso (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Para controlar las vibraciones excesivas es importante realizar un estudio detallado de la estructura y las cargas que ocasionan su vibración. El éxito radica en evitar que la frecuencia natural de la estructura de apoyo de la fuente vibratoria (maquinaria u otra), sea aproximada a la frecuencia de la carga perturbadora. La relación entre la frecuencia natural de la estructura y la frecuencia de la carga trastornante debe mantenerse fuera del rango de 0,5 a 1,5 (Sanchez De Guzmán, 2006)

Existen diversas metodologías y herramientas que se utilizan para monitorear y evaluar las vibraciones y el comportamiento de los puentes. Entre las metodologías se encuentran los ensayos de carga dinámica que requiere de equipos costosos para su ejecución (p. ej. equipos para generar la excitación y equipos para registrar la respuesta del puente) (Ruiz & Cocco, 2014)

2.2.2. Daños por construcción

De acuerdo con INVIAS & Universidad Nacional (2006), estos daños pueden originarse por la utilización de los materiales con calidad inadecuada (cemento, agregados, agua), problemas en la dosificación, la producción, el transporte, la colocación y el curado. Las fallas más comunes durante el proceso de construcción se dan por las siguientes causas.

- Inadecuada interpretación de los planos.

- Equivocada localización del refuerzo.
- Deformaciones en la formaleta.
- Falta de control de la formaleta antes y durante el vaciado del concreto.
- Descimbrado inadecuado o anticipado.
- Desplazamiento del acero de refuerzo durante el vaciado.
- Prácticas deficientes en la colocación y compactación del concreto.
- Empleo de concreto con dosificaciones inadecuadas.
- Ausencia o mala protección y curado del concreto.
- Carga prematura de la estructura.
- Falta de control de calidad en los materiales.

2.2.2.1.Hormigueros

Los hormigueros son zonas vacías que quedan en el concreto endurecido y son causados por malas prácticas de vibración del concreto, inadecuada dosificación del concreto y determinación del tamaño máximo nominal del agregado grueso, altas densidades del acero de refuerzo.

Este tipo de falla se presenta con mayor frecuencia en zonas donde confluyen muchos aceros de refuerzo. No tener un plan programado de vibración o un estudio pertinente del tipo de concreto a utilizar son los motivos primordiales para la manifestación de hormigueros.

2.2.2.2.Segregación

La segregación es la separación entre la pasta de cemento y el agregado grueso del concreto. De igual manera que el hormiguero, la segregación puede manifestarse por malas prácticas de vibración del concreto.

Sin embargo, otros factores que influyen en su ocurrencia de acuerdo con INVIA S & Universidad Nacional (2006), son: Dosificación inadecuada del concreto, concreto vertido de alturas excesivas, empleo de agregado grueso sin aparente cohesión, exceso de agregados gruesos o finos.

2.2.2.3. Fisuras por contracción plástica

Las fisuras por contracción plástica ocurren cuando el concreto está en estado fresco, generalmente dentro de la primera hora de fundido, aunque muchas veces no se nota hasta mucho después. El concreto en estado plástico aporta poca resistencia a las tensiones que se producen durante su endurecimiento, lo que ocasiona que este se fisure a través de la pasta de cemento y alrededor del agregado y el acero de refuerzo.

Este tipo de fisuras son comunes en losas, especialmente cuando presentan relación superficie libre / volumen mayor a 3,5m. El ancho de este tipo de fisura oscila entre 0,2mm a 0,4mm y su longitud puede alcanzar hasta 1,5m (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

La retracción por secado y la retracción hidráulica se manifiestan mediante fisuras que surgen durante las primeras horas después de la fundida, producto de la pérdida de agua por evaporación y del proceso de endurecimiento del concreto, si el elemento se encuentra restringido en su movimiento por la formaleta.

Las fisuras por retracción por secado y la retracción hidráulica pueden manifestarse de forma diagonal, aproximadamente 45 grados en el borde la losa y pueden estar separadas cada 0,2m a 2,0m. También ocurren en dirección normal al viento. Otra manera de manifestarse es siguiendo un patrón el cual puede ser el formado por el acero de refuerzo.

Las fisuras por retracción usualmente atraviesan el espesor total de una losa delgada. Sin embargo, se puede evaluar la profundidad de penetración mediante la toma de núcleos o el humedeciendo la losa y observar si el agua traspasa el espesor de la losa.

2.2.2.4. Construcción inadecuada por juntas frías

La continuidad entre concretos vaciados en diferentes etapas que no se tratan correctamente, afectan directamente la durabilidad de la estructura; el diseño inadecuado de juntas o una mala construcción de estas permiten el ingreso de agentes agresivos como: sulfatos, cloruros, carbonatos, etc, los cuales atacan directamente al concreto o al acero de refuerzo, reduciendo la vida útil de la estructura (INVIAS & Universidad Nacional, 2006)

El agua también podría escurrir a través de las juntas, degradando no solo los elementos de la subestructura, como también elementos de la superestructura y vigas principales (Radomski, 2002).

2.2.2.5. Recubrimiento inadecuado y exposición del acero de refuerzo

El acero de refuerzo debe tener una capa protectora o recubrimiento de concreto, cuyo espesor depende de la agresividad del medio ambiente y del tipo de elemento estructural en que se encuentra, cumpliendo con las especificaciones del código colombiano de diseño sísmico de puentes.

Un deficiente recubrimiento, ya sea por diseño o por construcción, ocasionaría un vínculo directo entre el acero de refuerzo y el medio ambiente generando fallas por corrosión. Las cuales terminan afectando la durabilidad y resistencia de los elementos y de la estructura en general.

2.2.3. Daños Durante el Funcionamiento

Estos daños se presentan desde el momento en que es terminada la construcción del puente hasta su desmonte o reemplazo. Son originados por diferentes acciones como, por ejemplo: agentes agresivos en el ambiente, impactos de vehículos, explosiones, inundaciones, e incendios. también se pueden presentar daños por falta de mantenimiento, reparaciones o rehabilitaciones de la estructura.

2.2.3.1. Infiltración y eflorescencias

La eflorescencia son depósitos de sales posicionadas en la superficie de los elementos que se producen debido a la lixiviación de las sales disueltas en el concreto. Estas adquieren una forma y estructura cristalina debido a la evaporación del agua que las condujo a la superficie.

Las eflorescencias en sí mismas no constituyen un problema de durabilidad de la estructura, sin embargo, además de afectar la estética, ocasionan un incremento en la porosidad del concreto y aumento en la permeabilidad, permitiendo que el concreto sea más vulnerable a otras patologías que deterioran la estructura (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Por otra parte, como los depósitos eflorescentes pueden estar compuesto por carbonatos de calcio, formados por la reacción entre el dióxido de carbono presente en la atmosfera y el hidróxido de calcio del cemento hidratado. Éstos, ocasionarían una disminución en el pH del concreto. Por lo que aumentaría la acidez de la humedad en el concreto, quien puede causar oxidación en el acero de refuerzo (Raina, 2010).

2.2.3.2. Carbonatación

La carbonatación es la reacción entre el dióxido de carbono (CO_2) del aire atmosférico o del suelo, con el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ disuelto en el agua que se encuentra en los poros del concreto (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Esta reacción, además de contribuir en el proceso de carbonatación, incrementa la acidez de la humedad del concreto disminuyendo su pH. Lo cual, reduce no solo la alcalinidad del concreto sino la pasividad alrededor del acero de refuerzo facilitando su proceso de corrosión.

De acuerdo con Sanchez De Guzmán (2006), el proceso de carbonatación es más intenso, cuanto más importante son los cambios de humedad y más elevada la temperatura; y avanza más rápido cuando se tiene un contenido de humedad intermedio (40 a 70 % HR) (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

En cuanto a la forma de detectar la carbonatación en un elemento estructural, se puede realizar mediante una regata, perforación o extracción de núcleo de concreto en las zonas donde sea más susceptible a este tipo de patología. Posteriormente se debe limpiar la superficie a estudiar y se le aplica solución de fenolftaleína. Por último, al reaccionar la solución de fenolftaleína en el concreto, este podría no presentar cambio en el color, lo que significa que se encuentra carbonatado, mientras que si se evidencia un cambio de color (Tipo magenta) el concreto se encuentra no carbonatado. Debido al cambio de color que presenta el concreto se puede medir con facilidad la profundidad de carbonatación dentro del concreto.

2.2.3.3. Corrosión del acero de refuerzo

La corrosión es un proceso de reacción entre el acero de refuerzo y agentes agresivos presentes en el medio ambiente que lo rodea.

Influyen varios factores para evitar la corrosión en el acero de refuerzo, el primero de ellos es el proceso de “pasivación” que se genera entre el oxígeno presente en el concreto y el acero de refuerzo. Este proceso se manifiesta a través de una película delgada de óxido sobre el acero de refuerzo. Otro factor de gran importancia es el espesor y la calidad constructiva del recubrimiento, ya que impide el paso de agentes agresivos y por consiguiente el proceso de carbonatación. Por último, también, tiene gran influencia el medio ambiente al cual está expuesto los elementos

estructurales. Entre más agresivo sea el medio ambiente (p. ej. zona costera o planta industrial) mayor probabilidad de originarse corrosión.

La corrosión produce un aumento en volumen del acero de refuerzo, el cual genera sobreesfuerzos de tensión en el concreto ocasionando que éste se fisure. Las fisuras por corrosión tienen la particularidad de manifestarse en dirección paralela a la dirección del acero de refuerzo. Si la corrosión aumenta, el espesor de las fisuras también, lo que podría generar descascaramiento y/o desprendimiento del recubrimiento.

Sin embargo, de acuerdo con Helene y Pereira (2003), las primeras evidencias de corrosión son manchas de óxido en la superficie del concreto, especialmente en elementos estructurales que tienen un contenido de humedad alto.

Sánchez De Guzmán (2006), menciona que los efectos de la corrosión se manifiestan de cinco formas diferentes que pueden ser o no simultaneas:

- Expansión del acero de refuerzo.
- Fisuración interna del concreto.
- Disminución de la capacidad mecánica del concreto.
- Baja adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo.
- Reducción de la sección transversal del acero de refuerzo.

2.2.3.4. Contaminación del concreto

De acuerdo con INVIAS & Universidad Nacional (2006), la presencia de microorganismo en las estructuras de concreto no solo afecta la estética, también pueden inducir fallas de carácter físico o químico y aumentar el deterioro de daños preexistente. La acción de organismo biológicos aumenta la permeabilidad del concreto, conduce a la saturación del material y por consiguiente causa daños por acción de los procesos de humedecimiento y secado, transformando los compuestos del cemento.

Usualmente los microorganismos de origen vegetal prefieren las superficies de concreto rugosas, porosas y húmedas, para establecer sus colonias. Durante el ciclo de vida de esta vegetación se producen sustancias que pueden ocasionar ataques químicos al concreto desencadenando desintegración de la pasta del cemento, entre estos se destacan las algas, líquenes y musgos (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Los microorganismos, tales como hongos y bacterias, pueden afectar tanto la superficie del concreto como el interior de la estructura, ocasionando entre otros efectos cambios de color, manchas, incrustaciones de colonias, expansión de los materiales, agresión química por los fluidos o materiales excretados, disolución de los componentes del cemento o de los agregados del concreto y olores desagradables.

2.2.3.5.Fallas por impacto

De acuerdo con INVIAS & Universidad Nacional (2006), el impacto de un cuerpo en una estructura puede generar diversas consecuencias, dependiendo de factores tales como: la velocidad y tamaño del elemento que impacta, la resistencia y el estado del material que es impactado. Dependiendo de la magnitud del golpe se puede provocar daños leves como fisuramientos y descascaramiento o fallas de consideración como propagación de grietas, pérdida de la rigidez y colapso de la estructura.

Normalmente este tipo de fallas son producidas por el impacto de vehículos en la superestructura del puente, por material que transporta el río a gran velocidad y que impacta los elementos de la subestructura del puente, o por la detonación de cargas explosivas.

2.2.3.6.Socavación

Se define como socavación a la erosión causada por el agua o por materiales abrasivos transportados por una corriente, la cual genera desgastes del concreto y fallas de estabilidad. La socavación es típica de los estribos, aletas, pilas, cimentación de los puentes y lechos de los ríos (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

Se distinguen dos tipos de socavación: general y local. La socavación general es un proceso a largo plazo, normalmente se presenta en todo el ancho del lecho del río, mientras que la socavación local se presenta en sitios particulares y es ocasionada por el paso de la corriente (INVIAS & Universidad Nacional, 2006).

2.3.Calificación Estado Estructural del Puente

En orden a diagnosticar el estado estructural de un puente, es conveniente inspeccionar y calificar el estado de cada uno de sus elementos. La forma más empleada a nivel mundial para determinar el estado de cada elemento es a través del método de evaluación cualitativa.

Países tales como Estados Unidos, Canadá, Dinamarca, Chile, Colombia entre otros, presentan, dentro de su sistema de administración de puentes, esta metodología de evaluación. Permitiendo además de caracterizar y calificar los daños superficiales presentes en cada elemento del puente, distinguir si estos requieren de intervención inmediata o programada. Todo lo anterior con el propósito de determinar el estado estructural del puente en general.

Sin embargo, a pesar de ser una metodología de uso mundial, cada país cuenta con su propia escala de calificación del estado de cada elemento. Lo que significa, si bien las causas de deterioro y los tipos estructurales de puentes son universales, la forma de su evaluación, y el enfoque específico e importancia que se le da a cada uno de los elementos del puente son distintos, según la experiencia propia de cada país (Muñoz, 2017).

Dentro de las escalas de calificación, podemos encontrar de tipo numéricas o descriptivas. Canadá, por ejemplo, presenta una escala descriptiva mediante tres condiciones de estados Bueno, Regular, Deficiente (Ministry of Transportation Ontario., 2008). Mientras que Dinamarca, presenta una escala numérica de cero (0) a cinco (5), siendo cero (0) deterioro insignificante, pequeño o sin daño y cinco (5) componente completamente deteriorado y no puede cumplir su función (Liao et al., 2017),

Referente a los Estados Unidos, su metodología presenta ambas escalas de calificación. El inspector visita el sitio y examina todos los elementos, luego da una calificación que va de cero (0) a nueve (9) para toda la estructura (Ryan et al., 2012). Además, el inspector da a cada elemento inspeccionado una calificación descriptiva en términos de Bueno, Regular, Malo y No Aplicable (NYSDOT Committee., 2016).

En Colombia, igual que en Dinamarca, se emplea una escala de calificación numérica cuyo rango es de cero (0) a cinco (5) y presenta una calificación adicional titulada “Sin Inspección”. En la Tabla 5 se puede observar la descripción correspondiente a cada calificación numérica.

Tabla 5 Descripción calificación cuantitativa. SIPUCOL

0	Sin daño o con daño insignificante.
1	Daño pequeño, pero no se requiere reparación.
2	Existe daño, el componente funciona como se diseñó.
3	Daño significativo, se requiere pronta reparación.
4	Daño grave, se requiere inmediata reparación.
5	Daño extremo, falla total o riesgo de falla total.
?	Sin inspección.

Una vez determinado el estado de los elementos que componen un puente, se prosigue a evaluar el estado del puente como tal. Dependiendo del país donde se ejecute la evaluación, se tendrá un procedimiento en específico. Métodos descriptivos o mediante correlaciones establecidas, son procedimientos válidos para evaluar la condición de estado de un puente.

Como se mencionó anteriormente, Canadá presenta dentro de su manual de inspección un método descriptivo para evaluar la condición de estado de los elementos y del puente. Cuatro son las condiciones de estado que se presentan (excelente, bueno, regular y deficiente) y son descritas en la Tabla 6. En cuanto a su metodología de evaluación de la condición de estado del puente, esta consiste en obtener inicialmente el estado de cada uno de sus elementos, seguidamente se agrupan en igual calificativo y se suman para finalmente seleccionar la de mayor resultado, la cual será la condición de estado del puente.

Tabla 6 Descripción de las condiciones de estado de un elemento según (Ministry of Transportation Ontario, 2008)

Condición de estado	Descripción
Excelente	<ul style="list-style-type: none"> ● Este se refiere a un elemento (o parte de un elemento) que está en condiciones nuevas (como construido) ● Los tipos de defectos como deterioración que son presentados no son visibles y acción de reparación no son requeridas. ● Los defectos menores de construcción no cuentan como defectos de tipo de deterioro visible. <p>Ejemplos: Hormigueros en paredes de barrera de concreto</p>
Bueno	<ul style="list-style-type: none"> ● Este se refiere a un elemento (o parte de un elemento) donde la primera señal de luz (menor) de defectos son visibles. Este usualmente ocurre cuando la estructura ha sido puesta en servicio por un número de años. Estos tipos de defectos normalmente no desencadenaría ninguna acción correctiva, ya que el rendimiento general del elemento. No es afectado. <p>Ejemplo: Ligera corrosión (no pérdida de sección), ligero descascaramiento, grietas estrechas en el hormigón, deterioro leve en la madera.</p>
Regular	<ul style="list-style-type: none"> ● Este se refiere a un elemento (o parte de un elemento) donde los defectos medios son visibles. Este tipo de defectos podrían desencadenar un tipo de acción correctiva, “mantenimiento preventivo” (ejemplo, sellado, revestimiento, etc), donde es económico hacerlo. <p>Ejemplo: Corrosión media (hasta un 10% de pérdida de sección) Grietas medias en concreto</p>
Deficiente	<ul style="list-style-type: none"> ● Este se refiere a un elemento (o parte de un elemento) donde los defectos visibles son severos o muy severos. En concreto, cualquier tipo de desconchado o delaminación se consideraría "pobre" ya que estos defectos generalmente indican problemas subyacentes más graves en el material (por ejemplo, acero de refuerzo corroído). Estos tipos de defectos normalmente desencadenarían la rehabilitación o el reemplazo si el alcance y la ubicación afectan el rendimiento general de ese elemento. <p>Ejemplo: Corrosión severa (superior al 10% de pérdida de sección) Descascarado, delaminación, etc.</p>

Por su parte, el procedimiento a través de correlación y su aplicación la podemos observar en Muñoz et al.(2005), donde inicialmente se determina el estado de condición por elemento a través

de una correlación entre la calificación numérica ya asignada a cada elemento durante la inspección principal y un estado descriptivo, ver la Tabla 7. Posteriormente se diagnostica el estado del puente (Bueno, Regular, Malo), mediante la selección del mayor resultado obtenido de la suma y ponderación conforme al cotejo de una calificación numérica y su equivalencia en una calificación descriptiva.

Tabla 7 Correlación entre la condición de estado por elemento y calificación numérica del elemento.

Condición de estado por elemento	Calificación Numérica del Elemento
Bueno	0,1,2
Regular	3
Malo	4,5
Sin Inspección	?

2.4.Factor de clasificación de un puente

Conocer la capacidad de carga a partir del factor de clasificación de un puente existente se convierte en una información relevante, sobre todo si este se encuentra en servicio por varios años y además con daños estructurales.

Una vez determinada la condición de estado, se prosigue a evaluar el factor de clasificación de acuerdo con la metodología propuesta por WSDOT (2022), el cual permite identificar si el puente presenta capacidad o no de soportar cargas.

Por consiguiente, determinada la condición de estado y el factor de clasificación del puente, se contará con información preliminar y relevante que servirá de base para emitir conclusiones oportunas sobre priorizar el puente a inspecciones especiales y posible reforzamiento o de lo contrario a mantenimientos preventivos.

De acuerdo con WSDOT (2020), El factor de clasificación de un puente es un procedimiento para evaluar la idoneidad de varios componentes estructurales para soportar cargas vivas predeterminadas.

En la actualidad se clasifican únicamente los elementos estructurales de las superestructuras del puente. Sin embargo, si las condiciones lo justifican, es posible que se deban clasificar los elementos de la subestructura. La superestructura se definirá como todos los elementos estructurales por encima de la parte superior de las columnas.

Las condiciones de los puentes existentes cambian con el tiempo, debido a daños en los elementos estructurales o por sobre carga, lo que resulta en la necesidad de reevaluar la capacidad de carga.

Por definición, la idoneidad o insuficiencia de un elemento estructural para transportar una carga de camión especificada se indicará mediante el valor de su factor de clasificación (RF); es decir, si es mayor o menor que 1.0.

La ecuación básica de la ingeniería estructural establece que la resistencia de la estructura puede igualar (o exceder) la demanda por carga. Declarada matemáticamente,

$$R \geq \sum_k Q_k \quad \text{EC -1}$$

Donde

- $R =$ Resistencia
- $k =$ Solicitaciones de carga (p. ej., carga muerta y carga viva)
- $Q_k =$ Efecto de carga k

En la evaluación estructural de puentes, el objetivo es determinar que el efecto de carga a resistir no sea menor que la debido a la carga predominante. La relación del efecto de esas dos es definida como el factor de clasificación, RF por sus siglas en ingles. Si $RF \geq 1,0$ el puente puede resistir a la carga viva predominante. Los efectos pueden ser los de flexión y cortante.

La ecuación básica para el factor de clasificación es simplemente una forma básica de la ecuación de la ingeniería estructural con factores de carga y factores de resistencia introducidas para tener en cuenta las incertidumbres que aplican al problema de evaluación de puentes. Esta se escribe como sigue:

$$RF = \frac{[(C) - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)]}{(\gamma_{LL})(LL)(1 + IM)} \quad \text{EC -2}$$

Donde:

- $RF =$ Factor de clasificación
- $C =$ $\phi_c \phi_s \phi_n R_n$, donde $\phi_c, \phi_s \geq 0,85$ para el estado límite de resistencia.
- $R_n =$ Capacidad nominal del elemento.
- $\phi_c =$ Factor de condición
- $\phi_s =$ Factor del sistema

$\phi_n =$	Factor de resistencia.
$DC =$	Efecto de la carga muerta debido a componentes estructurales y accesorios.
$DW =$	Efecto de la carga muerta debido a las superficies de rodadura e instalaciones.
$P =$	Efecto de las cargas permanentes distintas de las cargas muertas.
$LL =$	Efecto de la carga viva.
$IM =$	Efecto de la carga dinámica (Ver la Tabla 12).
$\gamma_{DC} =$	Factor de carga muerta para componentes estructurales y accesorios (Ver la Tabla 11).
$\gamma_{DW} =$	Factor de carga muerta para superficie de rodadura e instalaciones (Ver la Tabla 11).
$\gamma_P =$	Factor de para cargas permanentes distintas de las muertas (Ver la Tabla 11).
$\gamma_{LL} =$	Factor de evaluación de carga viva (Ver la Tabla 11).

- **Factor de condición, ϕ_c .**

El factor de condición es basado del Sistema de Administración de Puentes (BMS) y depende del estado de condición del elemento para el más reciente reporte de inspección. Los ingenieros deberán considerar la calificación de cada elemento en un estado de condición pobre, regular y buena; y la nota describiendo la condición de un elemento cuando determine el apropiado factor de condición.

Tabla 8 Factor de condición ϕ_c (WSDOT, 2022)

Condición Estructural del Elemento	ϕ_c
Buena o Satisfactoria, Condición BMS 1 y 2	1,00
Regular, Condición BMS 3	0,90
Pobre, Condición BMS 4	0,85

- **Factor de Sistema, ϕ_s .**

El factor del sistema mostrado en la Tabla 9 aplica a fuerza axiales y flexión; usando un factor de sistema de 1,00 cuando se califica la fuerza cortante.

Tabla 9 Factor de sistema ϕ_s (WSDOT, 2022)

Tipo de la Superestructura	ϕ_s
Elementos soldados, puentes tipo viga/cerchas/arco	0,85
Elementos remachados, puentes tipo viga/cerchas/arco	0,90
Múltiples elementos “Eyebar” en puentes tipo cerchas	0,90

Tipo de la Superestructura	ϕ_s
Puente con tres vigas, vigas espaciadas 1,83 m	0,85
Puente con cuatro vigas, vigas espaciadas $\leq 1,22$ m	0,95
Todos los demás puentes de vigas y losas	1,00
Tablero de vigas con espaciamiento $> 3,66$ m y largueros no continuos	0,85
Subsistema de largueros redundantes entre tablero de vigas	1,00
Vigas transversales con una o dos columnas	0,85

- **Factor de Resistencia, ϕ_n .**

El factor de resistencia debe tomarse como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10 Factor de Resistencia, ϕ_n . (AIS, 2014)

	ϕ_n
Para cortante y torsión concreto densidad normal	0,90
Para cortante y torsión concreto liviano	0,80
Para secciones de concreto reforzado controladas por tracción	0,90
Para secciones de concreto pre-esforzado controladas por tracción	1,00
Para secciones controladas por compresión con espirales o estribos	0,75
Para apoyo sobre concreto	0,70
Para compresión en modelos de puntal-tensor	0,70

- **Factores de carga viva y muerta**

Tabla 11 Factores de carga viva y muerta (WSDOT, 2022)

Tipo de Puente	Estados Límites	γ_{DC}	γ_{DW}	γ_P	HL-93
Concreto Reforzado	Resistencia Ultima I	1,25	1,50	--	1,75
	Resistencia Ultima II	1,25	1,50	1,00	--
Concreto Pretensado	Resistencia Ultima I	1,25	1,50	1,00	1,75
	Resistencia Ultima II	1,25	1,50	1,00	--
	Servicio III	1,00	1,00	1,00	1,00
	Servicio I	1,00	1,00	1,00	--
Acero Estructural	Resistencia Ultima I	1,25	1,50	1,00	1,75
	Resistencia Ultima II	1,25	1,50	1,00	--
	Servicio I	1,00	1,00	1,00	1,30

- Carga dinámica (Impacto)

La tolerancia de la carga dinámica depende de la aproximación entre el puente y la condición del tablero y las juntas de acuerdo con el último reporte de inspección.

Tabla 12 Porcentaje incremento carga viva debido al impacto (WSDOT, 2022)

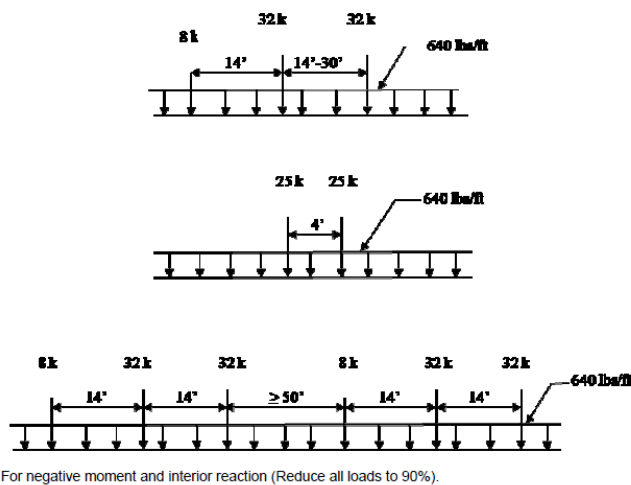
Camión	IM
HL-93 (Toda longitud del tramo)	33%

Verificar la condición del estado del tablero y las juntas para identificar alguna deficiencia podría generar un impacto en la estructura. Para baches menores a 25,4mm de profundidad usar 20% de impacto, y usar 30% de impacto para profundidades mayores que 25,4mm. Para puentes con múltiples tramos, tomar en consideración el tipo y localización de la deficiencia y si el impacto se podría aplicar en la estructura entera o no.

- Carga viva

La carga en movimiento será la carga del camión HL-93, método LRFD. Como se observa en Figura 2.

Figura 2 Carga del camión HL-93 (WSDOT, 2022)



La evaluación de una estructura se basa en el principio de que la capacidad de soporte real de una estructura pueda ser excedida por la capacidad necesaria para soportar las solicitaciones de cargas. Realizar una evaluación, por lo tanto, es necesario para conocer algo sobre la capacidad

real, las cargas aplicadas y la respuesta de la estructura a esas cargas. El conocimiento e información con respecto a cada uno de esos ítems nunca es completo y, por lo tanto, la evaluación nunca puede ser realizada con precisión.

Para compensar esa ausencia de conocimiento e información, los ingenieros tienen factores de seguridad para asegurar que la falla no ocurra.

El chequeo por clasificación es realizado para comparar los efectos de las cargas factorizadas (muerta y viva) con la resistencia de las secciones factorizadas en toda sección crítica. La comparación indica el factor de clasificación, que determina la idoneidad del puente dado para las cargas predominantes. Si la clasificación del puente es no aceptable, muchas opciones para un mayor análisis detallado son obtenidos.

La evaluación del puente es llevada a cabo, en principio, para comparar el efecto de la carga muerta y viva factorizada con la resistencia estructural factorizada, en secciones críticas, en flexión, cortante, etc. El factor de carga en carga viva y carga muerta son seleccionados de tal manera que tengan en cuenta las incertidumbres en ellos y las inexactitudes en el método de análisis estructural de sus efectos.

El factor de carga en cargas muertas incluye la posible variación en las dimensiones de su sección, detalles y densidades. El factor de carga en cargas vivas cuenta para posibles incertidumbres en el máximo efecto de la carga vehicular prevista, impacto y distribución transversal de la carga durante el periodo de tiempo entre las inspecciones. El factor aplicado en la resistencia estructural, llamado factor de resistencia ϕ , también llamado factor de reducción de resistencia explica las incertidumbres en las teorías predicción de resistencia, propiedades de materiales e influencia del deterioro durante los periodos de inspección. Es más, el factor de carga y el factor de resistencia son también seleccionados de manera que proporcionen un margen de seguridad general que conduciría a un nivel adecuado de seguridad, teniendo en cuenta las incertidumbres y deficiencias mencionadas anteriormente. Si el factor de clasificación resulta en un valor aceptable el puente se puede publicar como seguro para la carga viva predominante.

2.5. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs), también conocidos como Drones, son mecanismos destinados para transitar en el espacio. Tienen la virtud de no requerir tripulación para su operación, ya que esta se ejecuta de forma remota, lo que garantiza la seguridad del operario.

Los VANTs fueron desarrollados durante la primera mitad del siglo XIX e implementados inicialmente en la segunda guerra mundial. Gran Bretaña y Estados Unidos crearon aeronaves controladas por radio, las cuales fueron destinadas para la formación y entrenamiento de las fuerzas militares.

Posteriormente a la década de los 50, los VANTs fueron equipados con cámaras para misiones de reconocimientos sobre territorio enemigo. Estas aeronaves podrían operar a altas o bajas altitudes, dependiendo de la localización del radio de control. Las imágenes capturadas por estos vehículos eran reveladas específicamente al momento de su retorno.

Durante los 60 se introduce una nueva misión en los VANTs, la cual consistió en incorporar alas giratorias en su unidad modular. Sin embargo, para este tipo de equipos su sistema presentó retraso debido a la no incorporación de autopiloto ni sensores. Ocasionando pérdidas de muchos de estos equipos en los campos de batalla.

Para los 70 se introducen en los VANTs sistemas con objetivos claros como lo son reconocimiento y vigilancia de corto, largo alcance y altas altitudes. Se tenían proyectos ambiciosos en donde buscaban desarrollar un avión pequeño, con hélice impulsadas por un motor alternativo y con una construcción modular de fácil manipulación, que generara información en tiempo real a través de señal de videos. Capaz de volar mediante un autopiloto y con sensores para localizar e identificar los objetivos enemigos de día y de noche. En cuanto a la integración satisfactoria del equipo se desarrollaron subsistemas los cuales eran muy grandes, pesados, con alta demanda de potencia y generaban interferencias, lo que reducía la calidad de los videos y dificultaba la interpretación de los objetivos grabados.

En los años 80 se presentaron avances en los temas de reconocimiento de muy corto alcance y vigilancia de los VANTs a través de cámaras de video estabilizadas, las cuales posteriormente fueron reemplazadas por cámaras de televisión. También para esta época se sustituyó el motor alternativo por un turboeje. Así mismo se incorporó sensores de infrarrojo.

Con mayor disponibilidad del sistema de posicionamiento global (GPS), de las comunicaciones satélite y sistemas digitales de control de vuelo, en los 90, los VANT mejoraron notablemente en su alcance y precisión, obteniendo como resultados sistemas de medio y largo alcance. Lo que permitía realizar misiones de reconocimiento a mayores altitudes. Sin embargo, ante el deficiente o nulo desempeño de detección de los equipos a través de las nubes, fue necesario la instalación de radares de apertura sintética.

Las investigaciones y modificaciones en la década de los 2000, permitieron que los VANTs pudieran además de llevar armamentos, ofrecer una mayor velocidad y alta capacidad de indetectabilidad al radar. Otra línea de investigación, logro avanzar en el aumento de la automatización de los VANTs, reduciendo las cargas de trabajo y los errores de las tripulaciones en tierra, así como el ancho de banda de radio que se requieran para el control y la transmisión de datos.

Recientemente, la autonomía, la alta resolución en la cámara y el tamaño de los VANTs han tomado un protagonismo importante, sobre todo en operaciones civiles. Actualmente un gran número de pequeños VANTs están en funcionamiento, aunque su menor tamaño conduce a capacidades de carga reducidas (Valavanis & Vachtsevanos, 2015). Gracias a su gran versatilidad, a ser portátil, económico, fácil de mantener, bajo riesgo para el operario y a su capacidad de acceder a zonas de difícil acceso para el ser humano, se ha convertido en uno de los sistemas de inspección más implementados en diferentes áreas profesionales.

Patrullar fronteras, vigilar ciudades, transportar cargas, capturar fotografías o videos de turistas o sitios turísticos e incluso supervisar construcciones, son algunas de las actividades que se pueden ejecutar con un VANT.

La ingeniería civil es el área de la ciencia que ha experimentado muchos beneficios a raíz de las investigaciones y modificaciones que han presentados los VANTs. Su uso es tal, que se puede implementar desde la concepción de un proyecto hasta los programas de mantenimientos de una estructura. En la Tabla 13 se observan las diferentes misiones que pueden tener los VANTs en las múltiples áreas de la ingeniería civil.

Tabla 13 Misión de los VANTs en la ingeniería civil.

Área de la Ingeniería Civil	Misión de los VANTs	Fuente
Topografía	Fotografiar con calidad y detalle el terreno. Levantamientos topográficos con recolección de datos en reducidos periodos de tiempo y buenas precisiones.	(Piatti & Lerma, 2013) (Corredor, 2015)
Ingeniería Ambiental	Garantizar la protección del medio ambiente, no solo desde la vigilancia y el control sino también combatir de forma activa la contaminación.	(Pellicer & Serón, 2000)
Hidrología	Suministro de información útil y actualizada sobre recursos hídricos y la infraestructura hídrica.	(González et al., 2019)
Tránsito y Transporte	Recopilar información sobre el flujo de tráfico para el desarrollo de un sistema de gestión y tráfico en carreteras.	(Abdullah et al., 2005)
Pavimentos	Identificar las manifestaciones patológicas superficiales en pavimento asfáltico.	(Parente et al., 2018)
Construcción	Recopilar eficientemente registros y actualizar de manera efectiva la programación de la obra. Permitiendo una gestión dinámica del proyecto de infraestructura.	(Vacanas et al., 2015)
Geotecnia	Controlar las deformaciones del terreno y las estructuras.	(Sancho Gómez-Zurdo et al., 2021)
Estructuras	Inspeccionar manifestaciones patológicas en fachadas de edificios.	(Lisboa et al., 2018)
Puentes	Inspeccionar y detectar daños en estructuras largas tales como chimeneas, torres eléctricas, puentes y edificios históricos.	(Morgenthal & Hallermann, 2014)

Inspeccionar estructuras, es una de las misiones que más se le confiere a los VANTs. Especialmente en aquellas que son de gran longitud y presentan zonas de difícil acceso al inspector como son los puentes.

Los VANTs son implementados para el mantenimiento de puentes (Metni & Hamel, 2007). Sin embargo, es una herramienta que no solo permite inspeccionar, cuantificar y determinar los efectos de daños en puentes, sino que permite determinar su desempeño bajo cargas vivas (vehiculares) a través de la información obtenida por los VANTs y técnicas de simulación computacional (Duque, 2017).

Tantos son los beneficios de estas herramientas en la inspección de puentes que la *Federal Highway Administration (FHWA)*, en septiembre de 2021, realizó la publicación No FHWA-HRT-21-086 titulada en inglés “*Collection of Data with Unmanned Aerial Systems (UAS) for Bridge*

Inspection and Construction Inspection". Español, "Colección de Datos Para Inspecciones de Puentes y Construcción Con Sistemas aéreos No Tripulados".

Documento detallado que incluye además de la definición de un VANT, herramientas para su uso en la inspección, consideraciones de su operación y planificación e incluso recomendaciones de la información necesaria obtenida por el VANT y la cual puede ser entregada al propietario del puente.



Además de contar con un documento pertinente como lo es la publicación No FHWA-HRT-21-086, para lograr una adecuada inspección de un puente se requiere de un VANT que cuente con cámara de alta definición y capas de obtener registros en todas las dimensiones del puente, incluso en áreas confinadas y de reducido acceso. También, debe presentar sensores capaces de detectar obstáculos y evitar colisión. Por último, debe ser autónomo y con sistemas de GPS que le permita al operador identificar la posición exacta en que se encuentra el VANT.

Existen variedad de referencias de VANT con las descripciones anteriores y que pueden cumplir el objetivo de inspeccionar adecuadamente un puente. Sin embargo, son dos referencias las que se exponen en esta oportunidad, el VANT Phantom 4 pro V2.0 y el Parrot Anafi Work 4K. El primero debido a que la Pontificia Universidad Javeriana de Cali lo posee dentro de sus herramientas de investigaciones y el segundo porque el autor del presente trabajo lo adquirió.

Ambos equipos son de alta tecnología y presentan características idóneas para el buen desempeño dentro del campo de la inspección. En el Phantom 4 se resalta que puede alcanzar una distancia de transmisión remota hasta 7km, lo que permite inspeccionar puentes de grandes longitudes. Mientras que el Anafi Work, posee una cámara que gira 180° lo que facilita la inspección por debajo de los puentes.

A continuación, en la Tabla 14 se presenta un cuadro comparativo de ambos equipos.

Tabla 14 Cuadro Comparativo Especificaciones VANTs Phantom 4 PRO V2.0 y Parrot Anafi Work 4K

ESPECIFICACIONES	PHANTOM 4 PRO V2.0	PARROT ANAFI WORK 4K
Imagen	 <p>Fuente: https://www.dji.com/phantom-4-pro-v2</p>	 <p>Fuente: https://www.parrot.com/es/drones/anafi</p>
Peso (g)	1.375	320
Max Tiempo Vuelo (min)	30	25
Max Velocidad Ascenso (m/s)	5	4
Max Velocidad Descenso (m/s)	4	3
Rango de Temperatura (°C)	0 a 40	-14 a 40
Max Altitud de Vuelo (m)	6.000	4.800
Max Distancia de Transmisión Remota	7.000	4.000
Gilbal, Rango de Control (°)	-90 a +30	-90 a +90
Rango de Vibración Angular (°)	±0,02	±0,004
Max Velocidad de Resistencia al Viento (Km/h)	36	50
Modo Fotografía (Mp)	20	21
Modo Grabación Video	4K	4K

Por otra parte, es fundamental e imprescindible conocer el régimen jurídico para el uso de los VANTs, principalmente en Colombia. De acuerdo con el Decreto 260 de 2004, La Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil o Aeronáutica Civil, es una entidad especializada de carácter técnico adscrita al ministerio de transporte y se distingue por ser la autoridad en materia aeronáutica en todo el territorio nacional y le compete regular, administrar, vigilar y controlar el uso del espacio aéreo colombiano por parte de la aviación civil, y coordinar las relaciones de esta con la aviación del estado; desarrollando las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos

sobre la materia, contribuyendo de esta manera al mantenimiento de la seguridad y soberanía nacional.

La Aeronáutica Civil, ejerce su función a través de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC 91). El cual presenta, en el Apéndice 13 titulado “Operación de Sistemas de Aeronaves No Tripuladas”, todo lo relacionado a los VANTs y su operación.

En este Apéndice se encuentra las definiciones y abreviaturas utilizadas en la operación de VANTs, así como el ámbito general de aplicación, la clasificación de las operaciones, reportes de incidentes y accidentes; y el régimen sancionatorio.

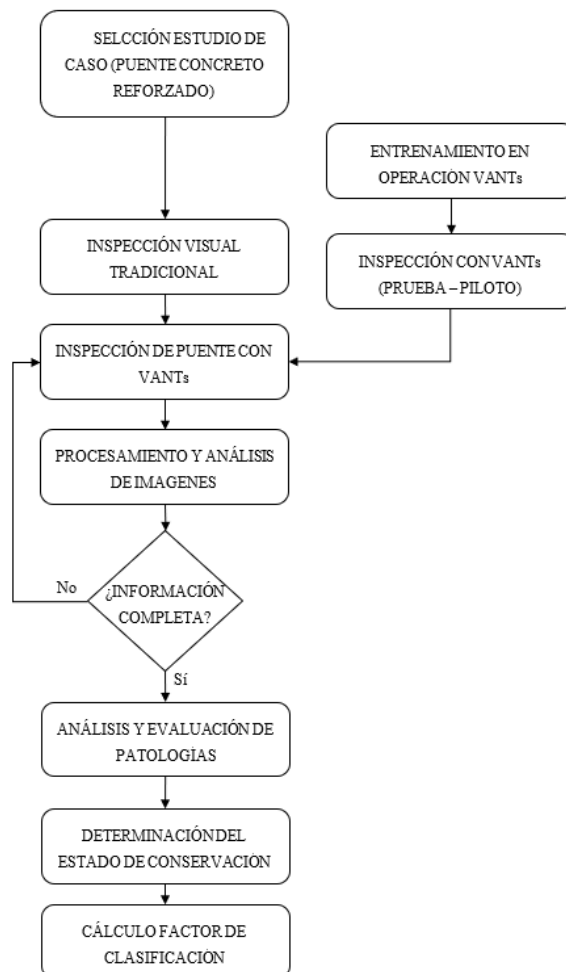
Para la operación del VANT en el territorio colombiano, es importante resaltar que las reglas estipuladas en el Apéndice 13 se aplica para toda actividad civil que se realice con un sistema de aeronave no tripulada con peso (masa) máximo de despegue de 250gr y el operador debe contar con un certificado de capacitación y entrenamiento en la operación de VANT.

En conclusión, se constata que, gracias a los avances tecnológicos en los VANTs, se puede estudiar la alternativa de incluir esta herramienta valiosa en la inspección de puentes en Colombia, conllevando a esta actividad no solo a ser más segura para el inspector, sino que además reduce tiempo y costo. Esta alternativa alcanza su máximo valor cuanto es respaldada por operadores certificados a través de capacitaciones y entrenamiento, cumpliendo con todo el reglamento exigido por la Aeronáutica Civil.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se emplearon en total 8 fases, las cuales permitieron definir de manera apropiada el caso de estudio a partir de criterios relacionados con los daños existentes en el puente y su susceptibilidad a inspecciones tanto visuales, como, a partir del uso de VANTs. También, fomentaron la habilidad en cuanto al manejo de los VANTs y el conocimiento de lo que esto acarrea, evidenciando los aspectos a mejorar, la efectividad de la información capturada, así como el rendimiento del equipo y sus beneficios. Por otro lado, posibilitó la aplicación del método de inspección visual tradicional y mediante el uso de VANTs, conllevando a obtener como resultando una comparación pormenorizada de estas dos alternativas. Por último, admitió la evaluación del estado y la capacidad estructural del puente, constatando su condición de servicio. En la Figura 3, se presenta el diagrama de flujo de la metodología aplicada.

Figura 3 Diagrama de Flujo. Metodología de Investigación



A continuación, se mencionan y describen las 8 fases:

3.1. Selección de estudio de caso

Para la selección del puente caso de estudio, se tuvo como base seis criterios fundamentales, los cuales fueron definidos rigurosamente. El primero consistió en que el puente debe ser en concreto reforzado. El segundo, su construcción debió ser ejecutada antes de la implementación de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (LRFD - CCP14), es decir, antes de junio de 2015. Tercero, debe presentar niveles de daños estructurales moderados o fuertes, conllevando a obtener una investigación más profunda. Cuarto, debe contar con condiciones aptas para ser inspeccionado de manera tradicional y mediante la implementación de VANTs, de forma oportuna, segura y legítima, permitiendo obtener comparaciones confiables entre estas dos alternativas de inspección. Quinto, debe contar con registro de la información técnica de la estructura y que esté disponible para consulta como, por ejemplo: el diseño estructural (memoria de cálculos, planos estructurales, especificaciones técnicas), estudio geotécnico, proceso constructivo y planos As-Built del puente original. Al igual que de sus posteriores modificaciones y mantenimientos. Sexto y último, debe estar localizado cerca al campus de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, debido a la dificultad que surge al desplazar los equipos GPS y VANTs, y para garantizar su seguridad.

Estudiados y establecidos los criterios, se prosiguió a buscar e identificar los puentes con mayor perfilación a estos. La búsqueda se efectuó de varias formas, se hizo uso de la navegación por internet y plataformas digitales; se empleó el SIPUCOL y La Infraestructura de Datos Especiales de Santiago de Cali (IDESC); se realizaron movimientos de exploración física y finalmente, se indagó por medio de contactos profesionales.

Al iniciar la búsqueda se empleó preliminarmente la navegación por internet a través de la plataforma Google Maps. En esta, se contempló el puente en concreto reforzado ubicado en la Calle 13 entre Carrera 103 y 102, barrio Ciudad Jardín, Santiago de Cali, Ver la Figura 4. Sin embargo, a pesar de contar con la mayoría de los criterios fundamentales, este no presentaba las condiciones aptas para ser inspeccionado mediante VANT, debido a la abundante vegetación a florada en las zonas adyacentes del puente.

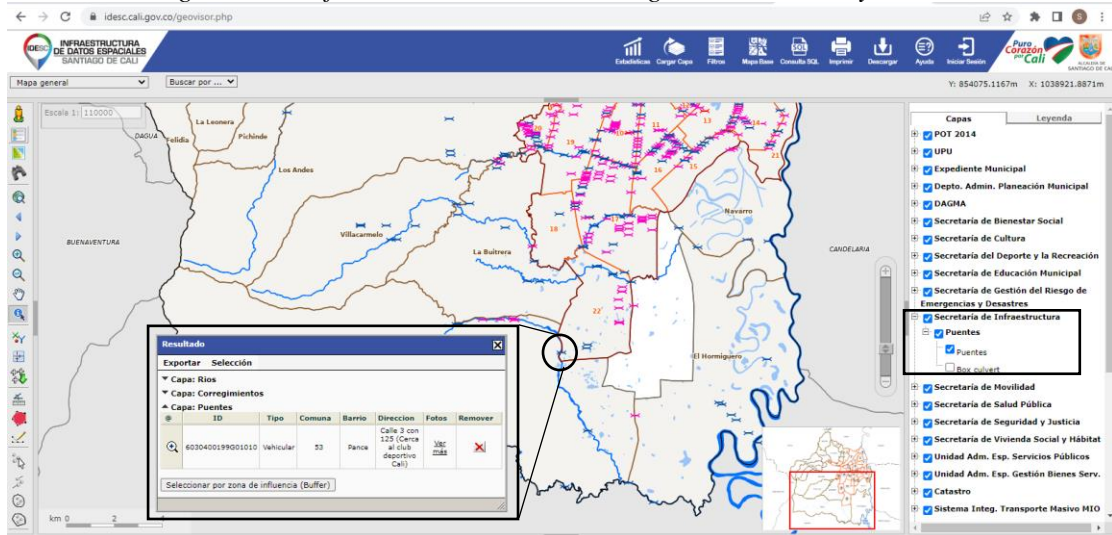
Figura 4 Puente Calle 13 entre Carrera 103 y 102. (Google Maps).



Continuando con la acción de encontrar el puente idóneo, se decidió revisar el inventario de puentes existentes de la Red Nacional de Carreteras, elaborado por el INVIAS a partir del SIPUCOL. No obstante, tampoco se tuvo éxito debido a que no todos los puentes se encuentran registrados en esta plataforma y los que sí, pertenecen únicamente a la red nacional y se localizan a grandes distancias del campus universitario.

Paralelamente a la búsqueda en SIPUCOL, se examinaba la plataforma IDESC. La cual se define como la suma de políticas, estándares, organizaciones y recursos tecnológicos que facilitan la obtención, uso y acceso a la información geoespacial del Distrito de Santiago de Cali (IDESC, 2021). En esta plataforma se realizó un análisis exhaustivo, mediante su Geovisor, de la información geoespacial del distrito aquí registrada. Evidenciando un conjunto de datos e imágenes relacionadas con las localizaciones y los tipos de puentes existentes. Información contundente y eficiente para la búsqueda del puente caso de estudio, ver la Figura 5.

Figura 5 Plataforma Geovisor IDESC. Registro de Puentes y Box Culvert



En la plataforma IDESC, se encontraron varias alternativas de puentes, pero solo cuatro son los presentados en esta investigación, ver la Figura 6 . A pesar de tener un amplio grupo de alternativas, se decidió por visitar el puente situado en la Calle 3 con Carrera 125 (Cerca al club Deportivo Cali), por su proximidad al campus universitario. En dicha exploración, se constató que este no cumplía con el tercer criterio fundamental, el cual consistió en que el puente debe presentar patologías significativas. Las alternativas restantes se descartaron rotundamente por dos motivos, el primero por la lejanía de algunos puentes y segundo por la alta inseguridad de las zonas en que se encuentran los otros.

Figura 6 Alternativas puentes vehicular para caso de estudio. (a) Carrera 2 Oeste Calle 14, Zoológico (b) Avenida Oeste Calle 23 Oeste, Barrio Aguacatal (c) Barrio Navarro (d) Calle 3 Carrera 125, Barrio Pance. (Geovisor IDESC)





En vista al no cumplimiento de esta segunda opción, se prosiguió con sondear la zona contigua a la visitada, con la ayuda de las plataformas IDESC y Google Maps. En este sondeo se logró identificar dos puentes localizados sobre la Avenida Cerros – Vía la Voragine, Barrio Pance. No obstante, estos tampoco cumplían con las condiciones iniciales debido a que el primero, su sistema estructural, estaba conformado con perfiles metálicos y el segundo, a pesar de ser en concreto reforzado, contaba con poco tiempo de uso y no presenta fuertes patologías.

Finalmente, a partir de una indagación por medio de contactos profesionales expertos en la materia, se logró identificar el Puente Río Claro, propio del estudio de caso. Este puente cuenta con cinco de los seis criterios planteados y a pesar de encontrarse retirado del campus universitario, durante la visita se evidenció que la zona era segura para manipular los equipos. El criterio que no se logró llevar a efecto fue el de obtener información técnica de la estructura existente.

El Puente Río Claro, está localizado sobre la vía Jamundí – Suarez, a 6 kilómetros de Jamundí – Valle del Cauca. Cuenta con una longitud de 28,5 metros y un ancho de tablero de 6,58 m. Estructuralmente presenta un sistema de tipo arco inferior en concreto reforzado y está compuesto por barandas metálicas, carpeta de rodadura tipo asfalto, tablero, enlace arco-tablero con muros, arcos, tajamar, estribos, aletas y cimentaciones. Patológicamente el puente presenta varias afectaciones estructurales, lo que hace de este una estructura de gran interés, ver la Figura 7.

Figura 7 Puente Río Claro. Propio del Caso de Estudio



3.2. Entrenamiento en operación de VANTs

En busca de apropiarse de todo lo relacionado con la manipulación de los VANTs y la forma de capturar imágenes precisas de una estructura, las cuales son evidencias fundamentales para la inspección de la misma, se realizó una rutina de entrenamiento, en condiciones controladas.

El pasillo lateral del Edificio “El cedro Rosado” localizado dentro de las instalaciones de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, fue la estructura elegida para ejecutar los entrenamientos. Gracias a su losa en concreto reforzado, apoyada en sus extremos, hacen que sea un sistema muy parecido al correspondiente de un puente. Por tal motivo, lo descubierto en esta etapa se mejoró y proyectó a las etapas de inspección visual empleando VANTs sobre el puente piloto y el correspondiente al estudio de caso “Puente Río Claro”.

Inicialmente, el entrenamiento consistió en conocer todo lo referente a la operación del VANT tipo DJI PHANTOM 4 PRO V2.0, en donde a partir de las aplicaciones informáticas DJI GO 4, PIX4D CAPTURE y CTRL+DJI, se logró instruirse en temas tales como: la manipulación del control remoto y la función de cada uno de sus botones físicos, así como el chequeo de los niveles de carga de las baterías tanto del control remoto, como el del vehículo aéreo no tripulado. También, en cómo configurar una misión de vuelo a partir del tipo de vehículo a utilizar, el sistema de unidades, la implementación de mapa satelital como plantilla, la verificación del número de satélites conectados con el vehículo, la velocidad de vuelo y por último la selección de la misión (p. ej. Polígono, Cuadrícula, Cuadrícula doble, Circular o Vuelo Libre).

Para este primer entrenamiento se seleccionaron las misiones tipo circular y doble grilla, ver Figuras 8 y 9. Excluyendo la misión vuelo libre. Esto último, debido a la complejidad de manipular este tipo de vehículo aéreo, por su elevado peso, en cercanía a la estructura en estudio. También, por el bajo rango de inclinación vertical de la cámara, -90° a $+30^\circ$, lo cual induce a operar el vehículo aéreo a distancias de separación amplias para lograr capturas representativas de la parte inferior de la losa correspondiente a la estructura del pasillo.

Figura 8 Misión Circular, 50 m de altura, 70 m de diámetro, -30° inclinación vertical de la cámara.

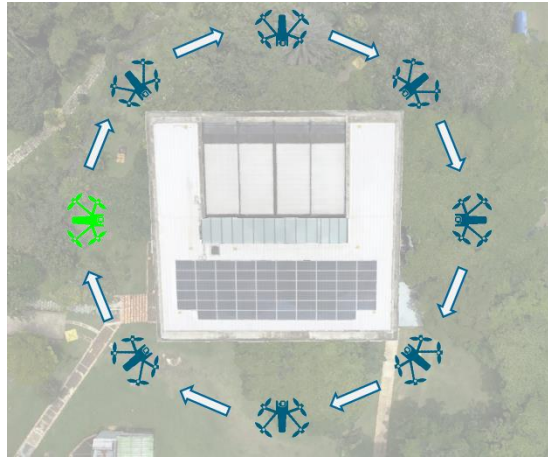
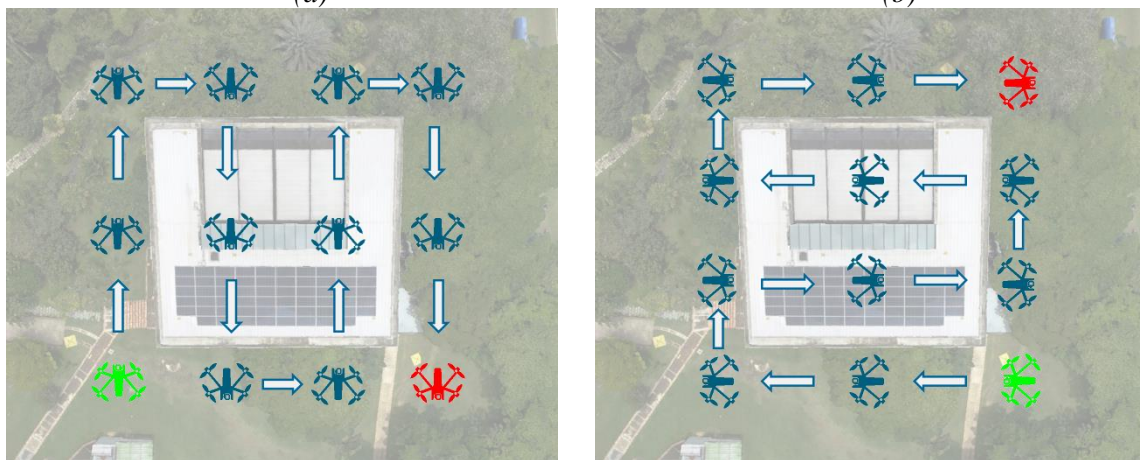


Figura 9 Misión Cuadrícula doble, 50 m de altura, 60 m de longitud por trayecto, 20 m de separación entre trayecto, -90° inclinación vertical de la cámara. (a) Dirección "y" (b) Dirección "x"

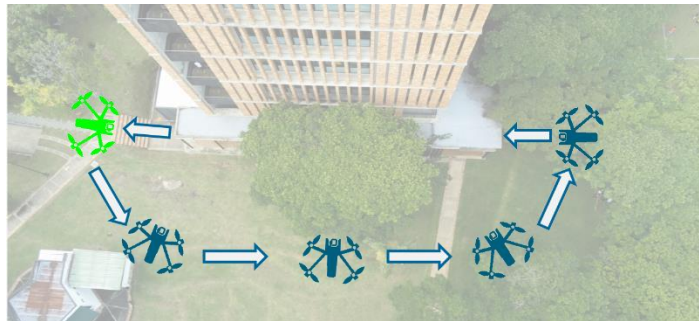


En esta primera instancia, se aprendió que es importante realizar un primer vuelo de reconocimiento. En donde se identificaron las zonas que pueden generar un suceso eventual del que pueda resultar un daño al momento de maniobrar el VANT. También, permitió tener la

localización exacta de la estructura sobre la imagen satelital instaurada en la aplicación. Lo anterior, para ajustar las misiones de vuelos ya preestablecidas y lograr un mayor enfoque de la estructura.

La segunda parte del entrenamiento, consistió en ejecutar las misiones propuestas anteriormente, pero esta vez con el vehículo aéreo tipo PARROT ANAFI WORK. En esta fase se incluye la misión de “vuelo libre”, ya que, debido al peso del equipo y al amplio rango de inclinación vertical de la cámara -90° a $+90^\circ$, es posible hacer maniobras cercanas a la estructura e incluso por debajo de la losa del pasillo, ver la Figura 10.

Figura 10 Misión Vuelo Libre, 1,5 m de altura, $+60^\circ$ inclinación vertical de la cámara.



Para esta última sección de entrenamiento, se identificó lo trascendental de mantener una velocidad constante del vehículo aéreo de 2 m/s, durante la misión de vuelo libre, para así garantizar el traslape mínimo del 75% entre fotografías. Las fotos fueron capturadas a través del modo Time-lapse, el cual permitió obtenerlas de manera secuencial en intervalos regulares. En esta oportunidad el intervalo fue de 5 segundos.

Es preciso señalar que para obtener una habilidad básica en el pilotaje del VANT y poder ejecutar inspecciones convenientes, se requirió dedicar más de cincuenta (50) horas de entrenamiento en el uso del VANT. Tiempo que se considera imprescindible, máxime cuando se piensa aplicar esta estrategia de inspección por primera ocasión.

Por otra parte, se entrenó en el uso del sistema de posicionamiento GPS FOIF A90, el cual es un sistema global de navegación por satélites, que permitió obtener de manera ágil y con precisión centimétrica, las coordenadas de los puntos de control a través del sistema de coordenadas geodésicas (Latitud, Longitud y Elevación), indispensables en un levantamiento fotogramétrico con VANT.

Los puntos de control se definen como puntos en la superficie de la tierra de ubicación conocida, que se utilizan para georreferenciar las imágenes capturadas por los VANTs.

El levantamiento tipo cinemático en tiempo real o RTK (por sus siglas en inglés) fue empleado para obtener las coordenadas de los puntos de control. Esta técnica consistió en tener un receptor de referencia estático “Base”, cuyas coordenadas son conocidas y un receptor móvil “Rover” del cual se obtuvieron las coordenadas en tiempo real de los puntos de control. Estos receptores se encontraban conectados entre sí, mediante el sistema de telecomunicación vía satélite y radio modem. El sistema de referencia utilizado fue el Magna-Sirgas.

En la Figura 11, se presenta la localización de los puntos de control levantados durante la etapa de entrenamiento y En la Tabla 15, sus coordenadas geodésicas.

Figura 11. Localización puntos de control, etapa de entrenamiento, Edificio “El Cedro Rosado”

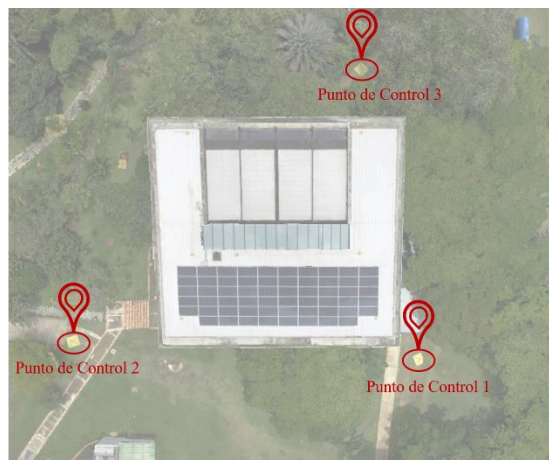


Tabla 15. Coordenadas Puntos de control, etapa entrenamiento, Edificio “El Cedro Rosado”

PUNTOS DE CONTROL	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
Base	N3°20'52,5208''	W73°31'53,9197''	1033,6000
Punto de Control 1	N3°20'44,0414''	W76°31'59,8594''	1060,0330
Punto de Control 2	N3°20'44,1213''	W76°32'01,5174''	1061,7060
Punto de Control 3	N3°20'45,4419''	W76°32'00,1720''	1059,0490

Por último, a partir del registro fotográfico obtenido con los VANTs y las coordenadas de los puntos de control con GPS, se prosiguió el entrenamiento con el procesamiento de la información, empleando el *software Bentley ContextCapture*.

Bentley ContextCapture es un programa que produce modelados de realidad 3D a partir de un conjunto de fotografías o videos. Adicionalmente, permite generar secciones transversales,

relieves de un terreno y producir fotografías con escalas constantes y propiedades de una proyección ortogonal.

La propuesta de emplear este software dentro del trabajo de investigación, fue para generar un modelado 3D de la estructura, para así identificar y medir (en relación a sus longitudes, profundidades, áreas y volúmenes) los daños presentes en esta. Acciones indispensables y necesarias para una completa inspección visual.

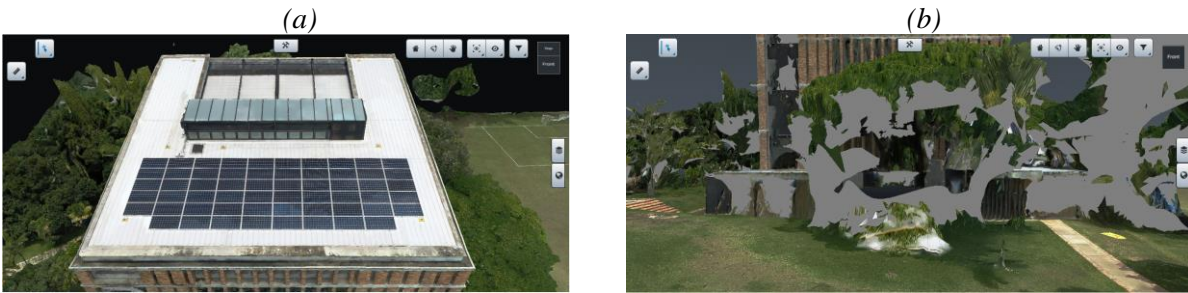
En la Figura 12 se presenta el modelado digital 3D del edificio “El Cedro Rosado” generado mediante el procesamiento de imágenes capturadas durante las misiones de vuelo tipo cuadrícula doble y circular. Del modelo se observa dos sectores definidos por la calidad de la información generada. El primero, corresponde a la parte superior de la edificación, en donde se puede apreciar que debido a la cercanía de la cámara del VANT, se logró generar información considerable y de buena resolución. Tanto así, que se puede detallar el estado de los paneles solares localizados sobre la cubierta y si se ingresa en el área de las patologías estructurales, se logra evidenciar humedades presentes en la cubierta, ver la Figura 13.a.

Figura 12. Modelado 3D Edificio “El Cedro Rosado”, etapa de entrenamiento.



En lo que respecta al segundo sector, este corresponde a la parte más alejada capturada por la cámara del VANT, es decir, la parte inferior de la edificación, exactamente sobre la estructura correspondiente al “pasillo lateral”. En este sector, la calidad de la información generada en la modelación es muy baja, haciéndola ineficaz ver Figura 13.b.

Figura 13 Modelo 3D edificio “El cedro Rosado”. (a) Parte superior. (b) Pasillo lateral



Al incluir el registro fotográfico obtenido en la misión de vuelo libre en el procesamiento de imágenes, se evidenció un aumento en la calidad de la información emitida en el modelado 3D, como se observa en Figura 14. Sin embargo, esta calidad no es suficiente para ejecutar una inspección visual idónea. Además, al realizar el procesamiento de las imágenes capturadas durante las diversas misiones, se constató el escaso traslapeo entre las fotografías. Generando un modelo incompleto, como se puede observar en Figura 15.

Figura 14 Modelado 3D, “Pasillo Lateral”, Edificio “El Cedro Rosado”

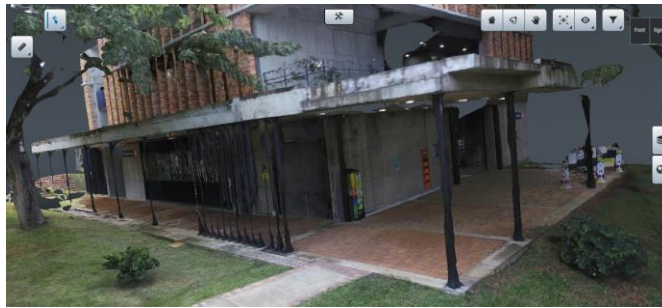


Figura 15 Modelado 3D incompleto, edificio “El Cedro Rosado”



En resumen, en la etapa de procesamiento de imágenes, se percibió lo fundamental de ejecutar múltiples misiones de vuelos, con trayectorias dirigidas sobre, por debajo y perimetralmente a la estructura. En cada una de esas misiones el ángulo de inclinación vertical de la cámara debe variar, de tal forma que las imágenes capturadas contengan el 75%, como mínimo, de traslapeo. Generando

modelos digitales 3D de alta calidad y con un amplio registro fotográfico de todas las partes de la estructura, lo que permite ejecutar una oportuna inspección visual.

3.3. Inspección visual tradicional y empleando VANT, Puente Piloto

En esta fase se logró inspeccionar, en condiciones controladas, un puente en concreto reforzado de menor envergadura al correspondiente del estudio de caso. Se aplicó todo el conocimiento adquirido durante la fase de entrenamiento y se identificaron los desafíos que conlleva realizar una inspección tradicional y empleando VANT en este tipo de estructuras.

A partir de la plataforma IDESC, la cual es una herramienta de gran utilidad y magnífico desarrollo, se logró identificar y seleccionar el puente vehicular construido en el interior del campus de la Universidad de Valle, como se pueden observar en las Figuras 16 y 17.

Figura 16 Resultado de la Información Puente Piloto, (Geovisor IDESC)

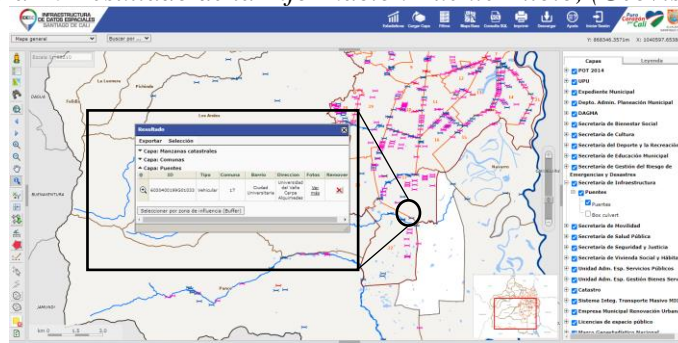


Figura 17 Puente Piloto, (Geovisor IDESC)



El puente piloto, es de una luz, corresponde estructuralmente al tipo tablero de losa y vigas en concreto reforzado, apoyado sobre estribos. Presenta una longitud de 5,54 m, ancho de 9,00 m y gálibo de 2,29 m. El puente cuenta con andenes de 1,43m de ancho y barandas en acero con altura de 1,00 m. En las Figuras 18, 19 y 20 se presentan esquemas de la configuración del puente piloto.

Figura 18 Planta, Puente Piloto.

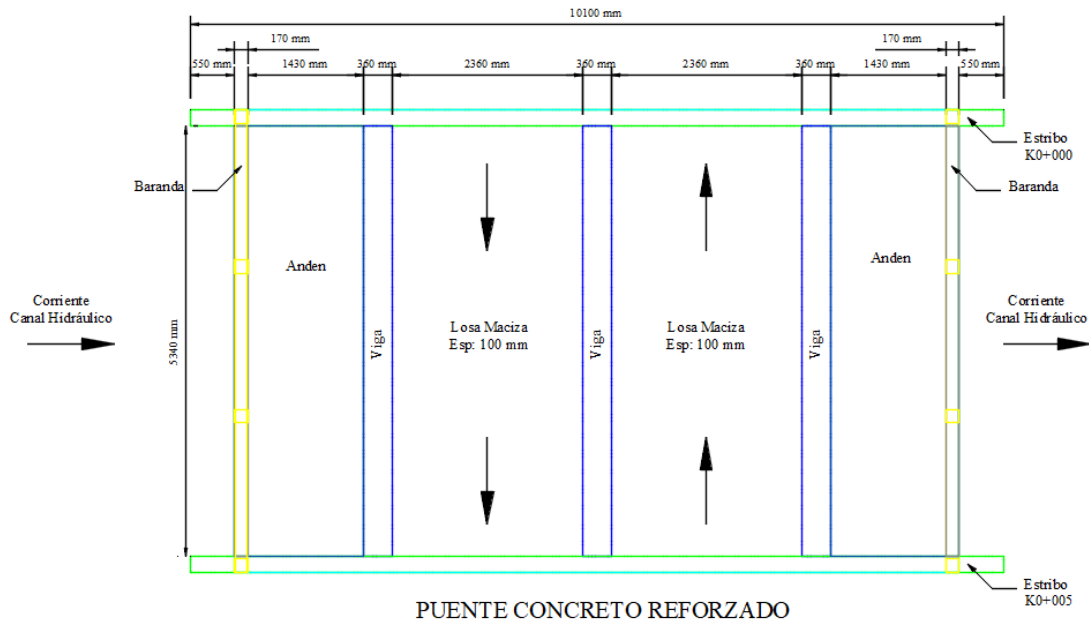


Figura 19 Corte Transversal, Puente Piloto.

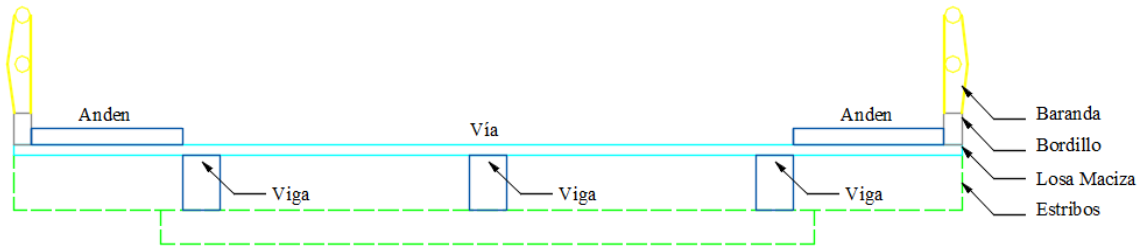
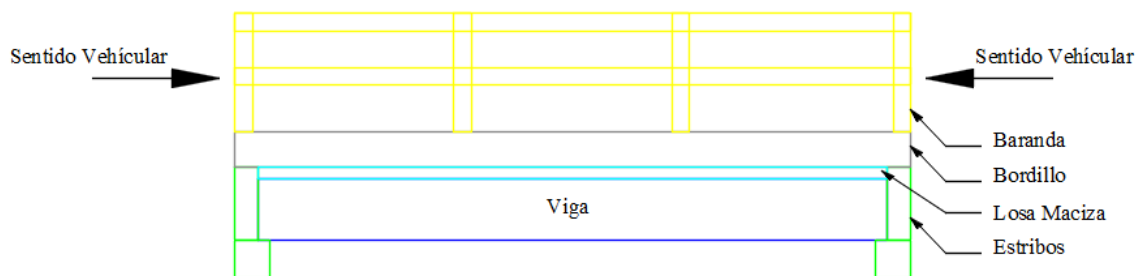


Figura 20 Corte Longitudinal, Puente Piloto.



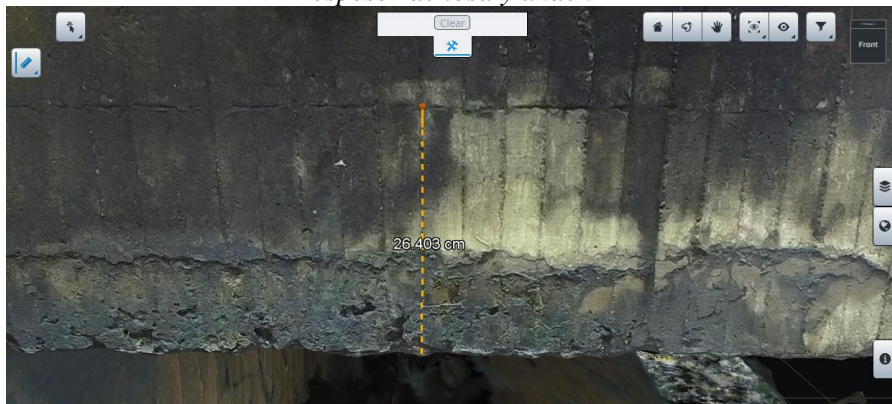
Las dimensiones geométricas de los elementos que hacen parte integral del puente, se obtuvieron a partir de un proceso de tomas de medidas. Este levantamiento se realizó utilizando los instrumentos tales como formato de captura de información y flexómetro, como se puede observar en Figura 21.

Figura 21 Levantamiento geométrico elementos del Puente, espesor de losa y andén.



También, se empleó el modelo digital 3D desarrollado en el *software ContextCapture* a partir de las imágenes capturas por el VANT, para la verificación de las magnitudes y obtención de datos faltantes, como se puede observar en Figura 22.

Figura 22 Chequeo de magnitudes registradas mediante modelo digital 3D en ContextCapture, espesor de losa y andén



Esta actividad ejecutada en campo, en una primera instancia se tornó manejable, debido al tamaño del puente. Sin embargo, esta se agudizó al momento de capturar los datos de los elementos localizados en la parte inferior del puente, debido al limitado espacio para circular y por la alta inclinación que presentan las paredes del canal hidráulico. Condiciones que hicieron de esta actividad, ardua y riesgosa para el inspector.

La inspección visual tradicional fue la primera investigación que se realizó para examinar e inventariar los daños presentes en los componentes del puente. Permitiendo conocer su tipo, localización, magnitud y severidad. Información inherente al diagnóstico y pronóstico del comportamiento estructural del puente.

Esta se desarrolló en base a lo propuesto en INVIAS & Universidad Nacional (2006), teniendo en cuenta la siguiente secuencia: primero, se supervisó el componente correspondiente a la superficie del puente, seguidamente se hizo reconocimiento de los andenes y bordillos, barandas metálicas, aletas, estribos, losa y finalmente las vigas. Todos estos elementos se inspeccionaron de forma exhaustiva.

Para la inspección se utilizó como herramientas la cámara fotográfica del celular de marca Samsung J8, flexómetro, formatos de captura de información y linterna. Esta labor se efectuó en un tiempo aproximado de 240 minutos.

Por otra parte, dentro de los desafíos presentados durante la materialización de la inspección visual tradicional, se encontró el mantener la seguridad del inspector en la parte debajo del puente, así como el de capturar imágenes, mediciones e información de los daños en esta misma zona, debido a su difícil acceso y su poco espacio para circular. Por último, el proteger los instrumentos tales como celular, linterna, formatos y flexómetro ante posibles caídas, generando que se estropeen e incluso que se extravíen.

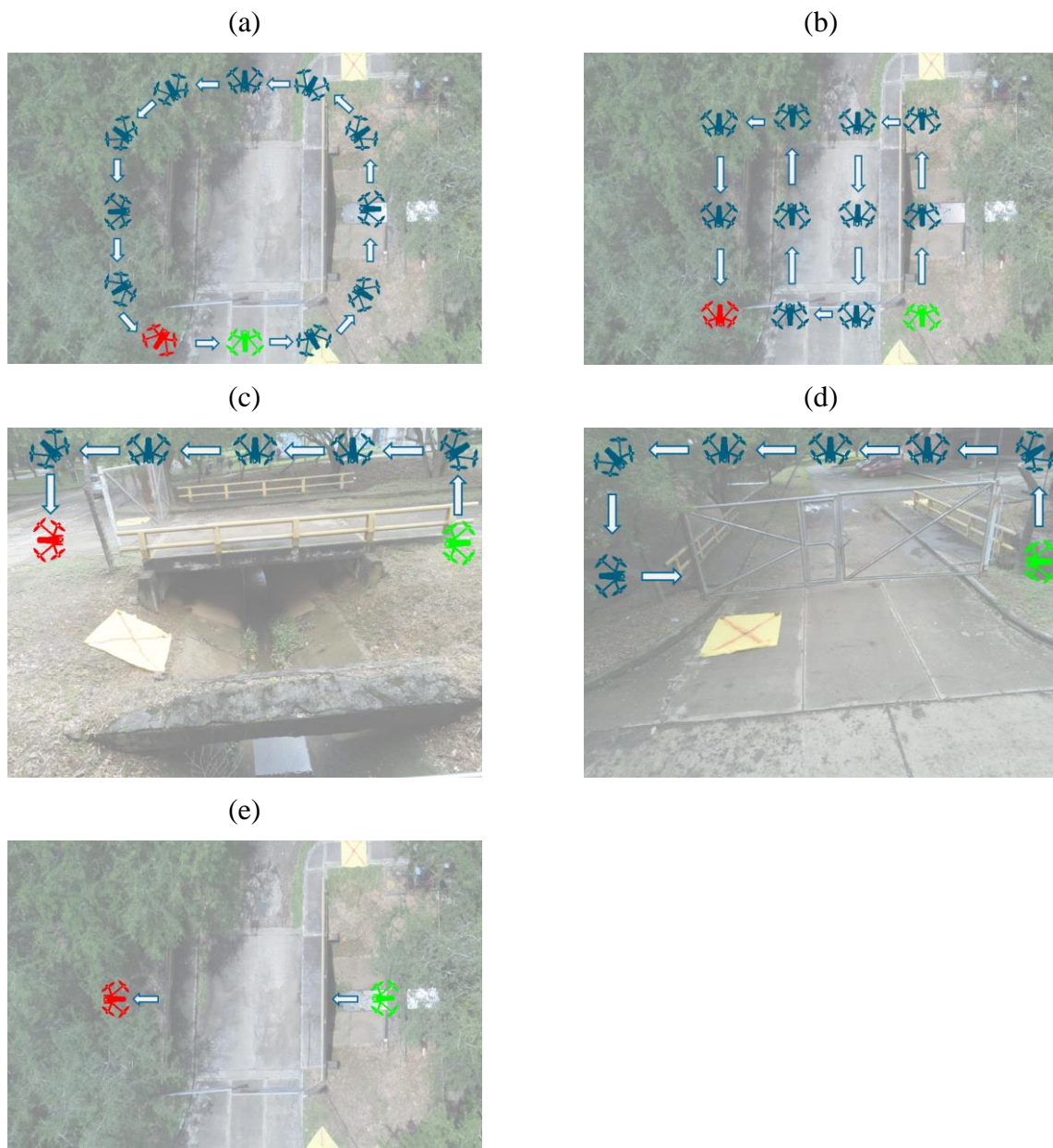
En lo que respecta a la inspección visual empleando VANT, esta se llevó a cabo utilizando la aeronave de marca Parrot, tipo Anafi Work. El cual es un equipo de bajo peso y fácil maniobrar. También, tiene la ventaja de poder capturar imágenes de la estructura en todos sus ángulos, gracias al amplio rango de inclinación de su cámara.

Para esta inspección se planificó una misión de tipo “vuelo libre”, debido a la gran cantidad de obstáculos presentes alrededor del puente (p. ej. árboles, estructura de cerramiento y postes de luz). Se descartó la opción de implementar una misión automática, ya que esta debía proyectarse a una altura aproximada de 30 metros sobre el nivel de la superficie del puente. Altura que, además de ocasionar una disminución en la nitidez en las fotografías del puente, imposibilitaba, en conjunto con los obstáculos, gozar de imágenes, tanto superior como inferior y lateral del puente, con traslapos mínimos adecuados del 75%. Dificultando la inspección de todos los componentes del puente y la creación del modelo digital 3D.

Durante la etapa de planificación, se realizó un recorrido sobre y alrededor del puente, con el objetivo de identificar las zonas de “alto riesgo”. Connotación que el autor de esta investigación ha asignado a aquellos lugares donde el VANT puede sufrir una colisión y por lo tanto requiere de mayor concentración y destreza, por parte del piloto, para maniobrar el VANT.

En la Figura 23 se presenta la secuencia de vuelos proyectados y ejecutados para la inspección del puente usando VANT. En esta se puede evidenciar que dicha proyección se configuró de tal forma que permitió fotografiar todas las partes del puente, incluso la inferior. Generando un banco de información importante para su posterior análisis.

Figura 23 Planificación misiones de vuelo libre. (a) Forma Circular, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (b) Forma Cuadrícula simple, 5,0m de altura sobre la superficie del puente, - 90° inclinación vertical de la cámara. (c) Forma Arco Longitudinal, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (d) Forma Arco Transversal, 1 m, 3,0m y 5,0m de altura sobre la superficie del puente, 0°, - 30° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. (e) Trayecto debajo del puente, - 1,0m sobre la superficie del puente, +45° inclinación vertical de la cámara.



El tiempo de duración aproximado de la misión fue de 25 minutos, con una velocidad de vuelo constante de 2m/s. Tiempo y velocidad apropiados para la inspección de este puente y además para obtener imágenes con traslapos mínimos del 75%. En total se capturaron 618 fotografías del puente y sus alrededores.

Por otra parte, para la referenciación geográfica de las fotografías, se tomaron tres puntos de control a través del levantamiento tipo RTK, como se puede observar en Figura 24. Puntos, los cuales fueron asignados en campo de manera conveniente y vistosa, para su evidencia en las fotografías capturadas por el VANT. Para facilitar su ubicación se utiliza una lona de color amarillo de 1,00 m de ancho por 1,00 m de largo, con una cruz de color rojo trazada en una de sus caras, como se puede observar en Figura 25. El punto de intersección de la cruz fue el punto levantado. Para los tres puntos de control se obtuvieron su latitud, longitud y altitud, como se puede observar en Tabla 16.

Figura 24 Levantamiento puntos de control, Puente Piloto, Universidad del Valle. (a) Punto de Control 1 (b) Punto de Control 2 (c) Punto de Control 3

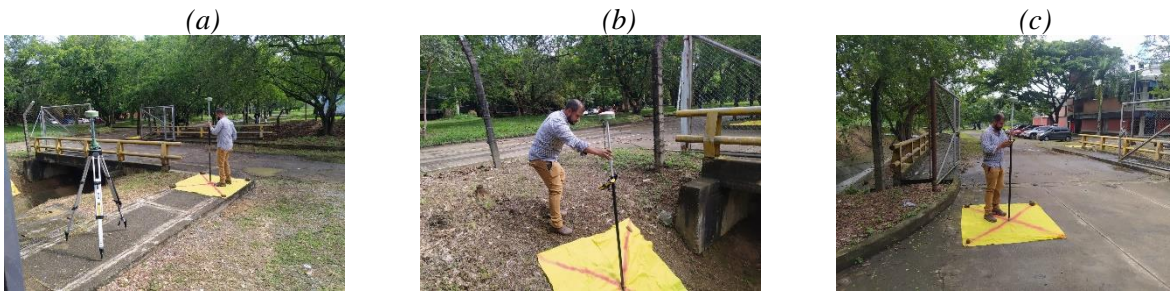


Figura 25 Localización puntos de control, Puente Piloto, Universidad del Valle



Tabla 16. Coordenadas Puntos de control, inspección Puente Piloto.

PUNTOS DE CONTROL	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
Base	N3°22'34,9089''	W76°31'51,7254''	994,9570
Punto de Control 1	N3°22'35,0151''	W76°31'51,7301''	994,9620
Punto de Control 2	N3°22'34,9756''	W76°31'52,0319''	993,9370
Punto de Control 3	N3°22'35,2571''	W76°31'52,1093''	994,8140

Finalizados los trabajos de campo, se prosiguió con el procesamiento de la información obtenida. Este, se desarrolló empleando el *software ContextCapture* a partir del siguiente procedimiento: primero, se transfirieron todas las fotografías capturadas por el VANT al software, seguidamente, en el software, se crearon los puntos de control a través de sus coordenadas geodésicas, luego fueron asignados a por lo menos 9 fotografías que contuvieran a estos a partir de la lona de referenciación. Por último, mediante un proceso de aerotriangulación, propio del software, se genera la reconstrucción del modelado digital 3D del puente.

En resumen, en esta etapa se logró reconocer lo fundamental de hacer un recorrido previo del puente para evidenciar las zonas de alto riesgo a la seguridad del inspector y del VANT. También, se identificó que al momento de manipular el VANT por debajo del puente, esta debe ser a través de una alta concentración por parte del operador debido a que existe una alta probabilidad de colisión del vehículo. Por último, y considerada la más importante, se verificó que para la inspección visual empleando VANT es obligatorio realizar una misión de vuelo libre en donde se pueda capturar la totalidad de las zonas del puente.

3.4. Inspección visual tradicional, Puente Caso de Estudio

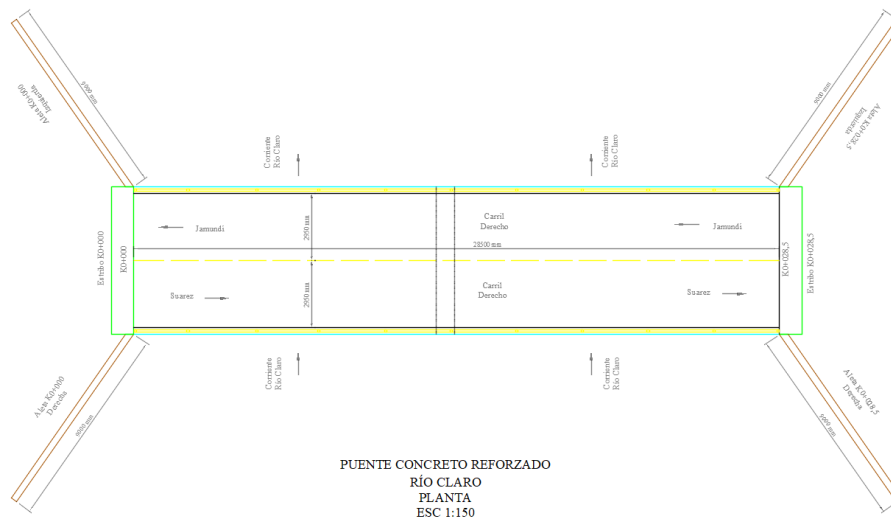
En esta fase se inspeccionó mediante una investigación visual sistemática tradicional estipulada por (INVIAS & Universidad Nacional, 2006), el puente en concreto reforzado “Puente Río Claro”.

Como se mencionó en ítem 3.1 de la metodología de la investigación, el “Puente Río Claro” presenta un sistema estructural el cual consiste en unos elementos tipo arcos inferior enlazados al tablero del puente mediante muros estructurales, todo apoyado sobre estribos. Sistema que hace de este, una estructura atractiva e histórica.

Antes de iniciar con los trabajos de inspección, se averiguó sobre la existencia y disponibilidad de documentos de diseño y construcción del puente, así como de planos as-built, registros de mantenimiento y/o reforzamiento; y ensayos. Sin embargo, dentro de la búsqueda se evidenció la no existencia de estos. Por lo que se consideró oportuno realizar un levantamiento detallado de la geometría y componentes estructurales del puente.

El levantamiento geométrico estructural del puente, se desarrolló en tres etapas. La primera, consistió en tomar todas las medidas posibles en campo, de los distintos componentes del puente, a través del instrumento flexómetro. Esta actividad permitió a la vez, ir identificando las patologías presentes en el puente. En cuanto a la segunda etapa, se realizó un levantamiento de la curvatura longitudinal del puente empleando los equipos de GPS. También a partir del uso de estos equipos, se realizó un levantamiento de las aletas, así como de los estribos. Identificando además de sus posicionamientos en planta, sus perfiles. Por último, se utilizó el modelo digital 3D generado en el *software Contextcapture* a partir de las imágenes capturadas durante las misiones de vuelos del VANT. Esta última etapa fue indispensable debido a que permitió obtener las dimensiones de los componentes inaccesibles (p. ej. Las longitudes correspondientes a la luz y gálibo del puente), por la falta de un vehículo móvil de inspección con canastilla o de una embarcación. Adicionalmente, este modelo digital 3D permitió verificar las medidas obtenidas en campo durante las dos primeras etapas, evidenciando las buenas prácticas ejecutadas durante el levantamiento. En las Figuras 26 y 27 se presentan los esquemas de la planta y corte longitudinal del levantamiento geométrico del puente.

Figura 26 Planta Puente Río Claro



se tuvo el riesgo de caída al río por la inestabilidad del terreno, como se puede observar en Figura 29.

Figura 28 Exposición del inspector durante la inspección visual tradicional. Parte superior del puente.



Figura 29 Exposición del inspector durante la inspección visual tradicional. Parte inferior del puente.



El tiempo total dedicado para la inspección visual tradicional del puente fue de 4 horas, en donde se ejecutaron las actividades de identificación, localización y cuantificación de los daños presentes en el puente.

En resumen, a pesar de ejercer una labor de inspección detallada y rigurosa, no fue posible inspeccionar y cuantificar la totalidad de los componentes, conllevando a presentar posibles resultados incompletos generando así un posible diagnóstico falaz del puente.

3.5. Inspección visual empleando VANT, Puente Caso de Estudio.

Esta inspección se ejecutó con la implementación del VANT Parrot Anafi Work, el cual es un equipo de alta tecnología e innovador, que presenta características apropiadas para el buen desempeño dentro del campo de las inspecciones.

Por lo que se refiere al procedimiento empleado, este se inició con la ejecución de un vuelo de reconocimiento, constatando la altura apropiada para desarrollar las misiones y las zonas de alto riesgo que puedan ocasionar una colisión del VANT. A partir de esta información adquirida, se efectuó una primera misión de vuelo de tipo “grilla cuadrícula simple”. La cual se programó con el objetivo de tener un registro detallado del puente y sus zonas aledañas. La misión se realizó a una altura de 20 metros con respecto al tablero del puente y tuvo una duración de 2 minutos, con el vehículo a una velocidad de 2 m/seg. La cámara del VANT estaba orientada con un ángulo de -

90°. Este primer levantamiento fue fundamental para localizar los puntos de control levantados con los GPS y así poder referenciar las fotografías con coordenadas reales. Posteriormente a esta primera misión, se hizo una misión de “vuelo libre” en donde a partir de una planeación de vuelo definida con base al reconocimiento del puente y zonas colindantes, se logró además de capturar todos los componentes del puente, tener suficiente registro con el fin de generar un modelo digital 3D conveniente.

Esta misión de “vuelo libre” se trazó de tal forma que se logró capturar todas las partes del puente (superior, inferior, lateral derecho e izquierdo). En total se ejecutaron cinco misiones libres, las cuales se pueden observar desde la Figura 30 a Figura 35. Dependiendo de la localización del VANT con relación al tablero del puente, se proyectó la inclinación vertical de la cámara, con el fin de enfocar y capturar todas las zonas de los componentes. Estas inclinaciones variaron de +30° a -90° y dependieron de la altitud en que se encontraba el VANT. Adicionalmente, estas misiones se planearon de forma tal, que se pudo capturar fotografías con traslapes mínimos del 75%, propios para la generación de un procesamiento de imágenes preciso.

Figura 30 Misión Cuadrícula, 20 m de altura sobre el nivel del tablero, 35 m de longitud por trayecto, 5 m de separación entre trayecto, - 90° inclinación vertical de la cámara.

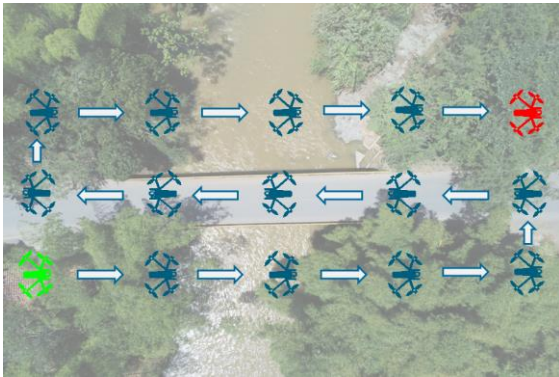


Figura 31 Misión libre, 1 m de altura sobre nivel del río Claro, 18 m de longitud por trayecto, + 30° inclinación vertical de la cámara.

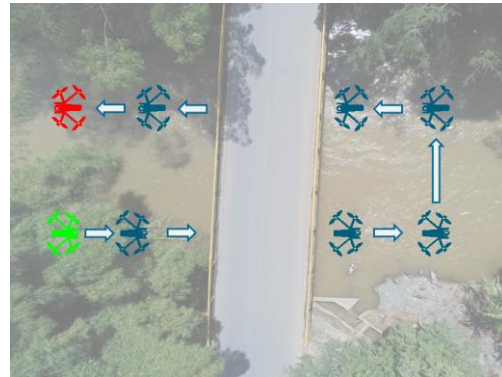


Figura 32 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 8,0m de altura sobre nivel del río Claro, 25 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 30° inclinaciones verticales de la cámara. Aguas Arriba.



Figura 33 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 8,0m de altura sobre nivel del río Claro, 25 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 30° inclinaciones verticales de la cámara. Aguas Abajo.



Figura 34 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 9,0m de altura sobre nivel del río Claro, 40 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. Hacia K0+000

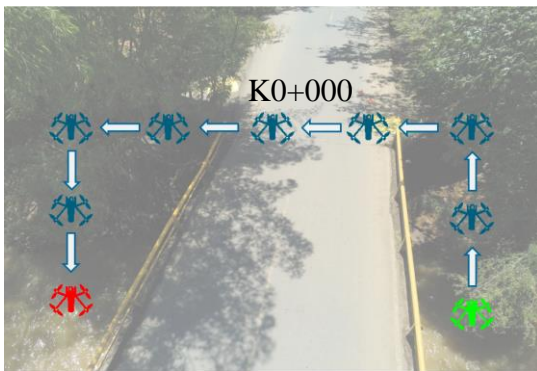
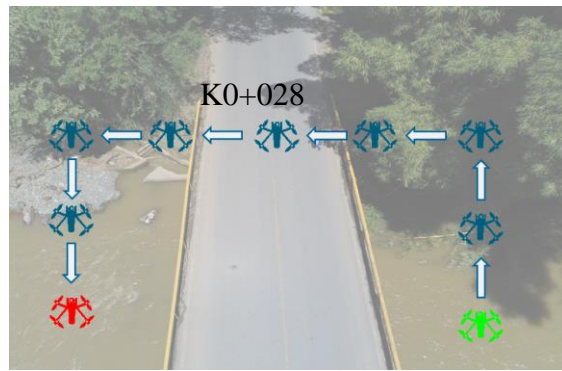


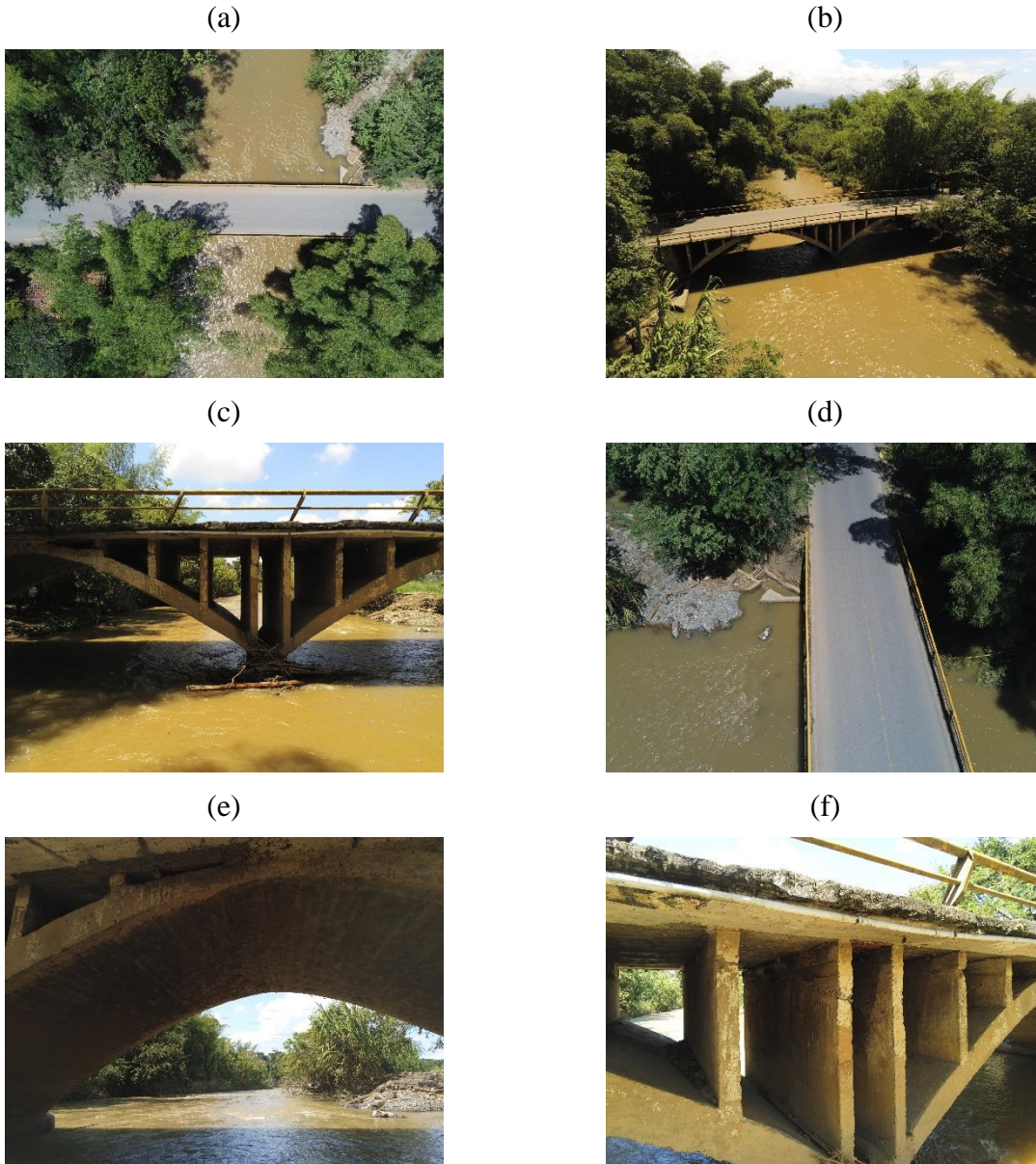
Figura 35 Misiones libres, 1 m, 3,5m y 9,0m de altura sobre nivel del río Claro, 40 m de longitud por trayecto, + 30°, 0° y - 45° inclinaciones verticales de la cámara. Hacia K0+028



En total se capturaron 536 fotografías y la duración de la inspección del puente usando VANT fue de 60 minutos, tiempo que se logró al utilizar la máxima duración de las cuatro baterías del VANT. Es importante resaltar que debido a la poca experiencia del piloto del vehículo en cuanto a su manejo y al limitado tiempo para ejecutar por segunda oportunidad una misión de vuelo, el inspector tomó la decisión de realizar varias misiones de vuelos libres para tener la mayor cantidad de información. Sin embargo, teniendo mayor experiencia en el manejo del vehículo aéreo, se puede asegurar que esta inspección se hubiese podido lograr en un tiempo menor al presentado en esta oportunidad.

En la Figura 36 se muestran algunas capturas realizadas por el VANT durante la ejecución de las misiones.

Figura 36 Capturas del Puente realizadas por el VANT. (a) Captura Superior. (b) Captura Lateral. (c) Inspección Lateral, Aguas Arriba. (d) Inspección Superior. (e) Inspección Inferior. (f) Inspección Detallada.



De igual forma que en la inspección tradicional, en esta tampoco se suspendió ni el flujo vehicular ni el peatonal. Diferenciándose en que en esta oportunidad el inspector se encontraba piloteando el VANT desde zona segura, sin colocar en riesgo su vida ni integridad física, como se puede observar en Figura 37.

Figura 37 Ubicación del inspector durante la inspección visual empleando VANT. Costado derecho del puente.



En relación con los puntos de control, estos se levantaron mediante el sistema de posicionamiento global, GPS, permitiendo obtener en tiempo real su posición en cuanto a latitud, longitud y altitud. En total se levantaron tres puntos de control, suficientes para ajustar a la realidad el modelo digital 3D generado a partir de las fotografías capturados por el VANT. En la Tabla 17 se presentan las coordenadas de los puntos de control; y en las Figura 38 y Figura 39 se presentan sus localizaciones en planta.

Tabla 17. Coordenadas Puntos de control, inspección Puente Río Claro.

PUNTOS DE CONTROL	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
Base	N3°12'50,4766''	W76°33'58,5729''	1017,9390
Punto de Control 1	N3°12'50,3870''	W76°33'58,6116''	1016,4900
Punto de Control 2	N3°12'50,1462''	W76°33'58,5035''	1016,8460
Punto de Control 3	N3°12'49,2911''	W76°33'59,6817''	1018,4080

Figura 38. Localización puntos de control 1 y 2, Puente Río Claro.



Figura 39. Localización puntos de control 3, Puente Río Claro.



En resumen, debido a la correcta manipulación del VANT y su cámara, fue posible inspeccionar la totalidad de los componentes del puente, permitiendo además de, obtener información cuantiosa de este a través de fotografías referenciadas con coordenadas precisas, generar un modelado 3D del puente que sirve de base para cuantificar los daños originados. Conduciendo a presentar resultados completos y diagnóstico verídico.

3.6. Procesamiento de imágenes, Puente Caso de Estudio.

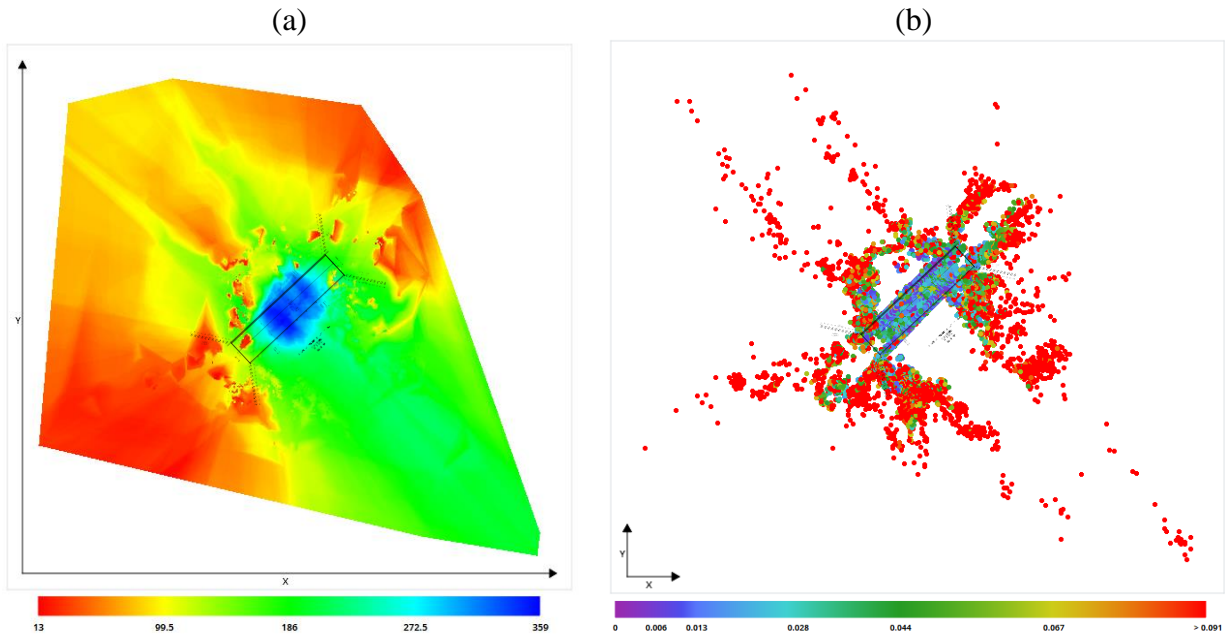
Para el procesamiento de imágenes obtenidas durante la ejecución de las misiones en la fase de inspección visual empleando VANT, se utilizó el *software ContextCapture*.

El procedimiento radicó en adicionar las 536 fotografías en el modelo creado en el software. Seguidamente se introdujeron los tres puntos de control y se asignaron cada uno a por lo menos siete fotografías. Luego se definieron los parámetros para someter el proceso de aerotriangulación, el cual permite densificar el control horizontal y vertical entre modelos estereoscópicos a partir de puntos determinados directamente en terreno, mediante la generación de coordenadas terrestres por métodos de cálculo y aprovechamiento de las relaciones geométricas entre fotografías consecutivas (IGAC, 2016).

Dentro de los parámetros se encuentran el nombre del archivo, la orientación y ajuste de la triangulación la cual se realiza mediante los datos de posición contenidos en las fotografías, y por último se escogió como configuración el cálculo de los puntos de enlace, el ajuste de sus posiciones, así como de la longitud focal, punto principal, distorsión radial y tangencial. Una vez definidos estos, se continuó con el procesamiento de la aerotriangulación que tuvo una duración de 31 minutos.

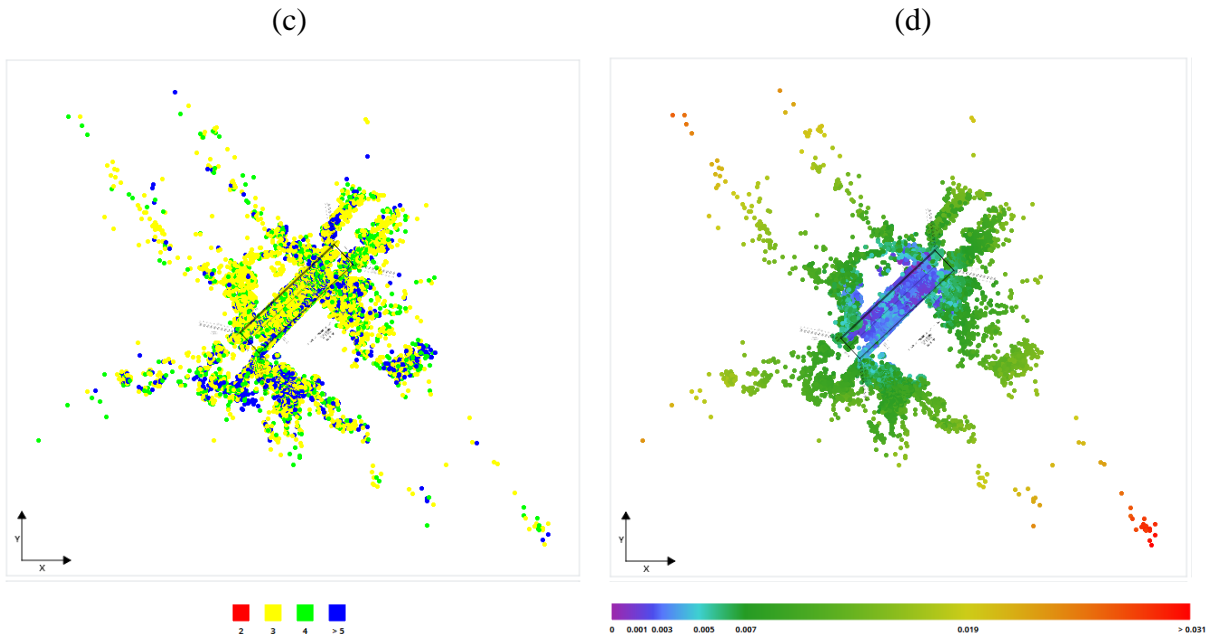
Finalizada la aerotriangulación se hizo el análisis de esta, en donde se estudiaron las cantidades de fotos tenidas en cuenta para el enlace de los puntos. De las 536 fotografías ingresadas, fueron calibradas 535, cantidad satisfactoria. Adicionalmente, se generaron 56.996 número de puntos de enlace. Por otra parte, a partir de graficas emitidas por el software, se logró conocer datos importantes como los son: el número de fotos capturando la estructura, la incertidumbre de posición de los puntos de enlace, el número de fotos observando los puntos de enlace y la resolución de los mismos. Esta información gráfica se puede observar en Figura 40. Es de precisar que a estas gráficas obtenidas el autor le adicionó el esquema del puente con el objetivo de un mayor entendimiento de la información.

Figura 40 Medidas graficas de calidad en los puntos de enlace. (a) Numero de fotos capturando la escena. (b) Incertidumbre de posición de los puntos de enlace, valores medidos en metros (c)Numero de fotos observando los puntos de enlace. (d)Resolución en los puntos de enlace, medido en metros/pixel.



Número de fotos que capturan la escena: visualización en planta (Plano XY) de la escena, con colores indicando el número de fotos que potencialmente ven cada área.

Incertidumbre de posición: visualización en planta (Plano XY) de todos los puntos de enlace, con colores que representan la incertidumbre en la posición del punto individual.

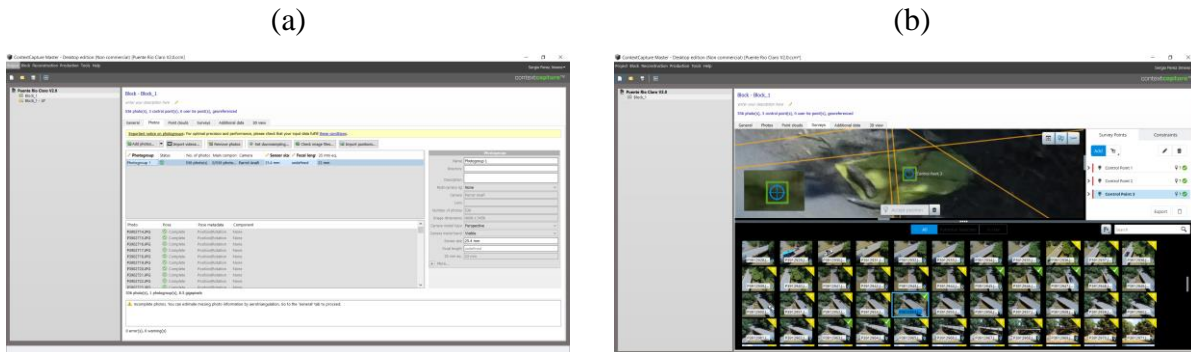


Número de observaciones por punto de enlace: visualización en planta (Plano XY) de todos los puntos de enlace, con colores que representan la cantidad de fotos que se han utilizado para definir cada punto.

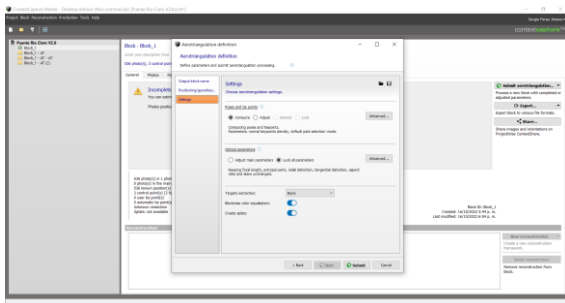
Resolución: visualización en planta (Plano XY) de todos los puntos de enlace, con colores que representan la resolución en la posición del punto individual.

Por último, una vez se verificó que la información procesada en la aerotriangulación y los resultados arrojados fueron bastante prometedores, se ejecutó la producción del modelo 3D del puente, mediante la opción “Crear un nuevo marco de reconstrucción 3D” presentado en el software. En la Figura 41 se puede observar los pasos efectuados para la obtención del modelado 3D.

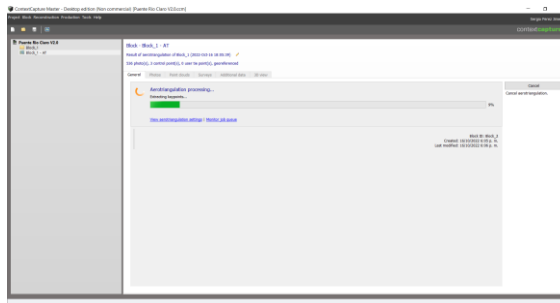
Figura 41 Procedimiento para obtener modelo 3D, software ContextCapture. (a) Adición de fotografías. (b) Asignación de puntos de control. (c) Configuración de la aerotriangulación. (d) Procesamiento de la aerotriangulación. (e) Análisis de la información generada en el proceso de aerotriangulación (f) Producción modelo 3D del puente



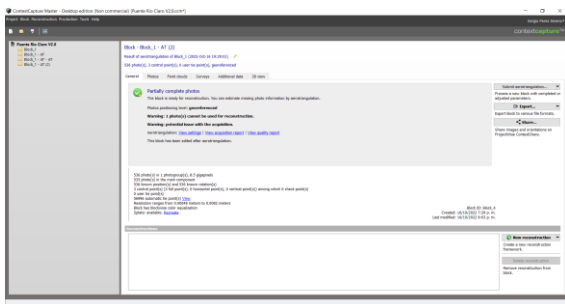
(c)



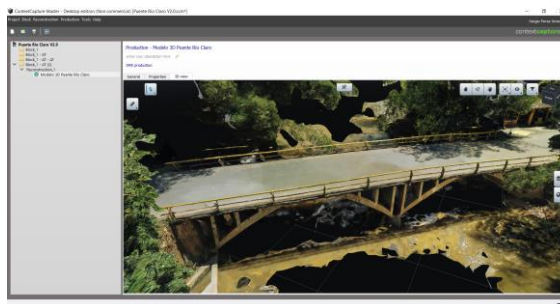
(d)



(e)



(f)



En resumen, gracias a la cantidad y enfoque de las fotografías obtenidas durante las misiones de vuelos, se logró obtener un modelado 3D apropiado para acrecentar los resultados de la inspección visual empleando VANT y el dictamen final del estado estructural del puente.

3.7. Estudio de patología, Puente Caso de Estudio

En lo que respecta a esta fase, se emplearon dos formas para identificar y conocer los daños presentes en la estructura del puente. Una desde el actuar tradicional, es decir aplicando técnicas de estudio en campo y otra desde el actuar innovador, en donde a partir de herramientas tecnológicas se logró evidenciar y cuantificar los daños.

En ambas formas se pudieron además de captar los daños, cuantificarlos, calificar los componentes del puente según la severidad de su daño y definir el estado estructural del puente.

Sin embargo, entre esta dos, la correspondiente a la tradicional presentó resultados incompletos debido a que no se logró registrar la totalidad de los daños. Lo anterior por la imposibilidad de examinar algunos componentes del puente por la falta de plataformas móviles o embarcaciones. En cambio, en la forma innovadora se logró evaluar todos los componentes.

Tanto en la forma tradicional como en la innovadora, una vez fueron identificados los daños, se midieron y de acuerdo a su grado de severidad se le dio una calificación al componente

estructural del puente, teniendo en cuenta la escala cualitativa presentada en el módulo de inspección principal del SIPUCOL. Para finalmente, a través de una correlación entre la condición de estado por elemento y calificación numérica presentada en E. Muñoz et al. (2005), obtener el estado estructural del puente.

De las patologías percibidas durante la ejecución de la inspección tradicional, se encontraron las fisuras transversales sobre la carpeta asfáltica, fisura transversal en junta de construcción, delaminación y golpe por impacto vehicular sobre barandas metálicas, exposición del acero de refuerzo y desprendimiento del concreto del tablero, contaminación del concreto y grieta por movimiento lateral en estribos, atascamiento de troncos y maleza sobre tajamar, fisura por cortante y construcción inadecuada de juntas frías en muros de enlace tablero-arco y, segregación y eflorescencia en el arco. Estas patologías se encuentran registradas en Anexo 3, de acuerdo con (INVIAS & DCD, 1999).

En la Figura 42 se muestran algunas de las patologías evidenciadas durante el cumplimiento de la inspección visual tradicional.

Figura 42 Patologías evidenciadas durante inspección visual tradicional. (a) Fisuración Transversal (b) Golpe por impacto vehicular (c) Grieta por Movimiento Lateral (d) Exposición del acero de refuerzo



A pesar de evidenciar las patologías descritas anteriormente, no fue posible cuantificarlas a todas, debido a que algunas se encontraban en zonas inaccesibles por parte del inspector. En

algunos escenarios, los movimientos que se ejecutaron para obtener las dimensiones de los daños presentes, fueron catalogado como complejos. Esto lo podemos observar en Figura 43, en donde para obtener la longitud de la fisura a cortante presente en los muros de enlace del puente, el inspector tuvo que acceder a la parte superior del arco.

Figura 43 Exposición del inspector durante la cuantificación de daños, inspección visual tradicional. Parte inferior del puente.



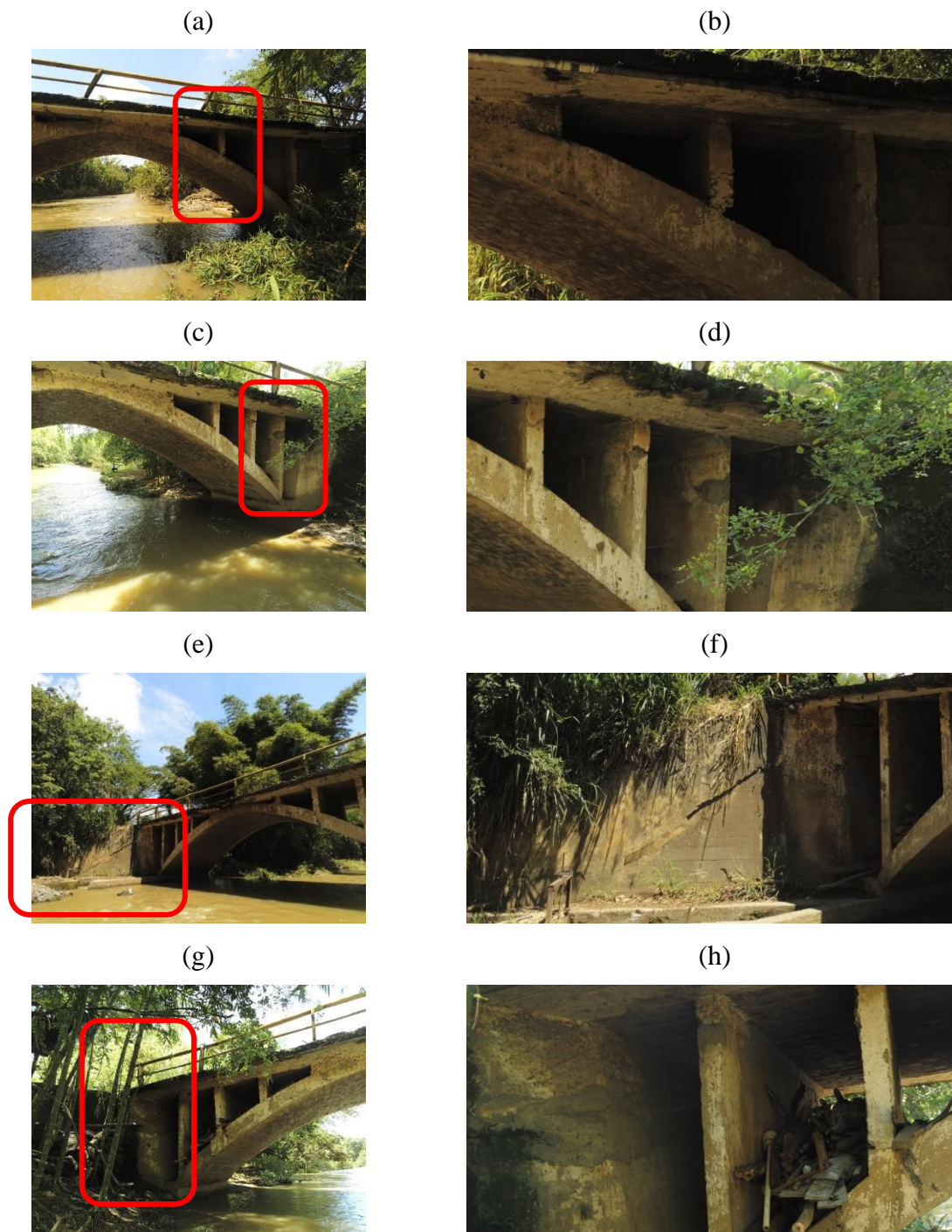
En cuanto al registro fotográfico de los daños, se observó que aquellos en donde su acceso fue posible, la calidad de la imagen fue alta. Por el contrario, en aquellas zonas donde la accesibilidad fue nula, se tuvo que realizar zoom a la cámara fotográfica para obtener capturas de los daños, generando resultados deficientes en cuanto a la calidad de las imágenes.

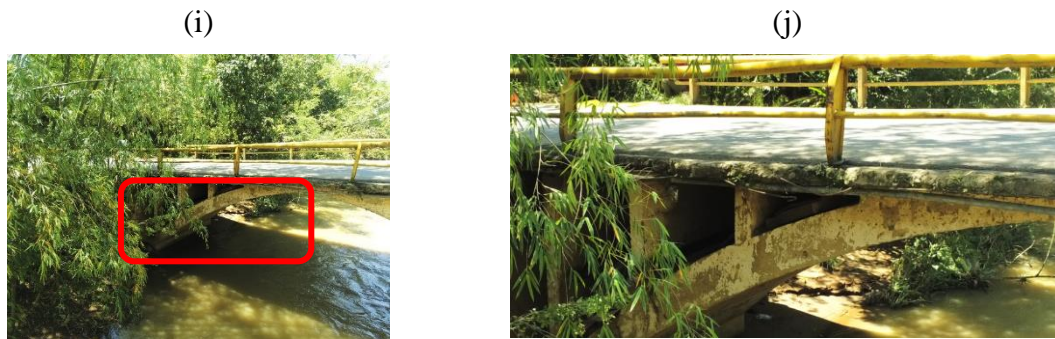
Referentes a la forma innovadora, inspección visual empleando VANT, dos métodos fueron usados para identificar los daños presentes en cada componente del puente. El primero consistió en examinar de forma exhaustiva y cuidadosa las fotografías capturadas por el VANT y el segundo, en analizar a través de un proceso paulatino el modelo digital 3D elaborado en el *software ContextCapture*.

En esta segunda forma, se logró inspeccionar de forma integral todos los componentes del puente y se obtuvo información tanto de su parte superior como inferior. Evidenciando los daños mencionados durante el estudio de patología de forma tradicional y logrando cuantificar la totalidad. Adicionalmente, permitió observar que los componentes correspondientes al tablero, estribos y elementos de enlace tablero-arco son los que presentan daños severos. Estas patologías se encuentran registradas en Anexo 4, de acuerdo con INVIAS & DCD (1999).

En la Figura 44 se relacionan los daños más intensos identificados durante la inspección con VANT.

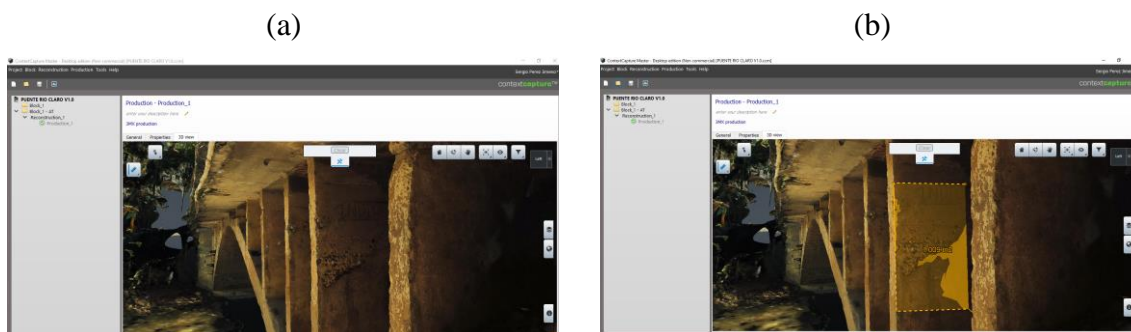
Figura 44 Identificación de daños severos sobre componentes estructurales del puente: (a) Segregación y discontinuidad elemento de enlace tablero-arco tipo muro (b) Detalle segregación y discontinuidad elemento de enlace tablero-arco tipo muro (c) Grieta por cortante elemento de enlace tablero-arco tipo muro (d) Detalle grieta por cortante elemento de enlace tablero-arco tipo muro (e) Grieta por movimiento lateral de estribo y aleta k0+028 lado izquierdo (f) Detalle grieta por movimiento lateral de estribo y aleta k0+028 lado izquierdo (g) Grieta por movimiento lateral de estribo k0+000 (h) Detalle grieta por movimiento lateral de estribo k0+000 (i) Separación del acero de refuerzo longitudinal (pobre detallado) (j) Detalle separación del acero de refuerzo longitudinal (pobre detallado)





Identificados todos los daños, se prosiguió con cuantificarlos utilizando las mediciones tomadas en campo y el modelo digital 3D. Esta última opción es de gran importancia sobre todo en aquellos elementos de acceso nulo. En la Figura 45 se presentan la forma como se identificaron y cuantificaron los daños presentes a través del modelo digital 3D.

Figura 45 Identificación y cuantificación de daño presente en muro de enlace tablero-arco, Aguas Arriba, modelo digital 3D (a) Identificación de daño, segregación (b) Cuantificación área de daño



Cuantificados todos los daños en cada componente del puente, se prosiguió a calificar su estado de acuerdo a su nivel de daño. El método empleado está descrito en el ítem 6.3 de la revisión bibliográfica.

3.8.Evaluación estructural

Determinada la condición del estado estructural del puente, el cual es irregular, se prosiguió a evaluar el factor de clasificación de acuerdo con la metodología propuesta por WSDOT (2020), la cual se encuentra descrita en el ítem 6.4 de la revisión bibliográfica, permitiendo identificar si el puente presenta la capacidad admisible de soportar la carga viva predominante.

Para determinar este factor de clasificación fue necesario realizar un análisis sofisticado de la estructura sometida a las cargas mediante el método por elementos finitos. Este modelo presenta las condiciones físicas actuales de los elementos estructurales del puente, así como las propiedades

mecánicas de los materiales que los componen. Sin embargo, se aclara que algunas propiedades (p. ej. Resistencia específica del acero de refuerzo y cuantía de refuerzo) fueron asumidas teniendo en cuenta los valores mínimos permitidos por (AIS, 2014) debido a la carencia de información estructural del puente.

Una vez estructurado el modelo del puente y asignadas las propiedades mecánicas de los materiales, se prosiguió con aplicar las cargas actuales. Referente a las cargas muertas se tuvo en cuenta el peso propio de los elementos estructurales y de los accesorios no estructurales (DC) y el peso propio de la carpeta de rodamiento y de las instalaciones (DW). Y en cuanto a la carga viva se tuvo en cuenta la carga viva vehicular Tándem (LL) y carga de carril de diseño.

La carga vivía vehicular que se toma para esta investigación es la correspondiente a Tándem y no la carga de camión HL93 o camión de diseño según (AIS, 2014), ya que es la carga vehicular predominante. El Tándem es una carga permitida por (AIS, 2014).

Finalizada la concepción del modelo estructural, se continuó con el análisis de este a través de su comportamiento basado en las deformaciones y fuerzas internas (flexión y cortante) de la estructura bajo las solicitaciones de carga. Adicionalmente, dentro del análisis se constató que las cargas fueron asignadas correctamente y que la estructura presentaba una integración total entre sus componentes.

Verificada la funcionalidad y fiabilidad del modelo estructural, se identificaron las fuerzas actuantes debido al momento flexionante y fuerza cortante en los componentes críticos que durante la inspección visual fueron identificados por presentar deterioración en el material y pérdida de su resistencia. La finalidad de identificar estas fuerzas es para evaluar si la estructura es capaz de resistirla o no mediante el factor de clasificación.

En esta investigación, para el factor de clasificación, únicamente se realiza la evaluación debido a la fuerza cortante en los muros de enlace arco-tablero, cuyo estado estructural es malo. Lo anterior, debido a las siguientes razones: primero, es el elemento que mayores afectaciones patológicas presenta, incluyendo grietas de cortante. Segundo, por la falta de información estructural referente a la configuración del acero de refuerzo. Tercero y último, debido a que se determinó en campo la resistencia aproximada a la compresión del concreto mediante el ensayo no destructivo martillo de impacto (esclerometría).

Por último, definida la condición de evaluación del factor para el componente muro, se determina su valor mediante la EC-2, evidenciando si este puede soportar la fuerza cortante debido a la actual carga viva vehicular ($R.F \geq 1,0$) o definitivamente se requiere realizar una inspección más detallada del puente debido a que el factor es inferior a la unidad ($R.F < 1,0$).

4. RESULTADOS

Para este capítulo se presentan los acontecimientos derivados de la aplicación de las 8 fases descritas en la metodología de trabajo. Los cuales están relacionados con la escogencia de los puentes propios del estudio piloto y estudio de caso. También, con la estimación de los estados estructurales de los puentes a partir de las metodologías de inspección tradicional y empleando VANT, obteniendo adicionalmente una comparación sustancial entre estos dos métodos. Y, por último, con la capacidad estructural del puente caso de estudio.

Los resultados se presentan en dos momentos, el primero vinculado al puente piloto y el segundo al puente caso de estudio. Como se puede observar a continuación:

4.1. Puente Piloto

Para este apartado se obtuvieron como resultados la selección del puente, las patologías evidenciadas durante las ejecuciones de las inspecciones visuales tradicional y usando VANT, así como un cuadro comparativo entre estas metodologías. Y finalmente, la clasificación cuantitativa y cualitativa del estado estructural del puente. Todo lo anterior se detalla a continuación.

4.1.1. Selección puente piloto

El puente seleccionado para el estudio piloto, es el correspondiente al localizado dentro de las instalaciones del campus de la Universidad del Valle. Este fue considerado apropiado por su sistema estructural, localización, tamaño, viabilidad de ser inspeccionado a partir de los dos métodos, y por presentar daños estructurales considerables. El detalle de la escogencia de este puente se encuentra en el ítem 7.3 de la metodología de la investigación.

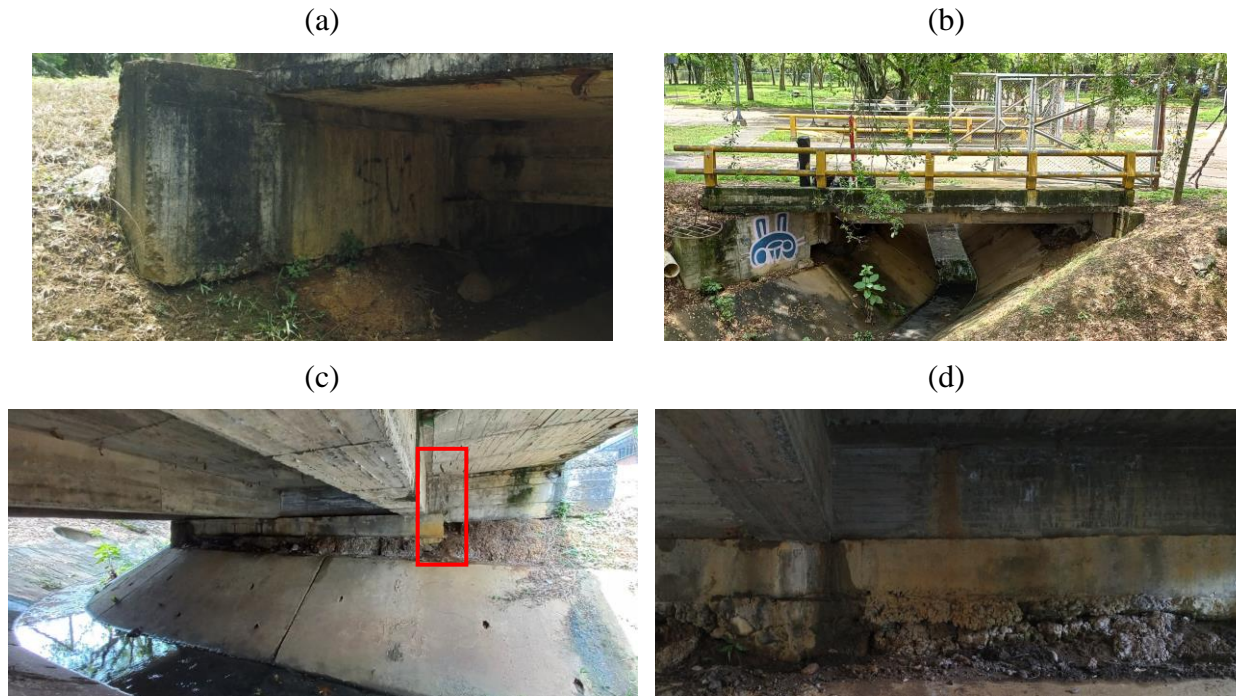
4.1.2. Inspección visual tradicional

Durante la ejecución de esta inspección se recopiló toda la información requerida para examinar y determinar el estado estructural del puente piloto a partir del procedimiento establecido según INVIAS & Universidad Nacional (2006) y registrado de acuerdo con INVIAS & DCD (1999). Los resultados obtenidos de esta inspección pueden consultarse con más detalle en ANEXO 1.

Dentro de la información obtenida, se encuentran los registros fotográficos y las mediciones de los daños presentes en el puente. De los daños observados, se encontraron: la contaminación

del concreto, humedad, fisuras, eflorescencia, desgaste del concreto, segregación, exposición del acero de refuerzo, socavación, infiltración, fisura por volcamiento, delaminación de la pintura y corrosión en las barandas metálicas. En la Figura 46 se presentan cuatro de las patologías mencionadas.

Figura 46 Patologías evidenciadas durante inspección visual tradicional. (a) Segregación y Socavación Local (b) Eflorescencias (c) Fisura por Volcamiento (d) Infiltración



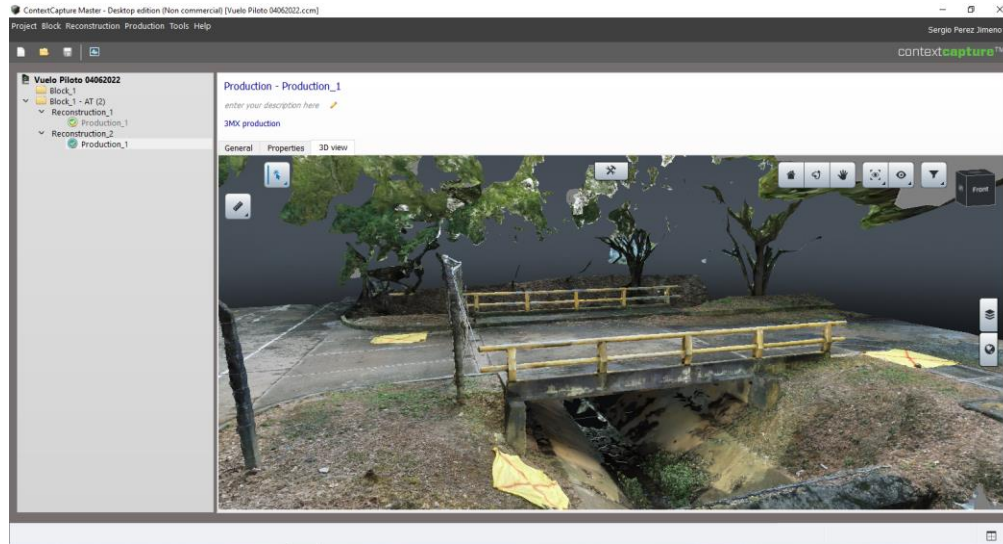
El componente que presenta mayor cantidad de daños son los estribos. Siendo el localizado en el K0+005 quien posee los de mayor gravedad (p. ej. socavación y fisura por volcamiento). Afectaciones que pueden ocasionar una disminución en la resistencia y estabilidad del puente. Por lo que, se sugiere se realice una pronta reparación e inspección más profunda para así dictaminar, si es necesario, un reforzamiento estructural.

4.1.3. Inspección visual empleando VANT

Teniendo como base las fotografías obtenidas del puente por medio del VANT durante la ejecución de la fase número tres del capítulo de metodología y la representación en tres dimensiones del puente, ver la Figura 47, se inició la evaluación detallada de cada uno de sus componentes. Permitiendo identificar los deterioros y daños presentes, así como sus localizaciones

y magnitudes. En Anexo 2, se presenta la evaluación del puente detalla según INVIAS & DCD (1999).

Figura 47 Modelo digital 3D, ContextCapture.



Es esencial destacar que el modelo digital 3D desempeña una función innovadora y versátil a las necesidades propias de una inspección visual. Ya que además de permitir visualizar el puente y sus componentes, admite localizar las patologías desarrolladas, identificar a través de un comando qué fotografías contienen esos daños y, por último, cuantificarlos. Facilitando el diligenciamiento de los formatos de inspección del SIPUCOL.

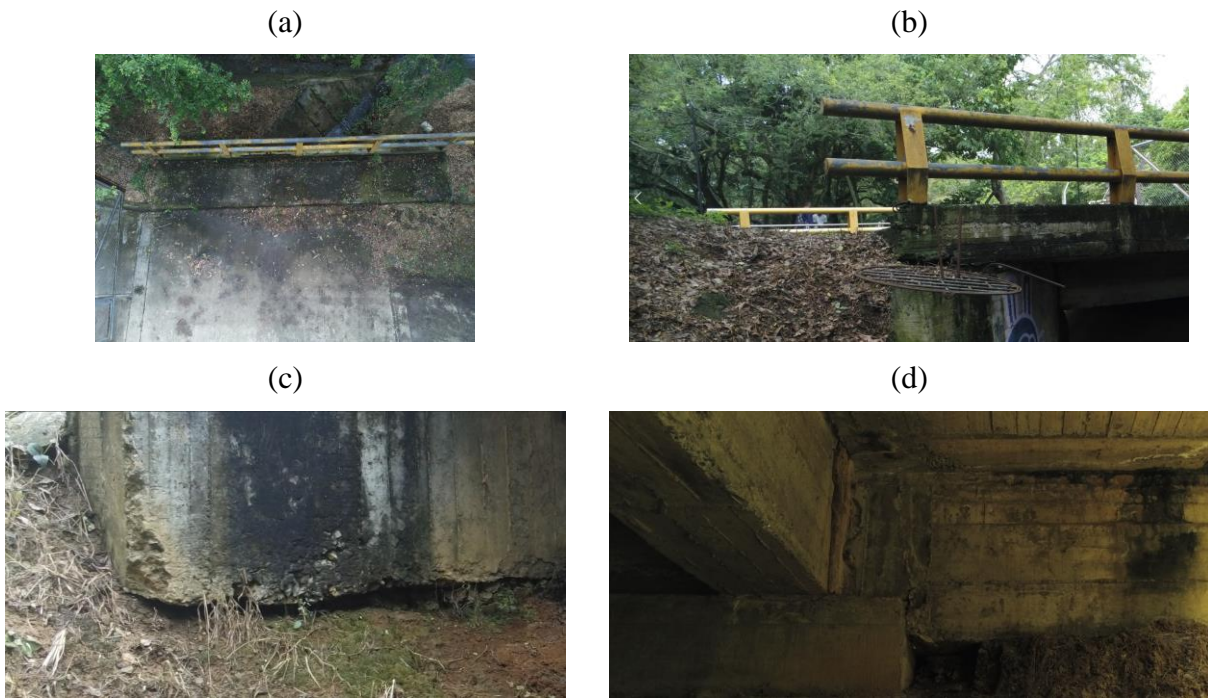
Durante el análisis del modelo digital 3D, se identificaron la mayoría de daños encontrados durante la inspección visual tradicional. Se menciona “la mayoría” debido a que se evidenció que el modelo digital 3D presenta información incompleta en la parte inferior del puente, exactamente en su parte inferior-central. Este suceso ocurrió porque no se obtuvo traslapes satisfactorios entre las fotografías tomadas, debido a la alta complejidad que surgió al maniobrar el vehículo debajo del puente y también por la constante pérdida de conexión entre los satélites y el VANT, cuando este último se encontraba volando debajo del puente. La pérdida de señal hace que el VANT capture fotografías con coordenadas totalmente diferentes a las reales.

A pesar de la no composición total del modelo digital 3D del puente, esto únicamente afectó su visualización. Sin embargo, para fines de inspección, las fotografías capturadas en esta zona son de alta calidad y por lo tanto son adecuadas para identificar, analizar y medir los daños

presentes. Lo que permitió evaluar todos los componentes del puente, incluyendo la parte inferior de la losa.

Evaluación que, sin duda, por la mayor cercanía de las fotografías tomadas por el VANT y debido a las comodidades que se presentan en una oficina de trabajo, pudo ser más detallada. Permitiendo identificar y cuantificar todos los daños presentes en el puente. En la Figura 48 se presentan algunos daños capturados por el VANT.





Figura 48 Patologías evidenciadas durante inspección visual empleando VANT. (a) Contaminación del Concreto (b) Exposición del acero de refuerzo (c) Segregación (d) Fisura por Volcamiento



4.1.4. Comparación de Metodologías

Aplicadas las inspecciones visuales tradicional y empleando VANT, sobre el puente piloto de forma completa y exitosa, se logra realizar una comparación entre estas. Permitiendo explorar sus ventajas y desventajas. En la Tabla 18 se describe la comparación entre estas dos inspecciones a partir de unas variables definidas por el autor de esta investigación, las cuales considera relevantes para este trabajo.

Tabla 18 Comparación entre inspección visual tradicional e inspección empleando VANT.

VARIABLE	INSPECCIÓN VISUAL TRADICIONAL	INSPECCIÓN EMPLEANDO VANT
• Tiempo de ejecución en campo.	240 minutos	60 minutos
• Tiempo de ejecución en oficina.	3 días	4 días
• Instrumentos utilizados.	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara fotográfica • Flexómetro • Linterna • Formato de registro • Computador 	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículo Aéreo No Tripulado. • GPS FOIF A90 • Computador
• Cantidad de Fotografías Tomadas.	60	618
• Porcentaje de componentes del puente inspeccionados.	100 %	100 %
• Se puede generar Modelo digital 3D del puente.	No	Si
• Enfoque general del puente y sus alrededores	Bajo 	Alto 
• Requerimiento de escalera, andamios, lancha o plataforma móvil.	No	No
• Riesgo en la seguridad del inspector en campo.	Alto 	Muy bajo 
• Pérdida económica por extravío o daños de los instrumentos utilizados durante la inspección.	Medio \$ 1'500.000.00	Alto \$ 70'000.000.00

4.1.5. Calificación numérica y condición de estado

En total el puente cuenta con 8 componentes, superficie del puente, andenes y bordillos, barandas, aletas y estribos, losa y vigas. Referente a los estribos, como se mencionó en los ítems 4.1.2 y 4.1.3 del puente piloto, son los elementos que presentan mayor severidad y cantidad de daños; y por lo tanto mayor calificación cuantitativa, la cual es de 4, lo que indica que estos elementos presentan daños graves y requieren ser reparados inmediatamente. No obstante, el puente en general presenta un estado estructural bueno, ya que la calificación numérica promediada es de 2,50.

La condición del estado de la estructura del puente se determina a través de la correlación numérica que se presenta en E. Muñoz et al. (2005) mediante la selección del mayor resultado obtenido de la suma y ponderación conforme al cotejo de una calificación numérica y su equivalencia en una calificación descriptiva.

En la Tabla 19 se presentan las calificaciones numéricas de los componentes del puente. Los cuales el 62,5% se encuentran en una condición de estado buena, el 25% en regular y 12,5% en malo.

Tabla 19 Calificación numérica y condición de estado de los componentes del Puente.

Componentes del Puente	Calificación Numérica del Componente	Condición de Estado por Componente Según Calificación Numérica
1 Superficie del puente	2	Bueno
2 Andenes	2	Bueno
3 Bordillos	3	Regular
4 Barandas	2	Bueno
5 Aleta	3	Regular
6 Estribos	4	Malo
7 Losa	2	Bueno
8 Vigas	2	Bueno

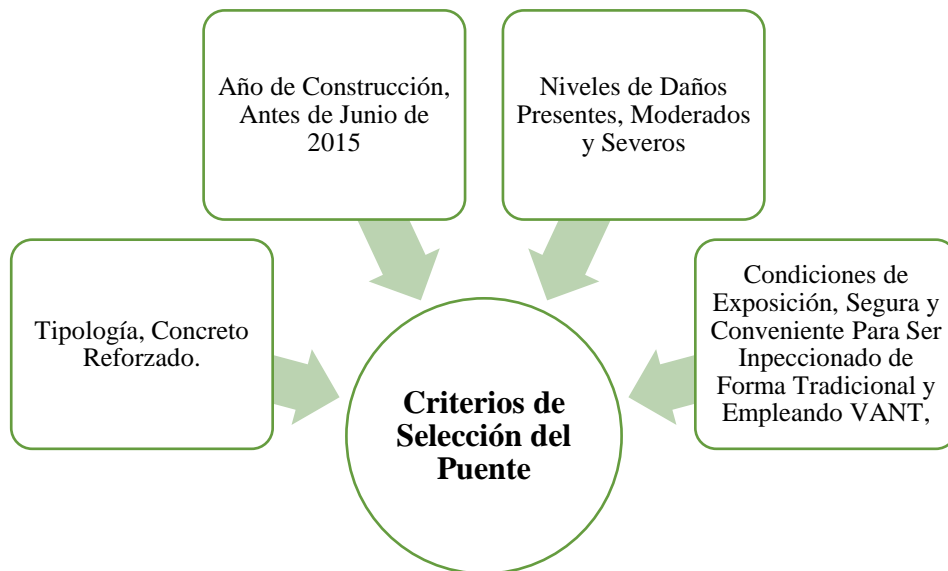
4.2. Puente estudio de caso

Para esta sección se obtuvieron como resultados los criterios técnicos para la selección del puente, su escogencia, las patologías evidenciadas durante las ejecuciones de las inspecciones visuales tradicional y usando VANT, así como un cuadro comparativo entre estas metodologías. La clasificación cuantitativa y cualitativa del estado estructural del puente. Y finalmente, la evaluación estructural del mismo. Todo lo anterior se detalla a continuación.

4.2.1. Criterios técnicos para la selección del puente

Los criterios técnicos fueron definidos de tal forma que se pudiera evidenciar y seleccionar el puente más apto para esta investigación. Fueron establecidos en base al periodo de construcción del puente, su tipología y los daños estructurales presentes. En si los criterios fijados se presentan en la Figura 49

Figura 49 Criterios de Selección Puente Caso de Estudio.



A partir de los criterios técnicos definidos, se prosiguió con escoger el puente identificado como Puente Río Claro, ya que es puente que presenta un sistema estructural en concreto reforzado y manifiesta considerables daños patológicos. Adicionalmente, su localización permite que se efectúen las metodologías de inspecciones visuales de maneras apropiadas y seguras. En el ítem 7.1 de la metodología de la investigación se describe de forma detalla el procedimiento de la selección de este puente.

4.2.2. Inspección visual tradicional

Realizada la inspección visual tradicional y recopilada toda la información relacionada a esta, se presenta a continuación el inventario de los daños originados en cada uno de los componentes del puente.

Los resultados se presentan de tal forma que logran apreciar cuales son los daños y sus magnitudes encontrados en cada componente del puente. Permitiendo, además, distinguir la calificación numérica de estos de acuerdo con INVIAS & DCD (1999). Las unidades de dimensionamiento utilizadas para medir los daños se tomaron según INVIAS & Universidad Nacional (2006). Los resultados obtenidos de esta inspección pueden consultarse con más detalle en ANEXO 3.

En la Tabla 20 se presentan los resultados resumidos obtenidos durante la inspección tradicional. De esta forma, podemos notar que hay daños que no se lograron cuantificar debido a la imposibilidad por parte del inspector de llegar a estas zonas, debido a la carencia de superficie y equipos tipo plataforma. De igual importancia es de mencionar que hay daños que se repiten en el mismo componente estructural, pero que sólo fue posible cuantificar en aquel donde se tuvo acceso. Un ejemplo de lo expuesto son los muros de enlace, los cuales la mayoría presentan patología similar, sin embargo, sólo se pudo cuantificar el correspondiente al primer muro, teniendo información bastante alejada a la realidad.

Tabla 20 Informe Inspección Visual Tradicional, Puente Río Claro

No	COMPONENTES	DAÑOS	CUANTIFICACIÓN	CALIFICACIÓN
1	Superficie del Puente, Tipo 01 Asfalto	Fisura Transversal	2,45 m	3
2	Superficie del Puente, Tipo 01 Asfalto	Fisura Transversal en Junta de Construcción	13,16 m	3
3	Barandas, Tipo 03 Metálica	Delaminación de Pintura	140 m	2
4	Barandas, Tipo 03 Metálica	Golpe por Impacto Vehicular	19,8 m	4
5	Aletas y Estribos, Tipo 03 Concreto Reforzado	Contaminación del concreto	63,73 m ²	2
6	Aletas y Estribos, Tipo 03 Concreto Reforzado	Construcción inadecuada de junta fría	7 m	4

No	COMPONENTES	DAÑOS	CUANTIFICACIÓN	CALIFICACIÓN
7	Aleta y Estribos, Tipo 03 Concreto Reforzado	Grieta por movimiento lateral	9,58 m	4
8	Tajamar	Atascamiento de troncos y maleza	---	---
9	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Exposición del acero de refuerzo	0,82 m ²	4
10	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Eflorescencia	2,98 m ²	3
11	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Recubrimiento inadecuado	---	---
12	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Segregación	0,60 m ²	2
13	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Contaminación del concreto	8,54 m ²	2
14	Arco en concreto, Muro Concreto Reforzado	Fisura por cortante	1,20 m	4
15	Arco en concreto, Muro Concreto Reforzado	Construcción inadecuada de junta fría	9,04 m	4
16	Arco en concreto, Muro Concreto Reforzado	Segregación en muros	---	---
17	Arco en concreto, Losa Concreto Reforzado	Segregación en losa	0,34 m ²	3
18	Arco en concreto, Losa Concreto Reforzado	Eflorescencia	---	---

Por otra parte, en las Figuras 50 y 51, se relacionan todos los daños evidenciados sobre esquemas en planta y corte del Puente Río Claro, logrando identificar la localización de cada uno de estos. Cada fotografía usada presenta un número, el cual esta enlazado con la enumeración empleada en la Tabla 20 Informe Inspección Visual Tradicional, Puente Río Claro buscando obtener la mejor comprensión de estos productos.

Figura 50 Relación de daños sobre puente Rio Claro, Vista en Planta, Inspección Tradicional

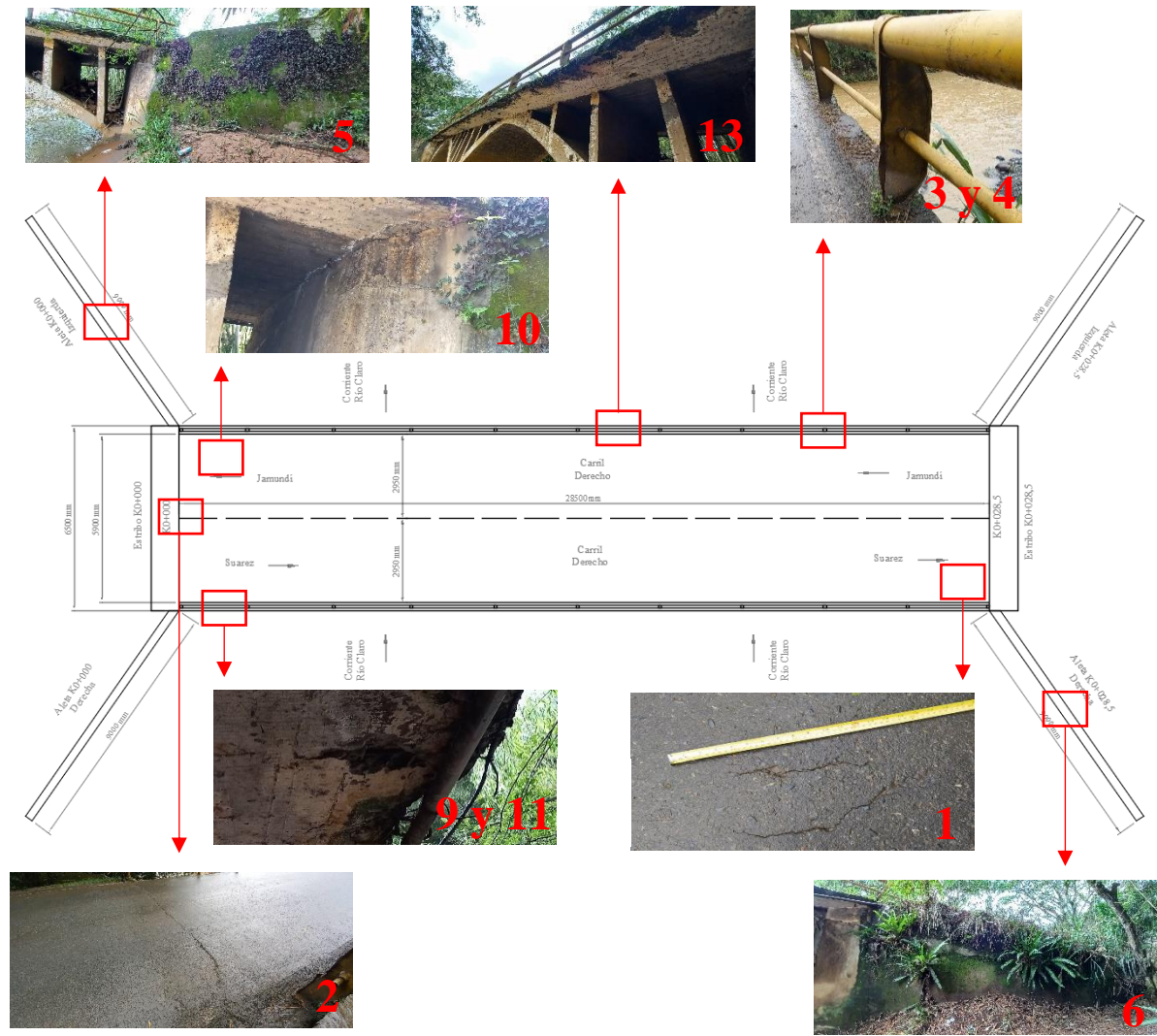
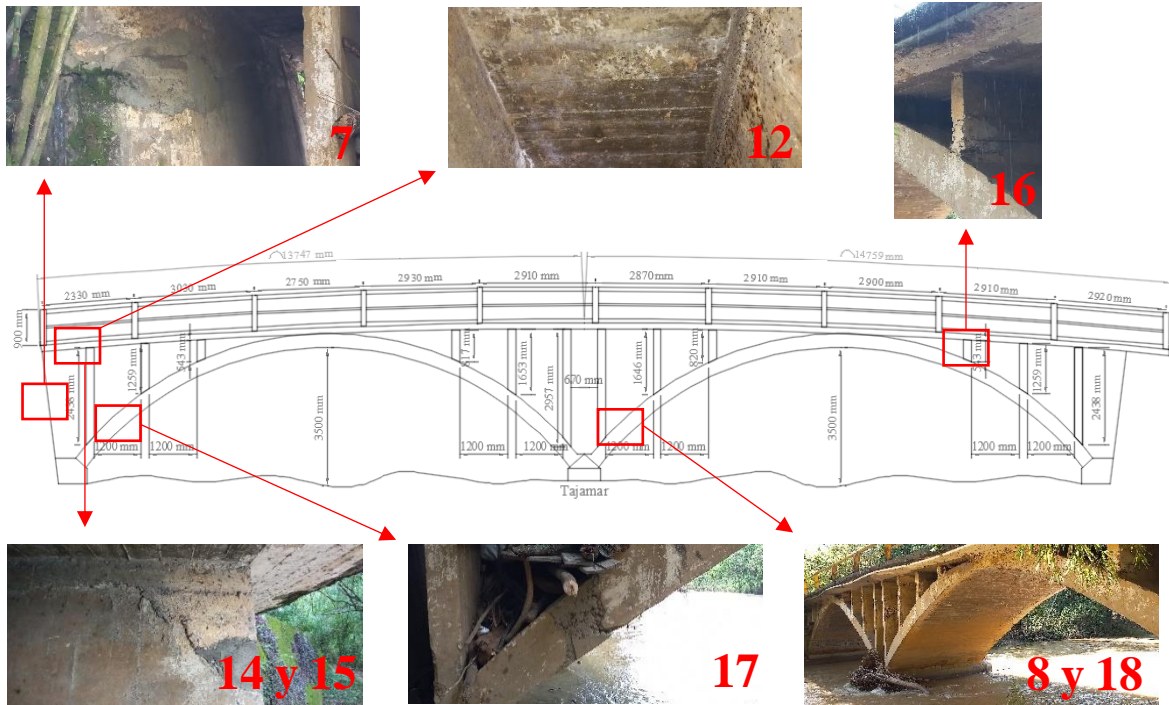


Figura 51 Relación de daños sobre Puesto Río Claro, Aguas Arriba, Inspección Tradicional



4.2.3. Inspección Visual Empleando VANT

Referente a los resultados alcanzados durante esta inspección, se puede manifestar que fueron más completos que los relacionados con la inspección tradicional. Lo anterior debido a la virtud que tiene el VANT de capturar zonas inaccesibles por el inspector. Además, por la gran utilidad del modelado 3D elaborado por el procesamiento de las imágenes capturadas por el VANT, como se puede observar en Figura 52, del cual se puede cuantificar los daños. Los resultados obtenidos de esta inspección pueden consultarse con más detalle en ANEXO 4.

Figura 52 Modelo digital 3D Puesto Río Claro, Software ContextCapture. (a) Vista Lateral Aguas Arriba (b) Vista Lateral Aguas Abajo (c) Vista en Planta (d) Vista Inferior





En la Tabla 21 se presenta el informe de los resultados obtenidos. Se puede notar de esta, que todos los daños han sido cuantificados generando una información más exacta a la realidad. También se puede observar que se incluyeron daños no percatados durante la inspección tradicional (p. ej. Fisura longitudinal sobre superficie del puente).

Tabla 21 Informe Inspección Visual Empleando VANT, Puente Río Claro

No	COMPONENTES	DAÑOS	CUANTIFICACIÓN	CALIFICACIÓN
1	Superficie del Puente, Tipo 01 Asfalto	Fisura Transversal	2,27 m	3
2	Superficie del Puente, Tipo 01 Asfalto	Fisura Longitudinal	0,88 m	3
3	Superficie del Puente, Tipo 01 Asfalto	Fisura Transversal en Junta de Construcción	12,56 m	3
4	Barandas, Tipo 03 Metálica	Delaminación de Pintura	118 m	2
5	Barandas, Tipo 03 Metálica	Golpe por Impacto Vehicular	6,84 m	4
6	Aletas y Estribos, Tipo 03 Concreto Reforzado	Contaminación del concreto	68 m ²	2
7	Aletas y Estribos, Tipo 03 Concreto Reforzado	Construcción inadecuada de junta fría	13,48 m	4
8	Aleta y Estribos, Tipo 03 Concreto Reforzado	Grieta por movimiento lateral	6.68 m	4
9	Tajamar	Atascamiento de troncos y maleza	3 m ²	3
10	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Exposición del acero de refuerzo	1,45 m ²	4
11	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Eflorescencia	7,98 m ²	3
12	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Recubrimiento inadecuado	1,20 m ²	3
13	Losa, Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado	Segregación	0,60 m ²	2

No	COMPONENTES		DAÑOS	CUANTIFICACIÓN	CALIFICACIÓN
14	Losa, Tipo 04 Concreto Reforzado	Maciza	Contaminación del concreto	8,53 m ²	2
15	Arco en concreto, Concreto Reforzado	Muro	Fisura por cortante	2,66 m	4
16	Arco en concreto, Concreto Reforzado	Muro	Construcción inadecuada de junta fría	57,85 m	4
17	Arco en concreto, Concreto Reforzado	Muro	Segregación en muros	2,22 m ²	4
18	Arco en concreto, Concreto Reforzado	Losa	Segregación en losa	0,24 m ²	3
19	Arco en concreto, Concreto Reforzado	Losa	Eflorescencia	50 m ²	3

En las Figuras 53 y 54, se relacionan todos los daños evidenciados sobre esquemas en planta y corte del Puente Río Claro, logrando identificar la localización de cada uno de estos. Cada fotografía usada presenta un número, el cual esta enlazado con la enumeración empleada en la Tabla 21 buscando obtener la mejor comprensión de estos productos.

Figura 53 Relación de daños sobre puente Rio Claro, Vista en Planta, Inspección Empleando VANT.

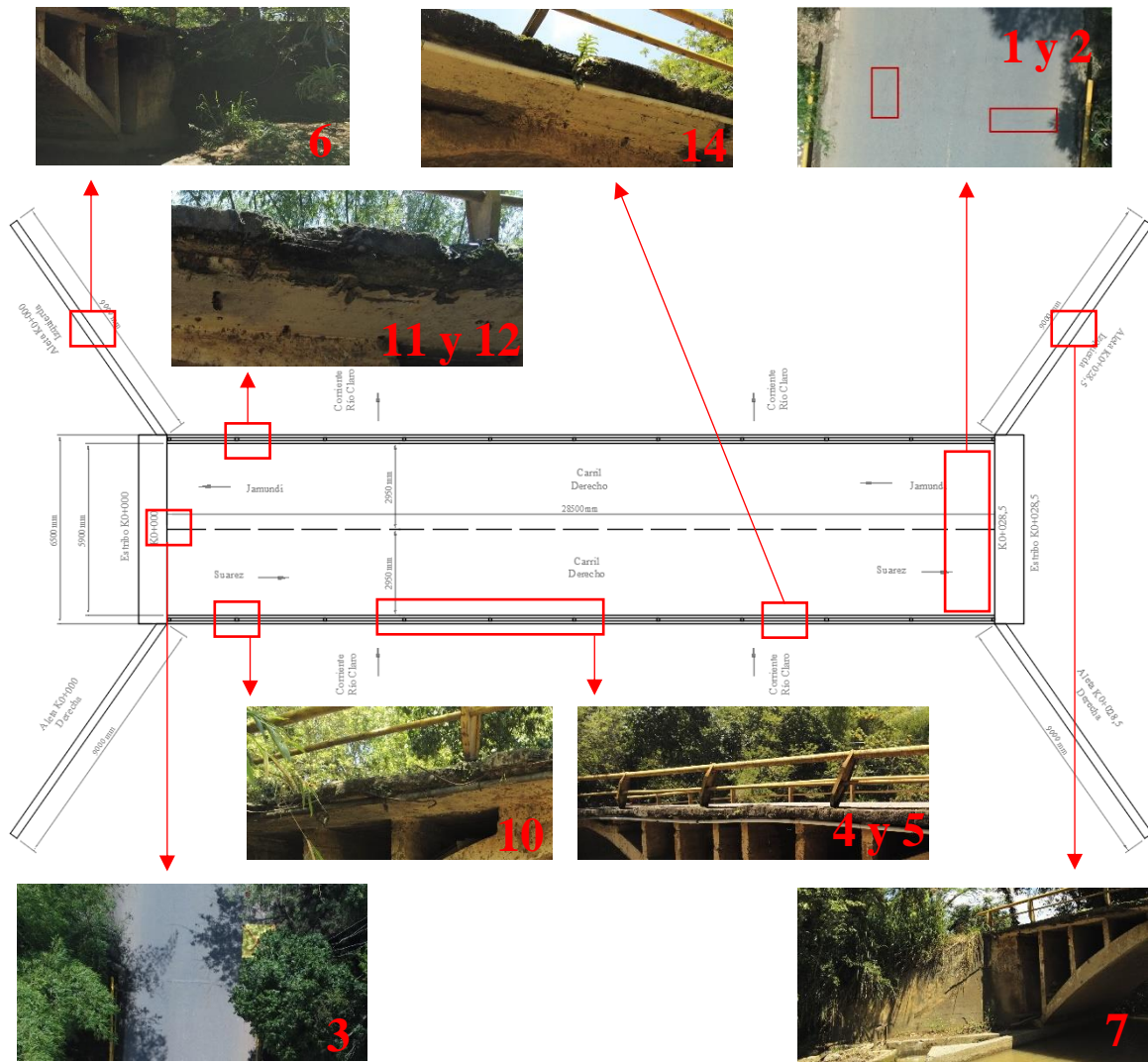
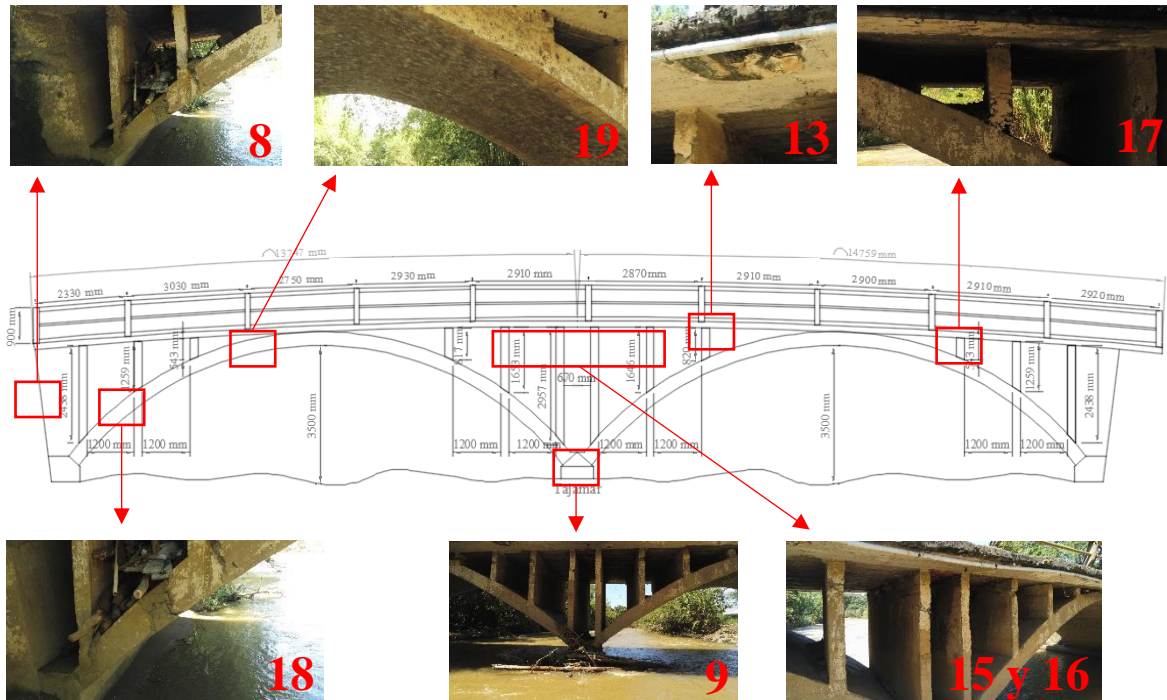


Figura 54 Relación de daños sobre Puesto Río Claro, Aguas Arriba, Inspección Empleando VANT.


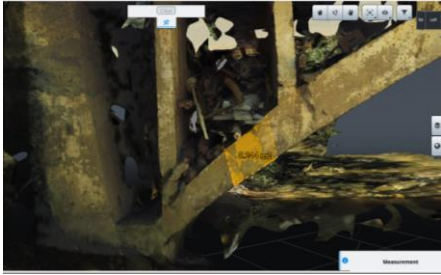







4.2.4. Comparación de las Metodologías

Aplicadas las inspecciones visuales tradicional y empleando VANT, sobre el Puesto Río Claro de forma completa y exitosa, se logra realizar una comparación entre estas técnicas. Permitiendo explorar sus ventajas y desventajas. En la Tabla 22, se describe la comparación entre estas dos inspecciones a partir de unas variables definidas por el autor de esta investigación, las cuales considera relevantes para este trabajo.

Tabla 22 Comparación entre inspección visual tradicional e inspección empleando VANT. Puesto Río Claro.

VARIABLE	INSPECCIÓN VISUAL TRADICIONAL	INSPECCIÓN EMPLEANDO VANT
• Tiempo de ejecución en campo.	240 minutos	60 minutos
• Tiempo de ejecución en oficina.	3 días	4 días
• Instrumentos utilizados.	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara fotográfica • Flexómetro • Linterna • Formato de registro • Computador 	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículo Aéreo No Tripulado. • GPS FOIF A90 • Computador

VARIABLE	INSPECCIÓN VISUAL TRADICIONAL	INSPECCIÓN EMPLEANDO VANT
<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de Fotografías Tomadas. 	237	665
<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de componentes del puente inspeccionados. 	80 %	100 %
<ul style="list-style-type: none"> • Precisión en la cuantificación de daños en elementos de difícil acceso 	<p>Media P. ej. Segregación en arco área 0.34m²</p> 	<p>Alta P. ej. Segregación en arco área 0.244m²</p> 
<ul style="list-style-type: none"> • Precisión en la cuantificación de daños en elementos de nulo acceso 	No es posible cuantificarlos	<p>Alta P.ej. Segregación en muros de enlace área: 1.0 m²</p> 
<ul style="list-style-type: none"> • Permite un adecuado diagnostico estructural del estado del puente y sus componentes. 	No	Si
<ul style="list-style-type: none"> • Se puede generar Modelo digital 3D del puente. 	No	Si
<ul style="list-style-type: none"> • Enfoque general del puente y sus alrededores 	<p>Bajo</p> 	<p>Alto</p> 

VARIABLE	INSPECCIÓN VISUAL TRADICIONAL	INSPECCIÓN EMPLEANDO VANT
<ul style="list-style-type: none"> Requerimiento de escalera, andamios, lancha o plataforma móvil. 	Si	No
<ul style="list-style-type: none"> Riesgo en la seguridad del inspector en campo. 	Alto 	Muy bajo 
<ul style="list-style-type: none"> Pérdida económica por extravío o daños de los instrumentos utilizados durante la inspección. 	Medio \$ 1'500.000.00	Alto \$ 70'000.000.00

4.2.5. Calificación numérica y condición de estado

En total el puente cuenta con 8 componentes, barandas, superficie del puente, tablero, muro enlace tablero-arco, arco, tajamar, estribos, aletas. Los estribos, muros enlace tablero-arco y las aletas, como se mencionó anteriormente, son los elementos que presentan mayor severidad y cantidad de daños; y por lo tanto mayor calificación cuantitativa, la cual es de 4, lo que indica que estos elementos presentan daños graves y requieren ser reparados inmediatamente. En la Tabla 23 se presentan las calificaciones numéricas y las condiciones de estado de los componentes del puente según la severidad de sus daños.

Tabla 23 Calificación numérica y condición de estado de los componentes del Puente Río Claro.

Componentes del Puente	Calificación Numérica del Componente	Condición de Estado por Componente Según Calificación Numérica
1 Superficie del puente	3	Regular
2 Barandas	4	Malo
3 Aletas	3	Regular
4 Estribos	4	Malo
5 Tajamar	3	Regular
6 Losa, tablero	4	Malo
7 Muros, enlace tablero-arco	4	Malo
8 Losa, arco	2	Bueno

Aplicando la correlación de estado por elemento y calificación numérica, presentada en E. Muñoz et al. (2005), se obtiene que el 12,5% de los componentes se encuentra en una condición de estado buena, el 37,5% en regular y el 50% restante en malo.

Finalmente, para obtener el estado estructural del puente, primero se sumaron las calificaciones numéricas de cada componente y el resultado se dividió entre el número de componentes, obteniendo una calificación numérica general de 3,38. Luego se correlacionó este valor con la condición de estado y se determinó que el estado estructural general del puente es irregular. Esta metodología de evaluación es empleada de acuerdo con E. Muñoz et al. (2005).

4.2.6. Evaluación estructural

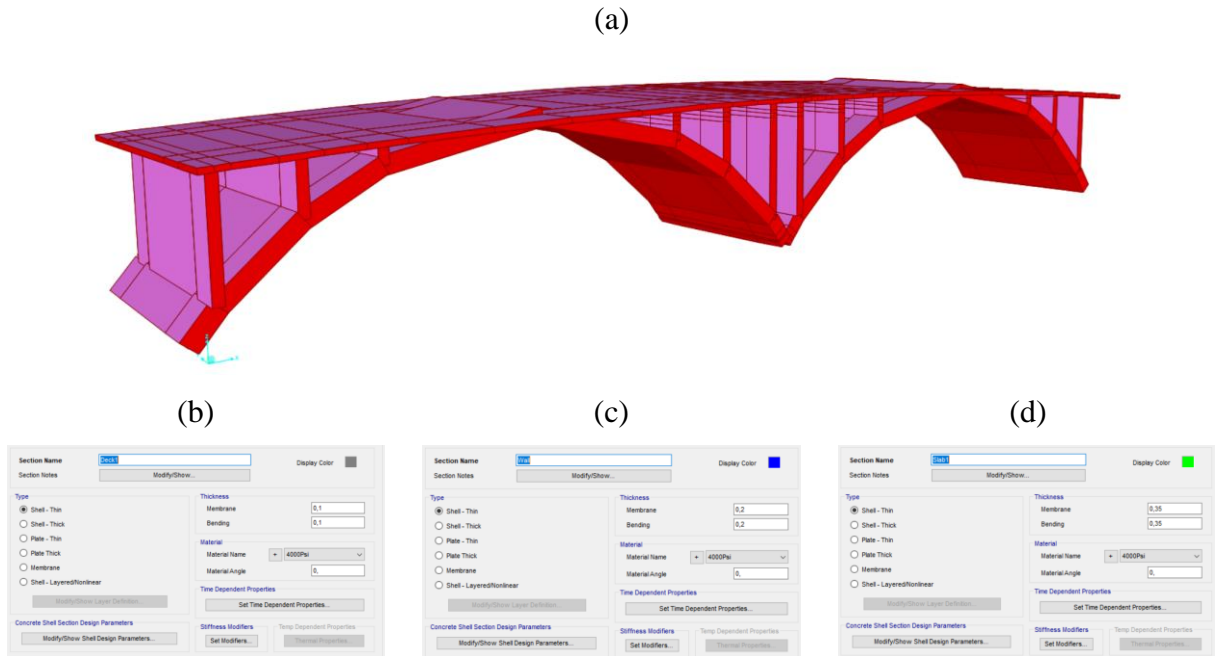
Para un dictamen inicial y trascendental del estado estructural de un puente, es conveniente estimar la capacidad de carga de este. Esencialmente si los componentes presentan daños patológicos significativos.

Es por lo anterior que se ha desarrollado un modelo estructural del puente con las condiciones actuales de sus componentes y las solicitaciones de cargas exigidas según AIS (2014), para el análisis del mismo bajo la alusión de su deformada y resistencia a las cargas internas tales como la fuerza de cortante y el momento flexionante.

El modelo estructural se desarrolló en el *software CSiBridge v24.0.0*, el cual es un software independiente que integra las capacidades de modelado, análisis y dimensionamiento de estructuras de puentes en un único modelo (CSi, 2023). Además, es un programa de elementos finitos para el análisis y diseño de puentes en concreto reforzado (Jurado, 2017).

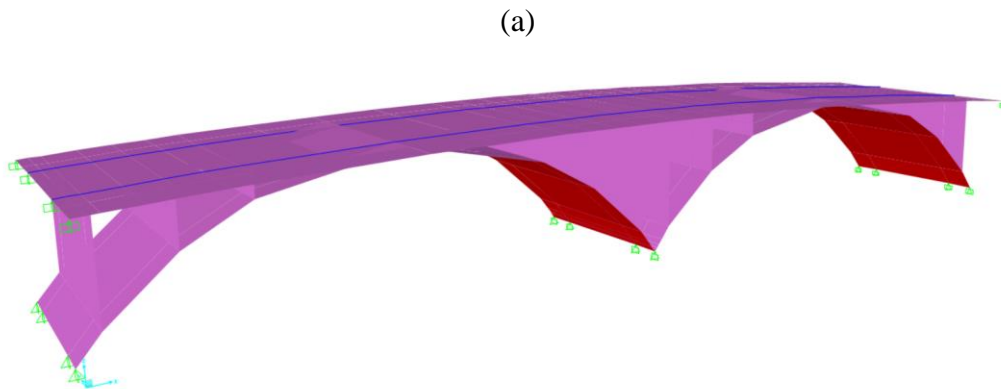
Referente al modelo estructural, su geometría se definió a partir del modelamiento 3D obtenido del procesamiento de imágenes capturadas por el VANT y sus componentes fueron asignados mediante la opción tipo Shell, como se puede observar en Figura 55. Este último, con el objetivo de poder observar y analizar cada componente mediante el análisis por elementos finitos, para predecir su comportamiento bajo las solicitaciones de carga de forma exacta.

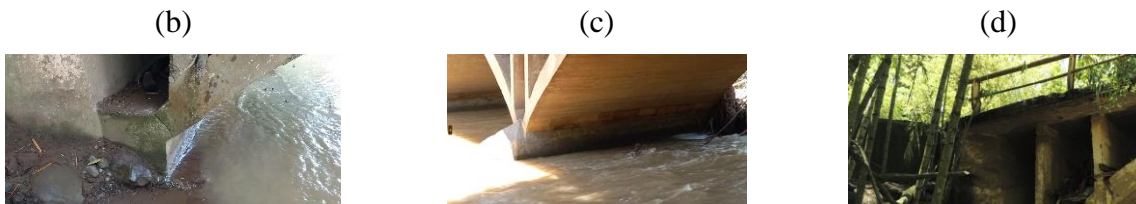
Figura 55 Modelo Estructural. (a) Esquema 3D del modelo (b) Asignación geometría del tablero (c) Asignación geometría muro enlace (d) Asignación geometría losa arco.



Con relación a los tipos de apoyos empleados en la modelación, estos se establecieron de dos tipos. Unos de tipo articulado, los cuales representan la conexión que existe entre la losa inferior arco y los estribos. Y, el otro es de tipo empotrado, los cuales representan la conexión que existe entre la losa superior tablero y los estribos. Ambas asignaciones de apoyos y su justificación se pueden observar en Figura 56.

Figura 56 Tipos de apoyos modelo estructural. (a) Asignación de apoyos al modelo. (b) Apoyo articulado conexión losa inferior arco y estribos. (c) Apoyo articulado conexión losa inferior arco y tamar. (d) Apoyo empotrado conexión losa superior tablero y estribos





Una vez estructurado el modelo, se asignan las propiedades mecánicas referentes a la resistencia a la compresión del concreto y al módulo de elasticidad en los diferentes componentes. La resistencia a la compresión del concreto se determinó a través del ensayo no destructivo martillo de impacto (Esclerometría) de acuerdo con lo estipulado en ACI Committee 228 (2003).

El equipo empleado para este ensayo fue el esclerómetro de marca *CONTROLS 58-C01801/N*.

El ensayo en campo consistió en obtener diez (10) números de rebotes en el componente estructural muro de enlace losa arco-tablero, según lo descrito en ASTM C805/C805M (2013). También se percató que ninguna lectura difiriera en mas de seis unidades del promedio, dando así el cumplimiento con la norma. Se indica que, para la toma de las diez lecturas el esclerómetro se utilizó con una posición de 0° con respecto al eje horizontal.

Una vez obtenidas las lecturas, se continuó con determinar la resistencia aproximada a la compresión del concreto empleando el método Danish (Bickley, 1982). Este método ha sido desarrollado para el análisis de resultados extraídos de ensayos en campo. Donde la resistencia obtenida del ensayo en campo son convertidas a una resistencia a la compresión equivalente por medio de una relación de resistencias (Ecuación de correlación) determinada por un análisis regresivo de datos generados previamente para el concreto que se utiliza en el sitio de construcción (ACI Committee 228., 2003).

La ecuación de correlación está dada por:

$$Y_{10} = Y - K S_y \quad \text{EC -3}$$

Donde

- Y_{10} = Resistencia a la compresión en el décimo percentil inferior
- Y = Resistencia a la compresión promedio obtenida del ensayo en campo
- K = Factor de tolerancia unilateral, ver la Tabla 25
- S_y = Desviación estándar

Para obtener la resistencia a la compresión promedio mediante el ensayo por esclerometría (Y), se utilizó el diagrama que relación el número de rebote, la orientación de uso del esclerómetro y la resistencia a la compresión aproximada. Este diagrama se obtiene del manual de instrucciones del esclerómetro *CONTROLS* y se puede observar en Figura 57. En cuanto a los números de rebote obtenidos en campo, ver la Figura 58, estos son presentados en la

Tabla 24 junto con su respectiva resistencia a la compresión determinada a través del diagrama. Adicionalmente de la misma tabla se calcula el promedio de la resistencia a la compresión (Y), el cual es de 34,8; y la desviación estándar, S_y , la cual es de 3,68 MPa.

Figura 57 Diagrama que relaciona el número de rebote, posición del esclerómetro y resistencia a la compresión aproximada. Manual de instrucciones esclerómetro *CONTROLS*.

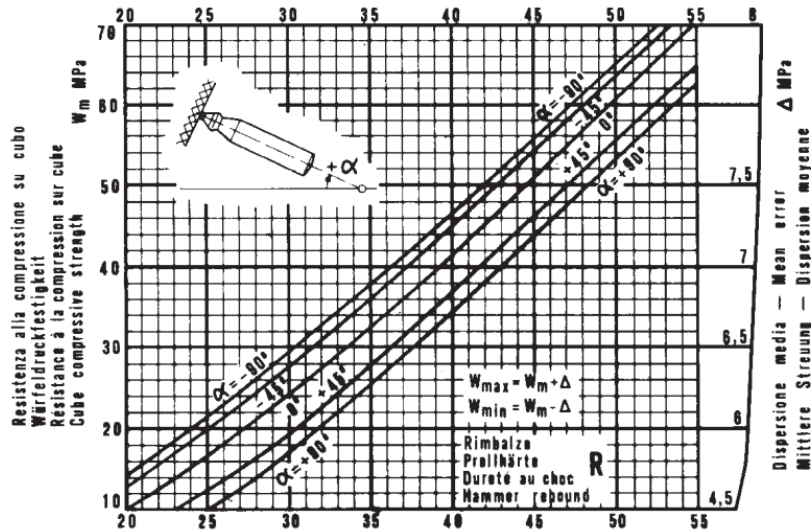


Figura 58 Ensayo en campo, esclerometría. (a) Posición esclerómetro. (b) Número de rebote



(b)



Tabla 24 Datos obtenidos del ensayo en campo por esclerometría.

Número de Ensayo	Número de Rebote	Resistencia a la compresión aproximada (MPa)
1	38	38
2	38	38
3	34	30
4	36	34
5	38	38
6	34	30
7	38	38
8	34	30
9	36	34
10	38	38

El factor de tolerancia unilateral, K , quien varia con el número de ensayo realizado y el nivel de confianza deseado. Se obtiene de la Tabla 25, la cual es presentada en (Natrella, 1963). En esta investigación se utiliza un numero de ensayo igual a 10 y un nivel de confianza del 75%, debido a que son los recomendados por ACI Committee 228 (2003). El valor de K el cual se utiliza es 1,671.

Tabla 25 Factor de tolerancia unilateral para un nivel defectuoso del 10%

Número de ensayos, n	Nivel de confianza		
	75%	90%	95%
Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
3	2,501	4,258	6,158
4	2,134	3,187	4,163
5	1,961	2,742	3,407
6	1,860	2,494	3,006
7	1,791	2,333	2,755
8	1,740	2,219	2,582
9	1,702	2,133	2,454
10	1,671	2,065	2,355
11	1,646	2,012	2,275
12	1,624	1,966	2,210

Número de ensayos, n	Nivel de confianza		
	75%	90%	95%
Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
13	1,606	1,928	2,155
14	1,591	1,895	2,108
15	1,577	1,866	2,068
20	1,528	1,765	1,926
25	1,496	1,702	1,838
30	1,475	1,657	1,778
35	1,458	1,623	1,732
40	1,445	1,598	1,697
50	1,426	1,560	1,646

Al obtenerse todos los parámetros, se prosiguió con calcular las propiedades mecánicas del concreto, como se puede observar en Tabla 26. Estos parámetros se asignaron a la modelación estructural.

Tabla 26 Propiedades mecánicas concreto puente caso de estudio

Propiedades mecánicas	Valores	Ecuaciones usadas
Resistencia a la compresión del concreto aproximado, f'_c	28 MPa	EC-3
Módulo de Elasticidad del concreto	20.637 MPa	$3900 * \sqrt{F'_C}$

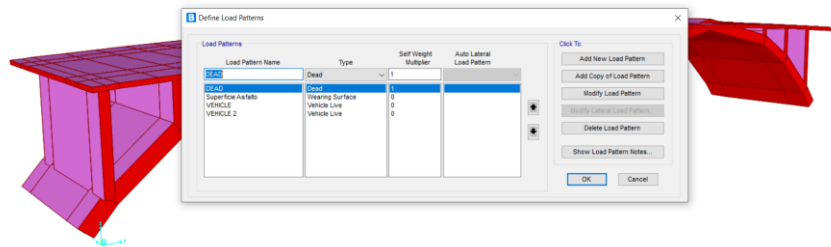
En cuanto a las cargas aplicadas se encuentran:

- Peso propio de los componentes estructurales y de los accesorios no estructurales (DC): Esta carga es determinada directamente por el software teniendo en cuenta las dimensiones de cada componente y la densidad del concreto reforzado el cual es de 24 kN/m³.
- Peso propio carpeta de rodamiento y de las instalaciones (DW): Esta carga es determinada al multiplicar la densidad del material pavimento bituminoso 22,5 kN/m³ por el espesor de la carpeta de rodadura el cual es de 0,07m, dando como resultado una carga de 1,57 kN/m².
- Carga viva vehicular (LL): Esta carga se refiere a un Tándem de diseño el cual consiste en un par de ejes de 125 kN separados 1,20 m entre sí y un espaciamiento transversal de las ruedas de 1,80m.
- Carga de carril de diseño (LL): Consiste en una carga de 10,3kN/m uniformemente distribuida en la dirección longitudinal del puente.

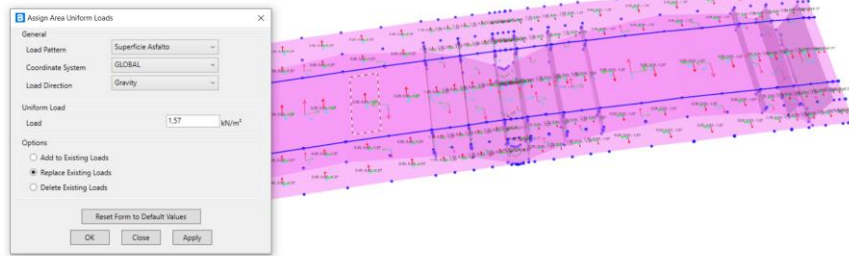
A continuación, en la Figura 59 se presentan las asignaciones de las cargas en el modelo estructural.

Figura 59 Asignación de cargas sobre modelo estructural. (a) Peso propio componentes. (b) Peso propio carpeta de rodamiento. (c) Carga viva vehicular tándem. (d) Carga de carril

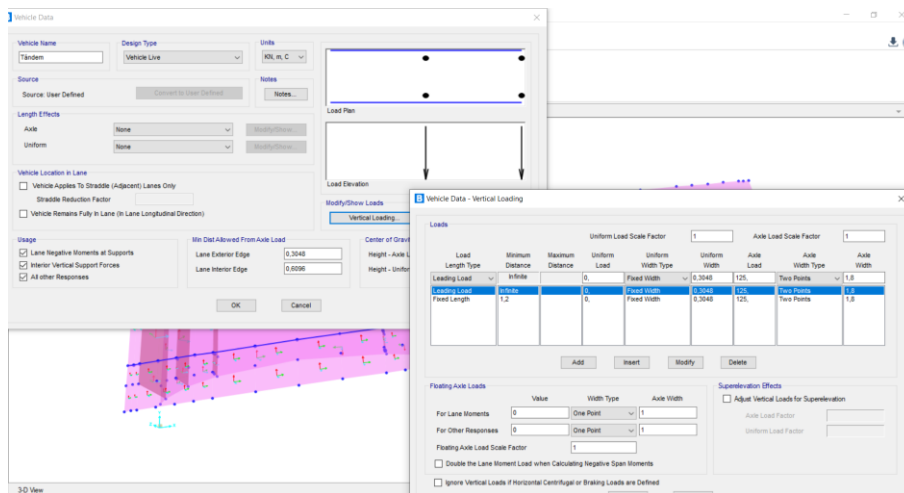
(a)



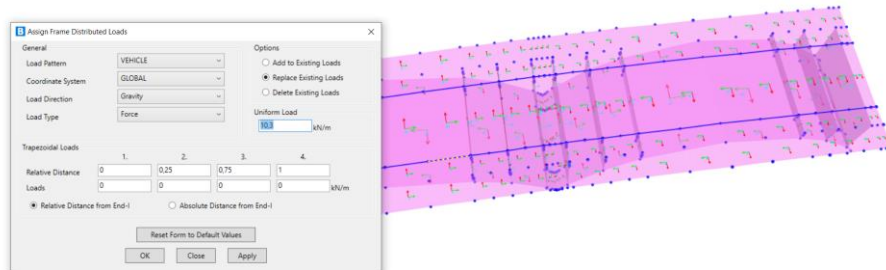
(b)



(c)



(d)



Asignados los parámetros geométricos, propiedades mecánicas y cargas, se analiza la estructura bajo el comportamiento de su deformada y fuerzas internas. La deformación máxima presentada en el puente es de 7,4 mm debido a la carga viva vehicular, ver la Figura 60. A lo que se refiere a las fuerzas internas, como se mencionó en el ítem 7.8 de la metodología de la investigación, únicamente se analizan las fuerzas por cortante presentes en los muros de enlace arco-tablero, exactamente en las zonas donde se presentan daños severos identificados en la etapa de inspección. En estos muros se determinaron las fuerzas por cortante generadas por las diferentes solicitaciones de carga (DC, DW y LL), las cuales son fundamentales para determinar el factor de clasificación. En la Tabla 27 se presentan las máximas fuerzas de cortante interna generadas en los muros de estudio y en la

Figura 61 se muestran su localización.

Figura 60 Deformación máxima del puente debido a carga viva vehicular y de carril

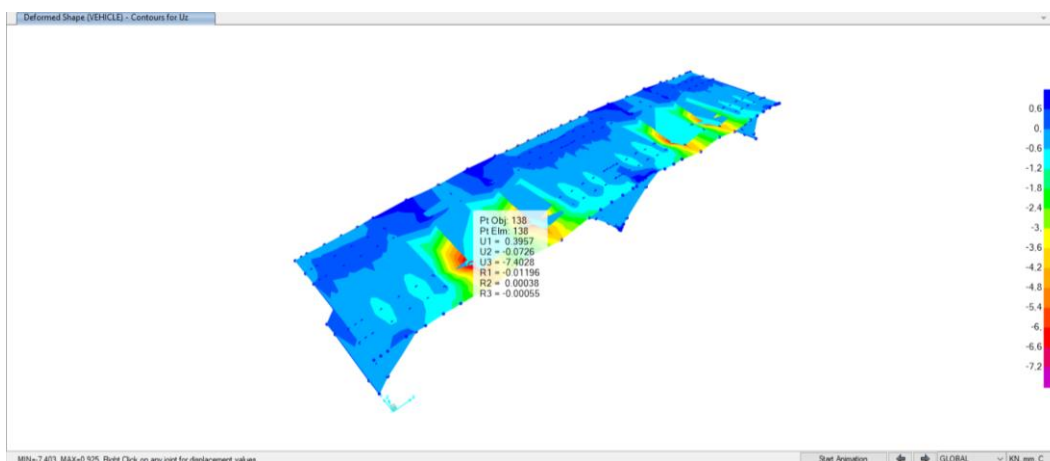
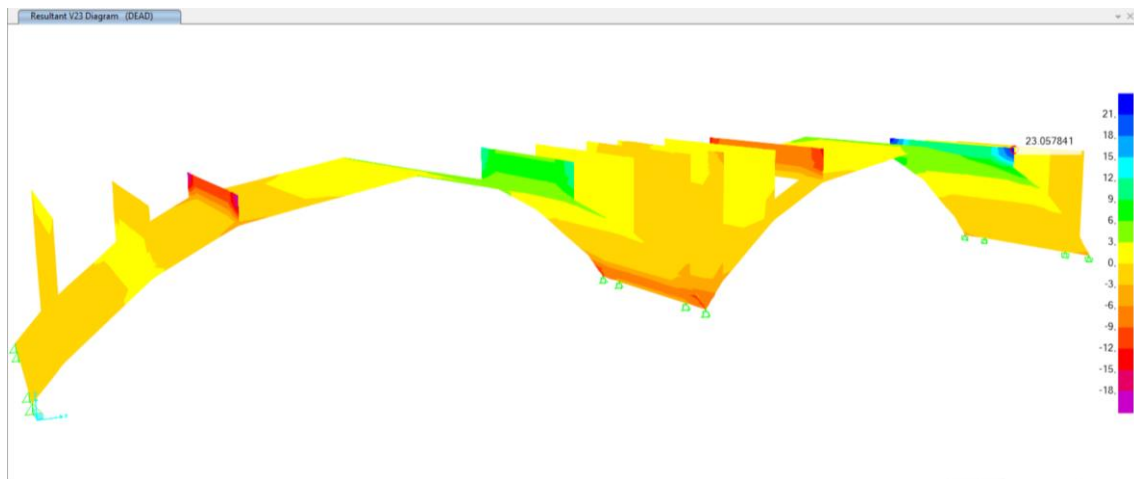


Tabla 27 Máximas fuerzas de cortante interna sobre muro de enlace, según solicitud de carga.

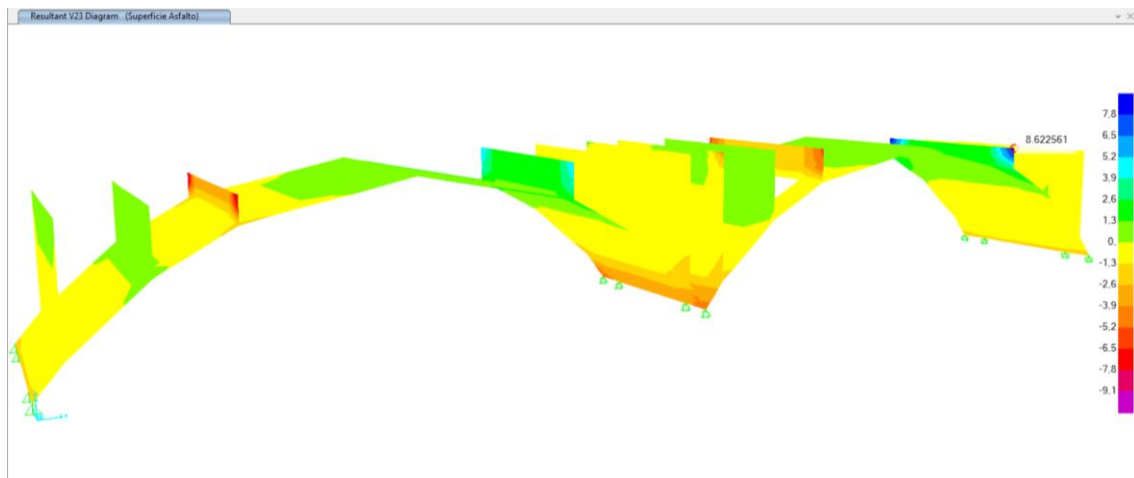
Componente	Tipo	Solicitud de carga	Tipo de Fuerza	Magnitud Fuerza (kN)
Muro enlace arco - tablero	Shell	DC	Cortante	23
Muro enlace arco - tablero	Shell	DW	Cortante	8,62
Muro enlace arco - tablero	Shell	LL	Cortante	100,32

Figura 61 Fuerza por cortante componente muro. (a) Debido al peso propio de los componentes. (b) Debido al peso propio carpeta de rodadura. (c) Debido a la carga viva vehicular y de carril.

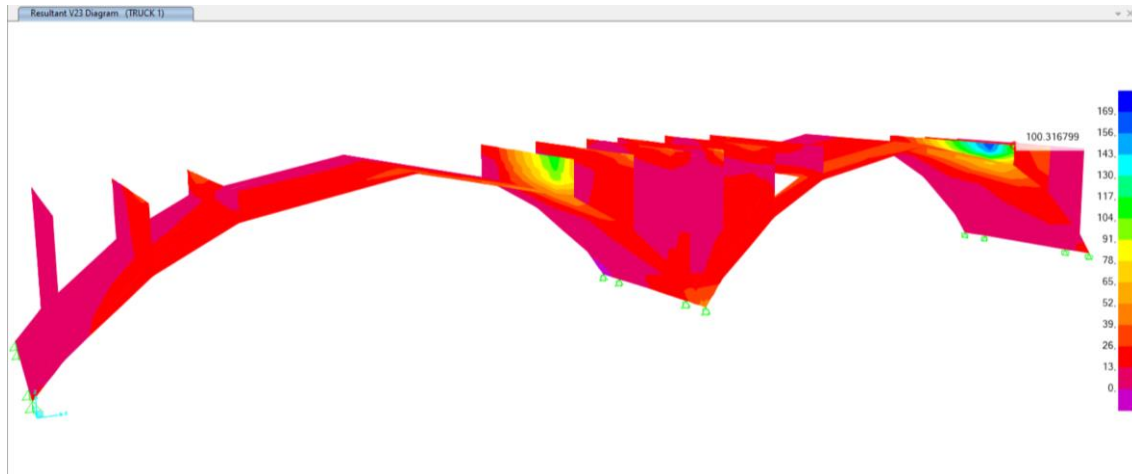
(a)



(b)



(c)



Seguidamente identificadas las fuerzas internas por cortante actuando en el muro, se prosiguió con determinar el factor de clasificación de este. Para ello se utiliza la EC-2 de la siguiente manera:

$$RF = \frac{[(C) - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)]}{(\gamma_{LL})(LL)(1 + IM)}$$

Reemplazando C: $\phi_c \phi_s \phi_n R_n$, tenemos.

$$RF = \frac{[(\phi_c \phi_s \phi_n R_n) - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)]}{(\gamma_{LL})(LL)(1 + IM)}$$

En donde,

ϕ_c	0,85	Condición estructural del elemento: Malo
ϕ_s	1,00	Todos los demás puentes de vigas y losas
ϕ_n	0,90	Para cortante y torsión concreto densidad normal
R_n	346,16 kN	
	$\phi[0,165\sqrt{f'_c} + \rho_h F_y]bd$	Artículo 5.10.11.4.2 (AIS, 2014)
	$\phi: 0,90$	Artículo 5.5.4.2.1 (AIS, 2014)
	$f'_c: 28 \text{ MPa}$	Determinado por el autor de esta investigación
	$\rho_h: 0,0025$	Artículo 5.10.11.4.2 (AIS, 2014)
	$F_y: 420 \text{ MPa}$	Asumido por el autor de esta investigación
	$b: 1000 \text{ mm}$	Determinado por el autor de esta investigación
	$d: 200 \text{ mm}$	Determinado por el autor de esta investigación
γ_{DC}	1,25	Factores de carga (WSDOT, 2022)
γ_{DW}	1,5	Factores de carga (WSDOT, 2022)
γ_{LL}	1,75	Factores de carga (WSDOT, 2022)

<i>DC</i>	23 kN	Determinado por el autor de esta investigación
<i>DW</i>	8,62 kN	Determinado por el autor de esta investigación
<i>LL</i>	100,32 kN	Determinado por el autor de esta investigación
<i>IM</i>	33%	Porcentaje incremento carga viva (WSDOT, 2022)

Determinados los factores, se calcula el factor de clasificación de la siguiente manera:

$$RF = \frac{[(0,85 * 1,00 * 0,90 * 346,16kN) - (1,25)(23kN) - (1,50)(8,62kN) \pm (0)(0)]}{(1,75)(100,32 kN)(1 + 0,33)}$$

$$RF = 0,95$$

A partir del factor de clasificación, se puede observar qué, por ser inferior a 1,00 la estructura del puente, específicamente su componente muro, presenta una condición crítica en el modo de falla por fuerza cortante. Indicando que los efectos de soporte ante las cargas, son menores que los debido a las cargas viva predominante.

Este resultado, fortalece al ya obtenido a través de la metodología de inspección visual tradicional y empleando VANT, confirmando que la estructura del puente se encuentra en mal estado.

Frente a esta falla se hace pertinente formular recomendaciones que permitan su superación y así lograr que la estructura pueda funcionar a cabalidad. Estas recomendaciones se concretan de manera que entidades tales como la Alcaldía, Gobernación e incluso el INVIAS puedan ejecutar; y las cuales se describen a continuación:

- Intervenir la estructura mediante una inspección especial, en donde se puede conocer con mayor precisión las propiedades mecánicas de los materiales existentes, así como la configuración del acero de refuerzo.
- A partir de los resultados obtenidos de la inspección especial, realizar una modelación estructural exacta para obtener conclusiones definitivas.
- Presentar un programa de inspección rutinaria, en donde se pueda monitorear el progreso de los daños presentes, para así evitarlos o demorar su desarrollo. También permite garantizar la utilidad y seguridad del tránsito a diario.
- Definir un programa de mantenimiento o reparación o repotenciación de la estructura, con la finalidad de lograr la superación de la debilidad presentada en el puente.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como finalidad evaluar el uso de VANT para la inspección visual de puentes. Para tal efecto, se seleccionaron puentes en concreto reforzado con condiciones severas de patologías estructurales y características adecuadas para ser inspeccionados a través de la técnica de inspección visual tradicional y empleando VANT. Adicionalmente, haciendo uso de estas técnicas de inspección, se lograron establecer los estados estructurales de los puentes. Permitiendo finalmente, evaluar a partir del análisis por elementos finitos y el cálculo del factor de clasificación la capacidad de soporte ante la carga viva predominante.

Por otra parte, se logra indicar técnicas de importancia para la inspección con VANTs. Y, por último, definir recomendaciones para trabajos de investigaciones futuras, enlazadas a beneficios prometedores del uso de los VANTs para la inspección visual y monitoreo de puentes. Conllevando a obtener información completa de su estado, análisis precisos, resultados efectivos y recomendaciones oportunas para su intervención y prolongación de su funcionalidad.

5.1. Conclusiones Generales

Teniendo en cuenta el desarrollo y los resultados obtenidos de este trabajo de investigación se logra emitir las siguientes conclusiones:

- A partir de la selección de puentes en concreto reforzado con condiciones de daños estructurales fuertes y con localizaciones tales que permitan ser examinados, se ejecutan exitosamente las técnicas de inspección visual tradicional y empleando VANT, logrando evaluar sus condiciones de estado estructural.
- Gracias a la técnica de inspección visual mediante el uso de VANT propuesta y ejecutada, se fortalece a la ya establecida tradicional. Generando resultados sugestivos y oportunos para la toma de decisión encaminadas a futuras intervenciones.
- El procesamiento de las fotografías capturadas por el VANT y la creación del modelo digital 3D del puente, permite verificar las dimensiones registradas durante el levantamiento del puente, medir las dimensiones de los componentes que no pudieron ser levantados en campo de manera directa, identificar y cuantificar los daños presentes en cada uno de los componentes del puente y por ultimo permite analizar de manera minuciosa

todas las zonas del puente logrando identificar daños que no fueron percibidos durante la inspección tradicional.

- En base al estado de conservación del puente, el cual es malo y su factor de clasificación, $R.F:0,95 < 1,0$; se evalúa satisfactoriamente la capacidad de soporte del sistema estructural del puente ante la solicitación de carga viva predominante, permitiendo evidenciar fallas en sus muros de enlaces por fuerza cortante. Por lo que para su mitigación y superación es oportuno que entidades tales como la Alcaldía, Gobernación o INVIAS puedan apropiar y efectuar las siguientes recomendaciones de intervenciones: Control de cargas vehiculares, inspecciones especiales, inspecciones rutinarias, elaboración de un programa de mantenimiento y/o limpieza, programa de reparación y/o repotenciación.

5.2. Recomendaciones técnicas para inspección con VANTs

Buscando generar un conjunto de conocimientos propios para la adecuada ejecución de técnicas de inspección con VANTs se presentan las siguientes recomendaciones:

- Destinar tan siquiera un tiempo de mas de cincuenta (50) horas de entrenamiento en el pilotaje de VANTs, a fin de adquirir una competencia básica y poder lograr inspecciones apropiadas. Esencialmente, cuando se proyecta ejecutar esta actividad por primera vez.
- Para lograr una inspección segura empleando VANT, es imprescindible realizar un vuelo inicial de reconocimiento de la zona, en donde se pueda identificar los puntos de “alto riesgo” los cuales al momento de maniobrar el vehículo en estos espacios se debe tener la mayor de las precauciones para evitar la colisión de este.
- Para lograr una inspección adecuada utilizando VANT y generar un apropiado modelado digital 3D del puente, es oportuno realizar una misión de vuelo de tipo “vuelo libre”, en donde se pueda capturar fotografías en todos los ángulos y zonas del puente, garantizando que entre las fotografías sucesivas tengan por lo menos un 75 % de traslapo.
- Para ajustar a la realidad el modelo digital 3D, se recomienda que mínimo se realice el levantamiento de tres puntos de control. Es importante que estos, en campo, se encuentren bien demarcados de tal forma que puedan ser capturados y evidenciados durante la inspección visual usando VANT.

- Para alcanzar resultados satisfactorios de la inspección empleando VANT, es necesario considerar el procesamiento del modelado digital 3D del puente.

5.3. Recomendaciones Para Trabajos Futuros

La experiencia y conocimientos adquiridos durante el desarrollo y exploración de la investigación, permitió evaluar el uso de VANT para la inspección visual de puentes, el cual llevó a precisar su condición de estado y la existencia de unas fallas que requieren de una intervención para su superación, elementos estos de juicios, que nos permiten para trabajos futuros formular las siguientes recomendaciones:

- Evaluar el uso de VANTs para la inspección visual de puentes en acero, madera, y/o mampostería.
- Evaluar el uso de VANTs para la evaluación de puentes a través de monitoreo de vibraciones.
- Desarrollar un método de cuantificación de daños a través de mediciones en píxeles y fotogrametrías.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, A., Abu, E., & Zaim, M. (2005). Monitoring of Traffic Using Unmanned Aerial Vehicle in Malaysia Landscape Perspective. *Jurnal Teknologi*.
- ACI Committee 228 [The American Concrete Institute]. (2003). *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength Reported (ACI 228.1R-03)*. United States.
- ANI [Agencia Nacional de Infraestructura]. (2022). *Cuarta Generación de Concesiones*. <https://www.ani.gov.co/proyecto/general/cuarta-generacion-de-concesiones-1068>
- AIS [Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica]. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puente - LRFD - CCP 14*. Colombia. <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/documentos-tecnicos1>.
- ASTM [American Society for Testing and Materials]. (2013). *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete (ASTMC805/C805M)*. United States. https://doi.org/10.1520/C0805_C0805M-18.
- Bickley, J. A. (1982). Variability of Pullout Tests and InPlace Concrete Strength. *Concrete International*, 4(No 4), 44–51.
- Barba, M., Molina, M., & Altamirano, B. (2012). *Propuesta de Guía de Inspección Cualitativa para Puentes en Nicaragua*. Managua, Nicaragua.
- Conpes [Consejo Nacional de Política Económica y Social]. (2013). *Proyectos Viales Bajo el Esquema de Asociaciones Público Privadas: Cuarta Generación de Concesiones Viales*. Bogotá D.C., Colombia.
- CSi [Computer & Structures, Inc.]. (2023). *CSiSPAIN*. <https://www.csiespana.com/software/4/csi-bridge#>
- Corredor, J. G. (2015). *Implementación de Modelos de Elevación Obtenidos Mediante Topografía Convencional y Topografía con Drones Para el Diseño Geométrico de una Vía en Rehabilitación Sector Tuluá - Río Frío*. Bogotá D.C., Colombia.
- Moreira de Souza, V. Ripper, T. (2009). *Patologia, Recuperação E Reforço de Estruturas de Concreto*. Sao Paulo, Brasil.

- Departments Of The Army And The Air Force. (1994). *Bridge Inspection, Maintenance and Repair (TM 5-600/AFJPAM 32-I088)*.
- Duque, L. (2017). *UAV-Based Bridge Inspection and Computational Simulations*. South Dakota, United State
- NYSDOT Committee [New York State of Opportunity Committee]. (2016). *Bridge Inspection Manual*. New York, United State.
- NCHRP [National Cooperative Highway Research Program], (2016). *Bridge Inspection Practices*. Washington, D.C., United State.
- Helene, P., & Pereira, F. (2003). *Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: reparación, refuerzo y protección*.
- González, R., Ucán, J. P., Sánchez, I., Medina, R., Árcega, F., Zetina, C., Casares, R. (2019). *Drones. Aplicaciones en Ingeniería Civil y Geociencias*.
- IDESC [Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali]. (2021). *¿Qué es la IDESC?*. Santiago de Cali, Colombia. https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/46675/que_es_la_idesc/
- IGAC [Instituto Geográfica Agustín Codazzi]. (2016). *Especificaciones Técnicas de Aerotriangulación GSD 10*.
- INVIAS, & DCD [Instituto Nacional de Vías, & Direccion de Carreteras de Dinamarca]. (1996). *Manuales de inventario, inspección principal, Inspección especial, capacidad de carga, inspección rutinaria, mantenimiento rutinario y limpieza, de reparación y refuerzo, priorización de obras de reparación y refuerzo*.
- INVIAS, & DCD [Instituto Nacional de Vías, & Direccion de Carreteras de Dinamarca]. (1999). *Manual de Inventario de Puentes*.
- INVIAS, & Universidad Nacional [Instituto Nacional de Vías]. (2006). *Manual Para La Inspección Visual De Puentes y Pontones*. Colombia.
- Jurado, C. (2017). *Cálculo de Puentes Con CSIBRIDGE Tomo II. Con aplicaciones prácticas*.
- Liao, H.-K., Jallow, M., Hsien-Ke, L., Nie-Jia, Y., Ming-Yi, J., Jyun-Hao, H., Cheng-Wei, S., & Po-Yuan, C. (2017). *Comparison of bridge inspection methodologies and evaluation criteria*

- in Taiwan and foreign practices.* Researchgate.Net.
<https://doi.org/10.22260/ISARC2017/0043>.
- Lisboa, D. W. B. L., Silva, A. B. S. da S., Souza, A. B. A., & Silva, M. P. da S. (2018). Utilização Do Vant Na Inspeção De Manifestações Patológicas Em. *Utilização Do Vant Na Inspeção De Manifestações Patológicas Em Fachadas De Edificações*.
- Megaw, E. D. (1979). *Factors affecting visual inspection accuracy.* Elsevier.
[https://doi.org/10.1016/0003-6870\(79\)90006-1](https://doi.org/10.1016/0003-6870(79)90006-1).
- Metni, N., & Hamel, T. (2007). *A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits.* <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.12.010>
- Ministry of Transportation Ontario. (2008). *Ontario structure inspection manual (OSIM).* Canadá.
- Mintransporte [Ministerio de Transporte]. (2018). *Transporte en Cifras Estadísticas 2018.* Colombia. [https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Estudios BID/Transporte en Cifras - Estadísticas 2018 \(4\).pdf?ver=2019-11-19-142924-863×tamp=1574191787084](https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Estudios%20BID/Transporte%20en%20Cifras%20-%20Estadisticas%202018%20(4).pdf?ver=2019-11-19-142924-863×tamp=1574191787084).
- Mintransporte [Ministerio de Transporte]. (2017). *Resolución 1528 del 23 de Mayo de 2017.* 14. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/5948-resolucion-1528-del-23-de-mayo-de-2017>.
- Moore, M., Phares, B., Graybeal, B., Rolander, D., & Washer, G. (2001). *Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges Volume I: Final Report.* United States
- Morgenthal, G., & Hallermann, N. (2014). *Quality assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based visual inspection of structures.* *Advances in Structural Engineering*, 17(3), 289–302.
<https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.3.289>
- Muñoz, E., & Gómez, D. (2013). *Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia.* *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(1), 37–62. <https://doi.org/10.4067/SO718-50732013000100003>
- Muñoz, E., Hernández, R., Valbuena, E., Trujillo, L., & Santacruz, L. (2005). *Rehabilitación de los puentes de la Red de carreteras de Colombia, basados en inspecciones visuales, estudios especializados y estrategias de reparación.* *Revista Ingeniería de Construcción*, 20(1), 159–182.

- Muñoz, J. (2017). *Guía para la determinación de la condición en puentes mediante inspección visual*.
- Natrella, M. (1963). *Experimental Statistics (Handbook N)*. U.S. Government Printing Office.
- Parente, D. C., Felix, N. C., & Picanço, A. P. (2018). *Uso de vehículo aéreo no tripulado (VANT) en la identificación de falla superficial en pavimento asfáltico*. *Revista ALCONPAT*, 7(2), 160–171.
- Pellicer, E., & Serón, J. (2000). *El Proyecto de Ingeniería Civil y el Medio Ambiente*. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, 1379–1390.
- Piatti, E. J., & Lerma, J. L. (2013). *Virtual Worlds for Photogrammetric Image-Based Simulation and Learning*. *Photogrammetric Record*, 28(141), 27–42. <https://doi.org/10.1111/phor.12001>
- Radomski, W. (2002). *Bridge rehabilitation*. Imperial College Press. London, England.
- Raina, V. (2010). *Concrete bridges: inspection, repair, strengthening, testing and load capacity evaluation* (Second). Shroff Publishers & Distributors PVT. LTD.
- Rolander, D. D., Phares, B. M., Graybeal, B. A., Moore, M. E., & Washer, G. A. (2001). *Highway bridge inspection: State-of-the-practice survey*. *Transportation Research Record*, 1749, 73–81. <https://doi.org/10.3141/1749-12>
- Ruiz, M. E., & Cocco, L. J. (2014). *Desarrollo e implementación de Equipo de Medición de Vibraciones Para la Evaluación de Estructuras*. *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, No 23.
- Ryan, T. W., Mann, J. E., Mann, J. E., & Ott, B. T. (2012). *Bridge inspector's reference manual (BIRM)*. Publication No. FHWA NHI 12-049. United States.
- Sanchez De Guzmán, D. (2006). *Durabilidad y Patología del concreto*. Instituto del Concreto, Primera Edición. Colombia.
- Sancho Gómez-Zurdo, R., Galán Martín, D., González-Rodrigo, B., Marchamalo Sacristán, M., & Martínez Marín, R. (2021). *Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno*. *Informes de La Construcción*, 73(561), e379. <https://doi.org/10.3989/ic.77867>
- IMT [Instituto Mexicano de Transporte]. (1994). *Sistema de administración de puentes* (p. 92).

Publicación Técnica No 49. Querétano, Mexico.

- Stromberg, D. G. (2011). *New advances in underwater inspection technologies for railway bridges over water*. Trid.Trb.Org. <https://trid.trb.org/view/1099033>
- Vacanas, Y., Themistocleous, K., Agapiou, A., & Hadjimitsis, D. (2015). *Building Information Modelling (BIM) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technologies in infrastructure construction project management and delay and disruption analysis*. Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015), 9535(June 2015), 95350C. <https://doi.org/10.1117/12.2192723>.
- Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, 1–3022. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>.
- WSDOT [Washington State Department of Transportation]. (2022). *Bridge Design Manual LRFD*. Washington, D.C., United State.

ANEXO 1. INSPECCION VISUAL TRADICIONAL - PUENTE PILOTO

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	
Regional..... :25 Valle			
Ruta..... :			
Carretera..... :			
Lado carretera..... :			
Abscisa..... :			
No del Registro..... :			
Año de Construcción..... :			
Año de la última reconstrucción..... :			
Paso Superior/Inferior..... : S			
Dir. de la abs. de la carretera principal..... O a E			
Requisitos de la inspección..... : 0 Nada			
Recolección de datos: Fecha..... 2022.04.01			
Recolección de datos: Iniciales..... SPJ			
Posición geográfica..... :			
Latitud: 8 grad 22 min N		Longitud: 76 grad 31 min O	Altitud: 994,8340
Goimetría:	Número de luces..... : 1		
	Longitud de la luz menor (m)..... : 5,54		
	Longitud de la luz mayor (m)..... : 5,54		
	Longitud total (m)..... : 5,54		
	Ancho del tablero (m)..... : 9,00		
	Ancho del separador (m)..... : 0,00		
	Ancho del andén izquierdo (m)..... : 1,43		
	Ancho del andén derecho (m)..... : 1,43		
	Ancho de la calzada (m)..... : 5,80		
	Ancho entre bordillos (m)..... : 8,66		
	Ancho del acceso (m)..... : 5,80		
	Área (m²)..... : 49,86		
	Altura de pilas (m)..... : 0,00		
	Altura de estribos (m)..... : 0,85		
	Long. de apoyos en pilas (m)..... : 0,00		
	Long. de apoyos en estribos (m)..... : 0,20		
	Puente en terraplen (S/N)..... : N		

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Arquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	
Curva/tangente	(C/T)..... : T		
Esviajamiento	(gra)..... :		
Superestructura, tipo principal:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	13	Losa/viga, 3 vigas	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	10	Simpl. apoyado, secc. const.	
Material..... :	20	Concreto reforzado, in situ	
Superestructura, tipo secundario:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	91	No aplicable	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	91	No aplicable	
Material..... :	91	No aplicable	
Subestructura:			
Estribos. : Tipo..... :	20	Enterrado, sólido	
Material..... :	21	Concreto reforzado	
Tipo de Cimentación..... :	10	Cimentación superficial	
Detalles:			
Tipo de baranda..... :	41	Pasamanos metálicas y pilastras metálicas	
Tipo de superficie de rodadura..... :	20	Concreto	
Tipo de junta de expansión..... :	50	No dispositivo de junta	
Tipo de apoyos fijos en estribos..... :	90	Empotrado	
Tipo de apoyos móviles en estribos..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en vigas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en vigas..... :	91	No aplicable	
Municipio..... :	Valle		
Coficiente de aceleración.....	0,30		
Paso por el cauce..... :	N		
Variante existe..... :	N	Longitud (km) :	Estado (B/R/M):

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	
Vehículo de diseño..... :			
Clase de dist. de carga..... :	2	Distribución en una dirección	
Obstáculo que cruza:			
Tipo de obstáculo..... :	32	Canal	
Ident. de la carretera..... :			
Nombre de la carretera..... :			
Lado de la carretera..... :			
Abscisa..... :			
Gálibo:			
Sup. exterior (m)..... :	I:	IM:	DM: D:
Vert. Inferior (m)..... :	I: 0,93	IM: 2,29	DM: 2,29 D: 0,93
Propietario..... :			
Departamento..... :	25	Valle	
Administración vial..... :			
Proyectista..... :			
Señalización:			
Carga máxima (ton)..... :			
Velocidad máx (k.p.h)..... :			
Otra..... :			
Observaciones:			
Resumen cronológico:			
	Fecha	Actividades	
	2022.04.01	Inspección principal	

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	

Ultima inspección principal:

Fecha..... : 2022.04.01
 Iniciales..... : SPJ
 Tiempo..... : Soleado
 Temperatura..... (gra. C) : 29

Transito: TPDS
 Autos %..... :
 Buses %..... :
 Camiones %..... :

Año de la próxima inspección principal..... 2023

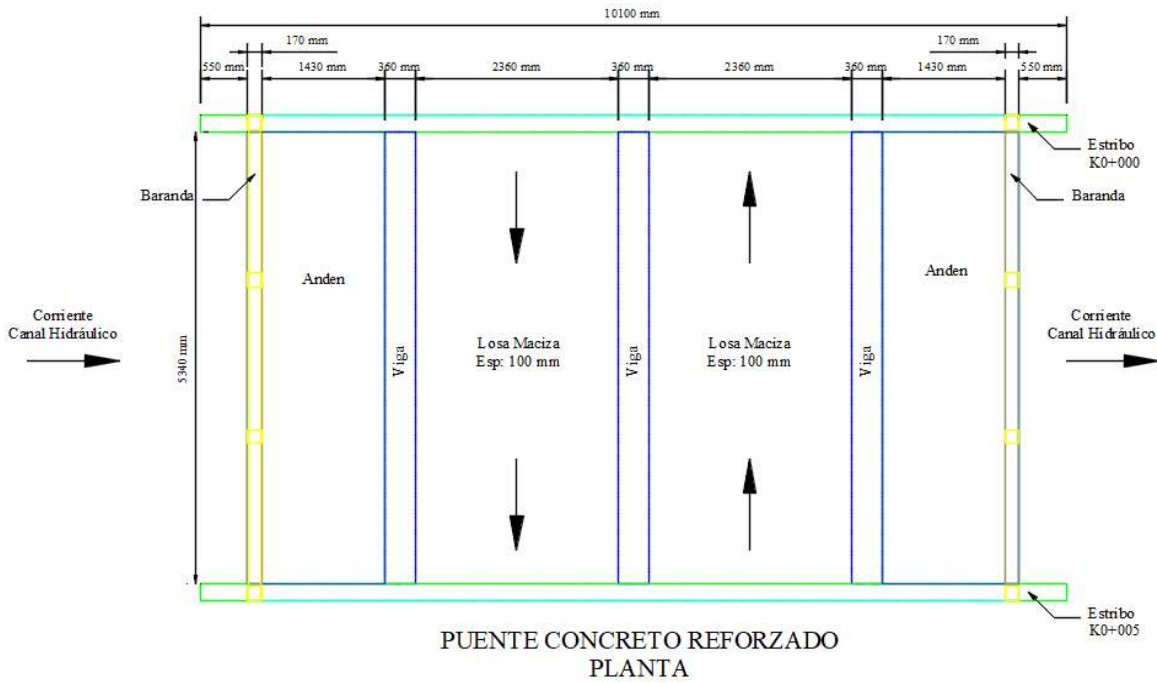
Observaciones:



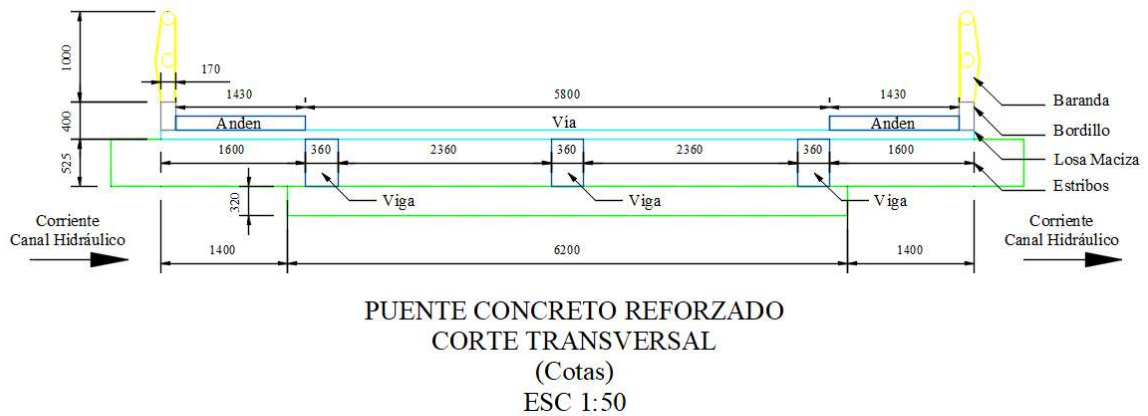
Fotografía No 1. Panorámica de la Estructura en Superficie



Fotografía No 2. Panorámica de la Estructura en Perfil



Esquema 1. Planta Puente Concreto Reforzado - Piloto



Esquema 2. Corte Transversal Puente Concreto Reforzado - Piloto

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	I



Fotografía No 3. Superficie del puente

Componentes: I Superficie del Puente Tipo 02 Concreto
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	S	Contaminación del Concreto (microorganismo de origen vegetal) (CTC)	4,55 m ²	Fotogr. No 3
----------------------	---	---	---------------------	--------------

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	I



Fotografía No 4. Anden costado derecho



Fotografía No 5. Anden costado izquierdo

Componentes: 1 Andenes y bordillos
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	CI	Presencia de humedad anden costado izquierdo	7,64 m ²	Fotogr. No 5
	CI	Fisura costado izquierdo	1,0 m	Fotogr. No 5

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	I



Fotografía No 6. Bordillo costado derecho



Fotografía No 7. Anden costado izquierdo

Componentes: I Andenes y bordillos
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	AC	Eflorescencias (EF)	3,63 m ²	Fotogr. No 6 y 7
	CD	Desgaste concreto (DGG)	0,10 m ²	Fotogr. No 6 y 7

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	I



Fotografía No 8. Bordillo costado izquierdo

Componentes: I Andenes y bordillos

Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	CI	Segregación (SE)	0,30 m ²	Fotogr. No 8
	CI	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,1 m ²	Fotogr. No 8

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Universidad del
Valle, Carpa Alquimedes

Informe de Inspección Principal

1-abr-22

I



Fotografía No 9. Barandas metálicas



Fotografía No 10. Baranda, costado derecho

Componentes: I Barandas. Tipo 03. Metálica

Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:

AC	Delaminación de la pintura (DE)	16,48 m	Fotogr. No 9
AC	Corrosión (COP)	5,00 m	Fotogr. No 10

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Universidad del
Valle, Carpa Alquimedes

Informe de Inspección Principal

1-abr-22

I



Fotografía No 11. Barandas metálicas



Fotografía No 12. Baranda, costado izquierdo

Componentes:

I

Barandas. Tipo 03. Metálica

Calif./Mantenimiento:

2

Daños/Observaciones:

AC	Delaminación de la pintura (DE)	16,48 m	Fotogr. No 11
AC	Corrosión (COP)	5,00 m	Fotogr. No 12

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	I



Fotografía No 13. Aleta 1 costado izquierdo

Componentes:

II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

A1CI	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,3 m ²	Fotogr. No 13

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	II



Fotografía No 14. Estribo 1



Fotografía No 15. Estribo 1

Componentes: II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	E1	Segregación (SE)	0,3 m ²	Fotogr. No 14
	E1	Socavación Local (SOC)	0,2 m ²	Fotogr. No 15



Fotografía No 16. Estribo 1



Fotografía No 17. Estribo 1

Componentes:	II	Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado		
Calif./Mantenimiento:	3			
Daños/Observaciones:	E1	Eflorescencias (EF)	2,70 m ²	Fotogr. No 16
	E1	Socavación Local (SOC)	0,70 m ²	Fotogr. No 17

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	II



Fotografía No 18. Estribo 1



Fotografía No 19. Estribo 1

Componentes: II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	E1	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,08 m ²	Fotogr. No 18
	E1	Infiltración (IN)	0,12 m ²	Fotogr. No 19

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	II



Fotografía No 20 Estribo 2



Fotografía No 21. Estribo 2

Componentes:	II	Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado		
Calif./Mantenimiento:	3			
Daños/Observaciones:	E2	Segregación (SE)	0,1 m ²	Fotogr. No 20
	E2	Fisura por Volcamiento (VO)	a: 0,2mm l: 0,525 m	Fotogr. No 21

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	II



Fotografía No 22. Estribo 2



Fotografía No 23. Estribo 2

Componentes:	II	Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado		
Calif./Mantenimiento:	2			
Daños/Observaciones:	E2	Eflorescencias (EF)	2,46m ²	Fotogr. No 22
	E2	Segregación (SE)	0,32 m ²	Fotogr. No 23

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	II



Fotografía No 24. Estribo 2



Fotografía No 25. Aleta A1

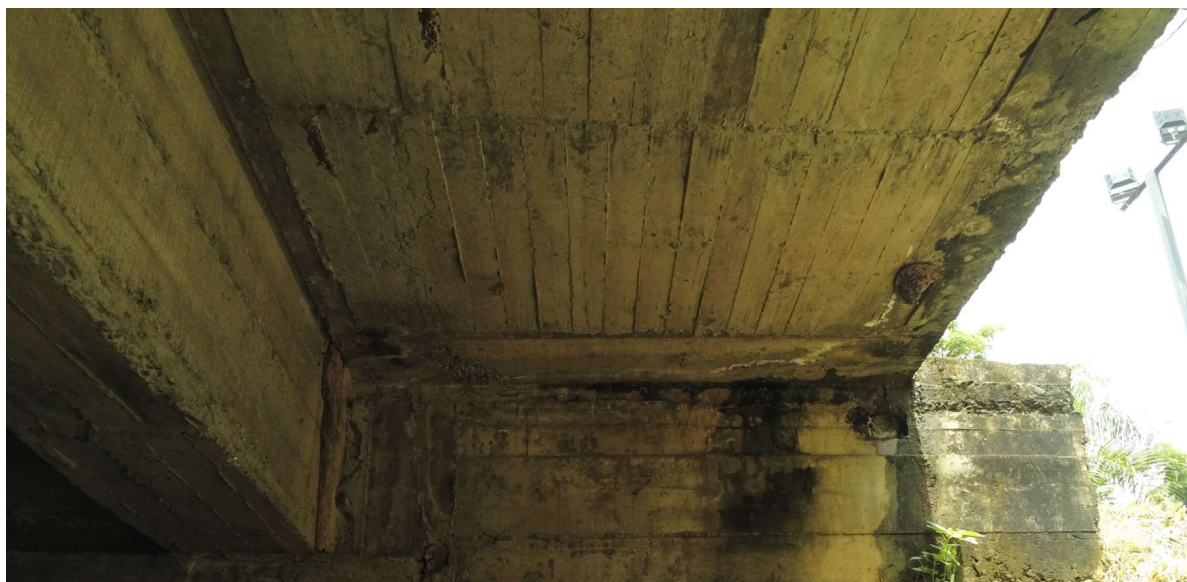
Componentes: II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	E2	Infiltración (IN)	0,10 m ²	Fotogr. No 24
	A1	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,20 m ²	Fotogr. No 25

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	III



Fotografía No 26. Losa



Fotografía No 27. Losa

Componentes: III Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	L	Infiltración (IN)	0,32 m ²	Fotogr. No 26
	L	Eflorescencias (EF)	1,10 m ²	Fotogr. No 26 y No 27

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	III



Fotografía No 28. Losa



Fotografía No 29. Losa

Componentes: III Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	L	Infiltración (IN)	0,32 m ²	Fotogr. No 28
	L	Eflorescencias (EF)	0,54 m ²	Fotogr. No 29

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	III



Fotografía No 30. Losa

Componentes: III Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	L	Segregación (SE)	0,70 m ²	Fotogr. No 30

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	III



Fotografía No 31. Viga 3



Fotografía No 32. Viga 3

Componentes: III Viga Tipo 01 Reforzada

Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	V3	Segregación (SE)	0,3 m ²	Fotogr. No 31
	V3	Eflorescencias (EF)	0,37 m ²	Fotogr. No 32

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	1-abr-22	III



Fotografía No 33. Viga 1

Componentes: III Viga Tipo 01 Reforzada
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	V1	Segregación (SE)	0,45 m ²	Fotogr. No 33
	V1	Eflorescencias (EF)	0,52m ²	Fotogr. No 33

SDC/INV		SiPuCol				Fecha	Comp	
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes		Informe de Inspección Principal				1-abr-22		
Número de componente Trabajo - Descripción del año Tipo de daño	Califi	Manten	Insp Esp	Obras de reparación				Fotos
				TP	Cantidad	Años	Costos	
1 Superficie del puente	2						3	
2 Andenes y bordillos Costado derecho	2						4, 5, 6 y 7	
3 Andenes y bordillos Costado izquierdo	3						8	
4 Barandas Ambos costados	2						9, 10, 11 y 12	
5 Aletas y estribos Estribo 1	3						14, 15, 16, 17, 18 Y 19.	
6 Aletas y estribos Estribo 2	3						20, 21, 22, 23 y 24	
7 Aletas y estribos Aleta 1	3						25	
8 Losa	2						26 , 27, 28, 29 y 30	
9 Vigas	2						31, 32 y 33	

ANEXO 2. INSPECCION VISUAL EMPLEANDO VANT - PUENTE PILOTO

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	
Regional..... :25 Valle			
Ruta..... :			
Carretera..... :			
Lado carretera..... :			
Abscisa..... :			
No del Registro..... :			
Año de Construcción..... :			
Año de la última reconstrucción..... :			
Paso Superior/Inferior..... : S			
Dir. de la abs. de la carretera principal..... O a E			
Requisitos de la inspección..... : 0 Nada			
Recolección de datos: Fecha..... 2022.06.04			
Recolección de datos: Iniciales..... SPJ			
Posición geográfica..... :			
Latitud: 8 grad 22 min N		Longitud: 76 grad 31 min O	Altitud: 994,8340
Goimetría:	Número de luces..... : 1		
	Longitud de la luz menor (m)..... : 5,54		
	Longitud de la luz mayor (m)..... : 5,54		
	Longitud total (m)..... : 5,54		
	Ancho del tablero (m)..... : 9,00		
	Ancho del separador (m)..... : 0,00		
	Ancho del andén izquierdo (m)..... : 1,43		
	Ancho del andén derecho (m)..... : 1,43		
	Ancho de la calzada (m)..... : 5,80		
	Ancho entre bordillos (m)..... : 8,66		
	Ancho del acceso (m)..... : 5,80		
	Área (m ²)..... : 49,86		
	Altura de pilas (m)..... : 0,00		
	Altura de estribos (m)..... : 0,85		
	Long. de apoyos en pilas (m)..... : 0,00		
	Long. de apoyos en estribos (m)..... : 0,20		
	Puente en terraplen (S/N)..... : N		

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	
Curva/tangente	(C/T)..... : T		
Esviajamiento	(gra)..... :		
Superestructura, tipo principal:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	13	Losa/viga, 3 vigas	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	10	Simpl. apoyado, secc. const.	
Material..... :	21	Concreto reforzado	
Superestructura, tipo secundario:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	91	No aplicable	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	91	No aplicable	
Material..... :	91	No aplicable	
Subestructura:			
Estribos. : Tipo..... :	20	Enterrado, sólido	
Material..... :	21	Concreto reforzado	
Tipo de Cimentación..... :	10	Cimentación superficial	
Detalles:			
Tipo de baranda..... :	41	Pasamanos metálicas y pilastras metálicas	
Tipo de superficie de rodadura..... :	20	Concreto	
Tipo de junta de expansión..... :	50	No dispositivo de junta	
Tipo de apoyos fijos en estribos..... :	90	Empotrado	
Tipo de apoyos móviles en estribos..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en vigas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en vigas..... :	91	No aplicable	
Municipio..... :	Valle		
Coficiente de aceleración.....	0,30		
Paso por el cauce..... :	N		
Variante existe..... :	N	Longitud (km) :	Estado (B/R/M):

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	
Vehículo de diseño..... :			
Clase de dist. de carga..... :	2	Distribución en una dirección	
Obstáculo que cruza:			
Tipo de obstáculo..... :	32	Canal	
Ident. de la carretera..... :			
Nombre de la carretera..... :			
Lado de la carretera..... :			
Abscisa..... :			
Gálibo:			
Sup. exterior (m)..... :	I:	IM:	DM: D:
Vert. Inferior (m)..... :	I: 0,93	IM: 2,29	DM: 2,29 D: 0,93
Propietario..... :			
Departamento..... :	25	Valle	
Administración vial..... :			
Proyectista..... :			
Señalización:			
Carga máxima (ton)..... :			
Velocidad máx (k.p.h)..... :			
Otra..... :			
Observaciones:			
Resumen cronológico:			
	Fecha	Actividades	
	2022.06.04	Inspección principal	

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	

Ultima inspección principal:

Fecha..... : 2022.06.04
 Iniciales..... : SPJ
 Tiempo..... : Soleado
 Temperatura..... (gra. C) : 29

Transito: TPDS
 Autos %..... :
 Buses %..... :
 Camiones %..... :

Año de la próxima inspección principal..... 2023

Observaciones:

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Universidad del
Valle, Carpa Alquimedes

Informe de Inspección Principal

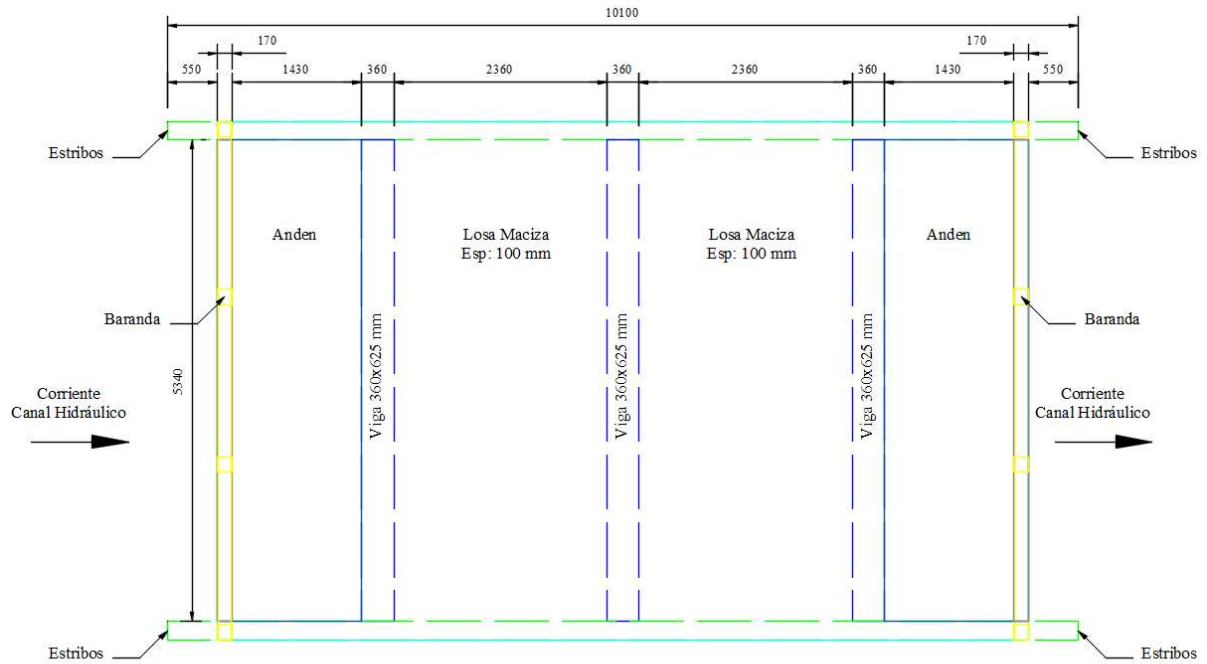
4-jun-22



Fotografía No 1. Panorámica de la Estructura en Superficie



Fotografía No 2. Panorámica de la Estructura en Perfil

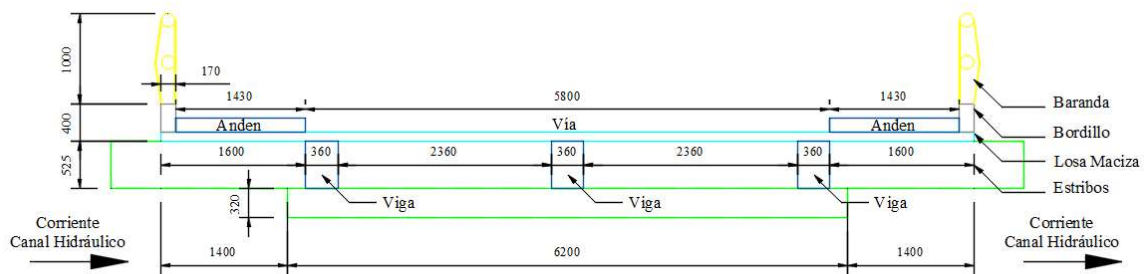


PUENTE CONCRETO REFORZADO

PLANTA

ESC 1:50

Esquema 1. Planta Puente Concreto Reforzado - Piloto



PUENTE CONCRETO REFORZADO

CORTE TRANSVERSAL

(Cotas)

ESC 1:50

Esquema 2. Corte Transversal Puente Concreto Reforzado - Piloto

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	I



Fotografía No 3. Superficie del puente

Componentes: I Superficie del Puente Tipo 02 Concreto

Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	S	Contaminación del Concreto (microorganismo de origen vegetal) (CTC)	4,55 m ²	Fotogr. No 3
----------------------	---	---	---------------------	--------------

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	I



Fotografía No 4. Anden costado derecho



Fotografía No 5. Anden costado izquierdo

Componentes:	I	Andenes y bordillos		
Calif./Mantenimiento:	2			
Daños/Observaciones:	CI	Presencia de humedad anden costado izquierdo	7,64 m ²	Fotogr. No 5
	CI	Fisura costado izquierdo	1,0 m	Fotogr. No 5

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	I



Fotografía No 6. Bordillo costado derecho



Fotografía No 7. Anden costado izquierdo

Componentes:	I	Andenes y bordillos		
Calif./Mantenimiento:	2			
Daños/Observaciones:	AC	Eflorescencias (EF)	3,63 m ²	Fotogr. No 6 y 7
	CD	Desgaste concreto (DGG)	0,10 m ²	Fotogr. No 6 y 7

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	I



Fotografía No 8. Bordillo costado izquierdo

Componentes: I Andenes y bordillos
 Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	CI	Segregación (SE)	0,30 m ²	Fotogr. No 8
	CI	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,1 m ²	Fotogr. No 8

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	I



Fotografía No 9. Barandas metálicas



Fotografía No 10. Baranda, costado derecho

Componentes: I Barandas. Tipo 03. Metálica
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	AC	Delaminación de la pintura (DE)	16,48 m	Fotogr. No 9
	AC	Corrosión (COP)	5,00 m	Fotogr. No 10

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	I



Fotografía No 11. Barandas metálicas



Fotografía No 12. Baranda, costado izquierdo

Componentes: I Barandas. Tipo 03. Metálica

Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	AC	Delaminación de la pintura (DE)	16,48 m	Fotogr. No 11
	AC	Corrosión (COP)	5,00 m	Fotogr. No 12

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	II



Fotografía No 13. Aleta 1 costado izquierdo

Componentes: II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	A1CI	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,3 m ²	Fotogr. No 13

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	II



Fotografía No 14. Estribo 1



Fotografía No 15. Estribo 1

Componentes:	II	Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado		
Calif./Mantenimiento:	3			
Daños/Observaciones:	E1	Segregación (SE)	0,3 m ²	Fotogr. No 14
	E1	Socavación Local (SOC)	0,2 m ²	Fotogr. No 15

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	II



Fotografía No 16. Estribo 1



Fotografía No 17. Estribo 1

Componentes:	II	Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado		
Calif./Mantenimiento:	3			
Daños/Observaciones:	E1	Eflorescencias (EF)	2,70 m ²	Fotogr. No 16
	E1	Socavación Local (SOC)	0,70 m ²	Fotogr. No 17

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	II



Fotografía No 18. Estribo 1



Fotografía No 19. Estribo 1

Componentes:	II	Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado		
Calif./Mantenimiento:	3			
Daños/Observaciones:	E1	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,08 m ²	Fotogr. No 18
	E1	Infiltración (IN)	0,12 m ²	Fotogr. No 19



Fotografía No 20 Estribo 2



Fotografía No 21. Estribo 2

Componentes:	II	Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado		
Calif./Mantenimiento:	3			
Daños/Observaciones:	E2	Segregación (SE)	0,1 m ²	Fotogr. No 20
	E2	Fisura por Volcamiento (VO)	a: 0,2mm l: 0,525 m	Fotogr. No 21

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	II



Fotografía No 22. Estribo 2



Fotografía No 23. Estribo 2

Componentes: II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	E2	Eflorescencias (EF)	2,46m ²	Fotogr. No 22
	E2	Segregación (SE)	0,32 m ²	Fotogr. No 23

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	II



Fotografía No 24. Estribo 2



Fotografía No 25. Aleta A1

Componentes: II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	E2	Infiltración (IN)	0,10 m ²	Fotogr. No 24
	A1	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,20 m ²	Fotogr. No 25

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	III



Fotografía No 26. Losa



Fotografía No 27. Losa

Componentes: III Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	L	Infiltración (IN)	0,32 m ²	Fotogr. No 26
	L	Eflorescencias (EF)	1,10 m ²	Fotogr. No 26 y No 27

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	III



Fotografía No 28. Losa



Fotografía No 29. Losa

Componentes: III Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	L	Infiltración (IN)	0,32 m ²	Fotogr. No 28
	L	Eflorescencias (EF)	0,54 m ²	Fotogr. No 29

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	III



Fotografía No 30. Losa

Componentes: III Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	L	Segregación (SE)	0,70 m ²	Fotogr. No 30

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	III



Fotografía No 31. Viga 3



Fotografía No 32. Viga 3

Componentes: III Viga Tipo 01 Reforzada
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	V3	Segregación (SE)	0,3 m ²	Fotogr. No 31
	V3	Eflorescencias (EF)	0,37 m ²	Fotogr. No 32

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes	Informe de Inspección Principal	4-jun-22	III



Fotografía No 33. Viga 1

Componentes: III Viga Tipo 01 Reforzada
 Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:	V1	Segregación (SE)	0,45 m ²	Fotogr. No 33
	V1	Eflorescencias (EF)	0,52m ²	Fotogr. No 33

SDC/INV		SiPuCol				Fecha	Comp	
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes		Informe de Inspección Principal				4-jun-22		
Número de componente Trabajo - Descripción del año Tipo de daño	Califi	Manten	Insp Esp	Obras de reparación				Fotos
				TP	Cantidad	Años	Costos	
				1 Superficie del puente	2			
2 Andenes y bordillos Costado derecho	2						4, 5, 6 y 7	
3 Andenes y bordillos Costado izquierdo	3						8	
4 Barandas Ambos costados	2						9, 10, 11 y 12	
5 Aletas y estribos Estribo 1	3						14, 15, 16, 17, 18 Y 19.	
6 Aletas y estribos Estribo 2	3						20, 21, 22, 23 y 24	
7 Aletas y estribos Aleta 1	3						25	
8 Losa	2						26 , 27, 28, 29 y 30	
9 Vigas	2						31, 32 y 33	

**ANEXO 3. INSPECCION VISUAL TRADICIONAL - PUENTE CASO DE ESTUDIO
“PUENTE RIO CLARO”**

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	3-jun-22	
Regional..... : 25 Valle			
Ruta..... :			
Carretera..... :			
Lado carretera..... :			
Abscisa..... :			
No del Registro..... :			
Año de Construcción..... :			
Año de la última reconstrucción..... :			
Paso Superior/Inferior..... : S			
Dir. de la abs. de la carretera principal..... N a S			
Requisitos de la inspección..... : 0 Nada			
Recolección de datos: Fecha..... 2022.06.03			
Recolección de datos: Iniciales..... SPJ			
Posición geográfica..... :			
Latitud: 3 grad 12 min N		Longitud: 76 grad 33 min O	Altitud: 1018
Goimetría: Número de luces..... : 2			
Longitud de la luz menor (m)..... : 12,2			
Longitud de la luz mayor (m)..... : 12,2			
Longitud total (m)..... : 28,5			
Ancho del tablero (m)..... : 6,58			
Ancho del separador (m)..... : 0,00			
Ancho del andén izquierdo (m)..... : 0,00			
Ancho del andén derecho (m)..... : 0,00			
Ancho de la calzada (m)..... : 5,98			
Ancho entre bordillos (m)..... : 5,98			
Ancho del acceso (m)..... : 5,98			
Área (m ²)..... : 187,53			
Altura de pilas (m)..... : 0,00			
Altura de estribos (m)..... : 3,30			
Long. de apoyos en pilas (m)..... : 0,00			
Long. de apoyos en estribos (m)..... : 0,20			
Puente en terraplen (S/N)..... : S			

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	3-jun-22	
Curva/tangente	(C/T)..... : T		
Esviajamiento	(gra)..... :		
Superestructura, tipo principal:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	51	Arco Inferior, tipo abierto	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	11	Simplemente apoyado, sección transversal variable	
Material..... :	20	Concreto reforzado, in situ	
Superestructura, tipo secundario:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	91	No aplicable	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	91	No aplicable	
Material..... :	91	No aplicable	
Subestructura:			
Estribos. : Tipo..... :	10	Con aletas integradas	
Material..... :	21	Concreto reforzado	
Tipo de Cimentación..... :	92	Desconocido	
Detalles:			
Tipo de baranda..... :	41	Pasamanos metálicas y pilastras metálicas	
Tipo de superficie de rodadura..... :	10	Asfalto	
Tipo de junta de expansión..... :	50	No dispositivo de junta	
Tipo de apoyos fijos en estribos..... :	90	Articulado	
Tipo de apoyos móviles en estribos..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en vigas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en vigas..... :	91	No aplicable	
Municipio..... :	Valle		
Coefficiente de aceleración.....	0,30		
Paso por el cauce..... :	N		
Variante existe..... :	N	Longitud (km) :	Estado (B/R/M):

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	3-jun-22	

Ultima inspección principal:

Fecha..... : 2022.06.01
 Iniciales..... : SPJ
 Tiempo..... : Nublado
 Temperatura..... (gra. C) : 25

Transito: TPDS
 Autos %..... :
 Buses %..... :
 Camiones %..... :

Año de la próxima inspección principal..... 2023

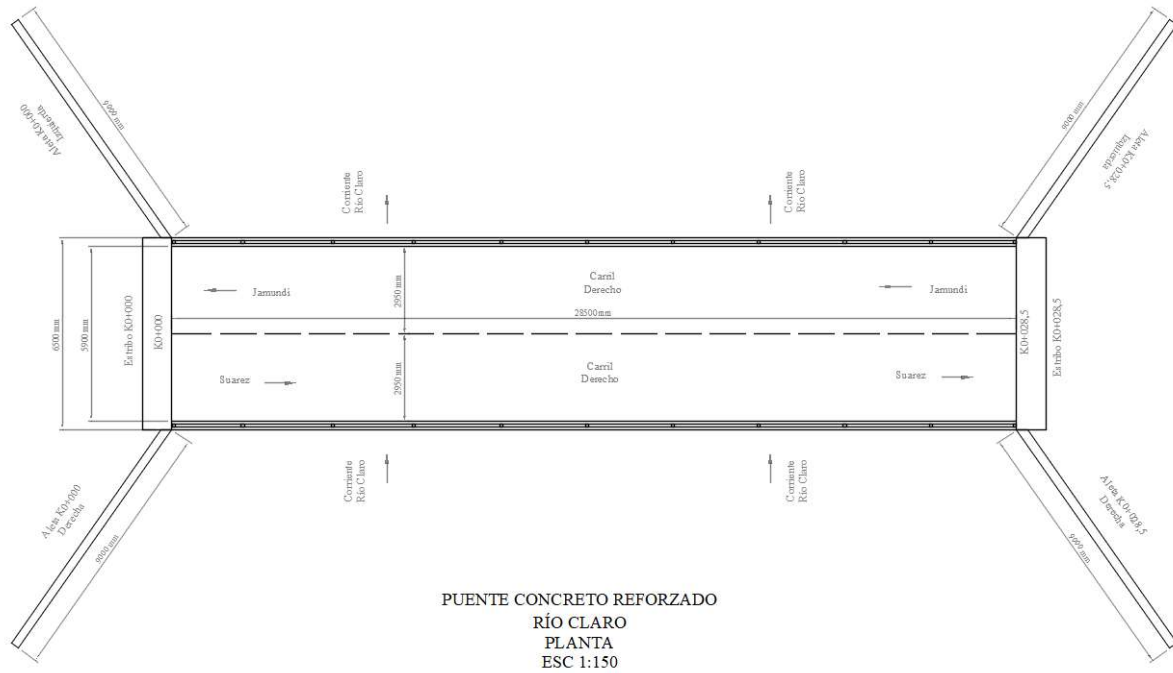
Observaciones:



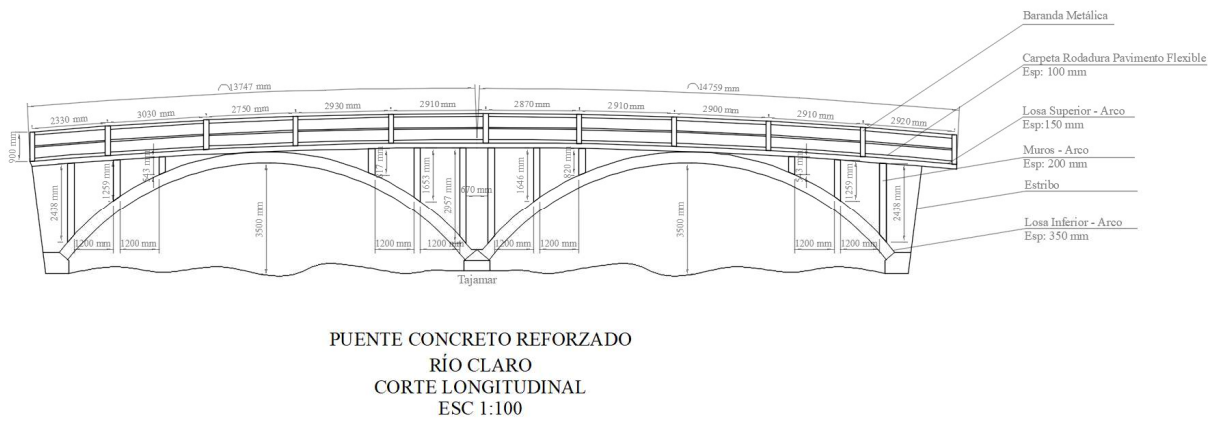
Fotografía No 1. Panorámica de la Estructura en Superficie



Fotografía No 2. Panorámica de la Estructura en Perfil, Aguas Arriba



Esquema 1. Planta Puente Concreto Reforzado - Río Claro



Esquema 2. Corte Longitudinal Puente Concreto Reforzado - Río Claro



Fotografía No 3. Superficie del puente, carril derecho



Fotografía No 4. Superficie del puente, carril derecho

Componentes: I Superficie del Puente Tipo 01 Asfalto

Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	S	Fisuras Transversales (FT)	0,45 m	Fotogr. No 3 y 4
----------------------	---	----------------------------	--------	------------------

SDC/INV

Puente Río Claro

SiPuCol

Informe de Inspección Principal

Fecha

3-jun-22

Comp

I



Fotografía No 5. Superficie del puente, carril izquierdo



Fotografía No 6. Superficie del puente, eje

Componentes: I Superficie del Puente Tipo 01 Asfalto

Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:

S	Fisura Transversal (FT)	0,70 m	Fotogr. No 5
S	Fisura Transversal (FT)	1,30 m	Fotogr. No 6

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Río Claro

Informe de Inspección Principal

3-jun-22

I



Fotografía No 7. Superficie del puente, fisura transversal en junta de construcción K0+000



Fotografía No 8. Superficie del puente, fisura transversal en junta de construcción K0+028

Componentes:

I

Superficie del Puente Tipo 01 Asfalto

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

S	Fisura transversal en junta de construcción (FCT)	6,58 m	Fotogr. No 7
S	Fisura transversal en junta de construcción (FCT)	6,58 m	Fotogr. No 8

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Río Claro

Informe de Inspección Principal

3-jun-22

I



Fotografía No 9. Baranda metálica, Aguas Arriba



Fotografía No 10. Baranda metálica, Aguas Arriba

Componentes:

I

Barandas. Tipo 03. Metálica

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

CD	Delaminación de la pintura (DE)	70 m	Fotogr. No 9
CD	Golpe por impacto vehicular (GIV)	9,90 m	Fotogr. No 10

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Río Claro

Informe de Inspección Principal

3-jun-22

I



Fotografía No 11. Baranda metálica, Aguas Abajo



Fotografía No 12. Baranda metálica, Aguas Abajo

Componentes:

I

Barandas. Tipo 03. Metálica

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

CI	Delaminación de la pintura (DE)	70 m	Fotogr. No 11
CI	Golpe por impacto vehicular (GIV)	9,90 m	Fotogr. No 12



Fotografía No 13. Aleta Inicio Aguas Abajo, Cara posterior



Fotografía No 14. Aleta Inicio Aguas Abajo, Cara frontal

Componentes:

II

Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

2

Daños/Observaciones:

AII	Contaminación del Concreto (CTC)	4,83 m ²	Fotogr. No 13
AII	Contaminación del Concreto (CTC)	29,45 m ²	Fotogr. No 14



Fotografía No 15. Aleta Inicio Aguas Arriba, Cara frontal

Componentes: II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento: 2

Daños/Observaciones:

AII	Contaminación del Concreto (CTC)	29,45 m ²	Fotogr. No 15



Fotografía No 16. Aleta Final Aguas Abajo, Cara frontal



Fotografía No 17. Aleta Final Aguas Arriba, Cara frontal

Componentes:

II

Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

AFI	Construcción inadecuada de junta fría (JF)	---	Fotogr. No 16
AFD	Construcción inadecuada de junta fría (JF)	7m	Fotogr. No 17

SDC/INV

Puente Río Claro

SiPuCol

Informe de Inspección Principal

Fecha

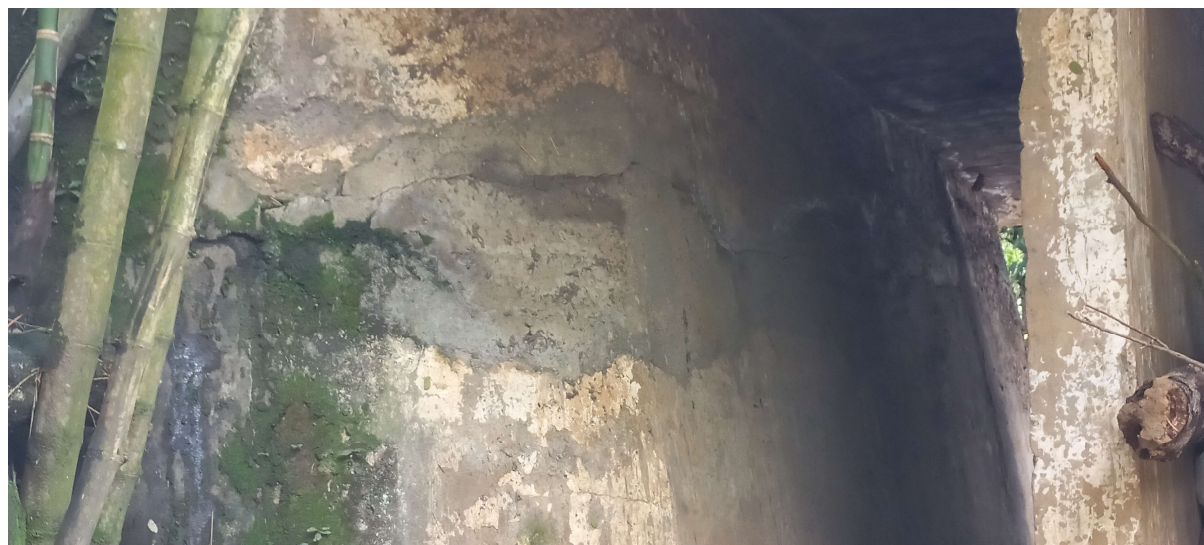
3-jun-22

Comp

II



Fotografía No 18. Estribo K0+000



Fotografía No 19. Estribo K0+000

Componentes:

II Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

E K0+000	Grieta por movimiento lateral	9,58 m	Fotogr. No 18 y 19



Fotografía No 20. Tajamar.



Fotografía No 21. Tajamar.

Componentes: II Tajamar Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:	T	Atascamiento de troncos y maleza	---	Fotogr. No 20 y 21

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Río Claro

Informe de Inspección Principal

3-jun-22

II



Fotografía No 22 Losa



Fotografía No 23. Losa

Componentes:

III

Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

L	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	0,81 m ²	Fotogr. No 22 y 23



Fotografía No 24. Losa



Fotografía No 25. Losa

Componentes:

III

Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

L	Eflorescencias (EF)	2,98 m ²	Fotogr. No 24
L	Recubrimiento inadecuado (RE)	---	Fotogr. No 25

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	3-jun-22	II



Fotografía No 26. Losa



Fotografía No 27. Losa

Componentes: III Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado
 Calif./Mantenimiento: 2
 Daños/Observaciones:

L	Segregación (SE)	0,60 m ²	Fotogr. No 26
L	Contaminación del Concreto (CTC)	8,54 m ²	Fotogr. No 27



Fotografía No 28. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Abajo.



Fotografía No 29. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Abajo.

Componentes:

III

Arcos en concreto. Muros Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

ACM	Fisura por cortante (FIC)	1,20 m	Fotogr. No 28
ACM	Construcción inadecuada de juntas frías (JF)	9,04 m	Fotogr. No 29



Fotografía No 30. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Abajo.



Fotografía No 31. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Arriba.

Componentes:

III

Arcos en concreto. Muros Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

ACM	Fisura por cortante (FIC)	---	Fotogr. No 27
ACM	Segregación en muro (SE)	---	Fotogr. No 28



Fotografía No 32. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Arriba.

Componentes:

III Arcos en concreto. Muros Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

ACM	Segregación en muro (SE)	---	Fotogr. No 32



Fotografía No 33. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Losa. Aguas Arriba.



Fotografía No 34. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Losa.

Componentes:

III

Arcos en concreto. Losa Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

ACL	Segregación en losa (SE)	0,34 m ²	Fotogr. No 33
ACL	Eflorescencias (EF)	---	Fotogr. No 34

Número de componente Trabajo - Descripción del año Tipo de daño	Califi	Manten	Insp Esp	Obras de reparación				Fotos
				TP	Cantidad	Años	Costos	
1 Superficie del puente	3						3, 4, 5, 6, 7 y 8	
2 Barandas	4						9, 10, 11 y 12	
3 Aletas, K0+000	2						13 y 14	
4 Aletas Izquierda, K0+028	4						16	
5 Aleta Derecha, K0+028	2						15	
6 Estribo, K0+000	4						18 y 19	
7 Tajamar	3						20 y 21	
8 Losa	4						22, 23, 24, 25, 26 y 27	
9 Muros, Arco	4						28, 29, 30, 31 y 32	
10 Losa, Arco	3						33 y 34	

**ANEXO 4. INSPECCION VISUAL EMPLEANDO VANT - PUENTE CASO DE
ESTUDIO “PUENTE RIO CLARO”**

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	5-jun-22	
Regional..... : 25 Valle			
Ruta..... :			
Carretera..... :			
Lado carretera..... :			
Abscisa..... :			
No del Registro..... :			
Año de Construcción..... :			
Año de la última reconstrucción..... :			
Paso Superior/Inferior..... : S			
Dir. de la abs. de la carretera principal..... N a S			
Requisitos de la inspección..... : 0 Nada			
Recolección de datos: Fecha..... 2022.06.05			
Recolección de datos: Iniciales..... SPJ			
Posición geográfica..... :			
Latitud: 3 grad 12 min N		Longitud: 76 grad 33 min O	Altitud: 1018
Goimetría: Número de luces..... : 2			
Longitud de la luz menor (m)..... : 12,2			
Longitud de la luz mayor (m)..... : 12,2			
Longitud total (m)..... : 28,5			
Ancho del tablero (m)..... : 6,58			
Ancho del separador (m)..... : 0,00			
Ancho del andén izquierdo (m)..... : 0,00			
Ancho del andén derecho (m)..... : 0,00			
Ancho de la calzada (m)..... : 5,98			
Ancho entre bordillos (m)..... : 5,98			
Ancho del acceso (m)..... : 5,98			
Área (m ²)..... : 187,53			
Altura de pilas (m)..... : 0,00			
Altura de estribos (m)..... : 3,30			
Long. de apoyos en pilas (m)..... : 0,00			
Long. de apoyos en estribos (m)..... : 0,20			
Puente en terraplen (S/N)..... : S			

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	5-jun-22	
Curva/tangente	(C/T)..... : T		
Esviajamiento	(gra)..... :		
Superestructura, tipo principal:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	51	Arco Inferior, tipo abierto	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	11	Simplemente apoyado, sección transversal variable	
Material..... :	20	Concreto reforzado, in situ	
Superestructura, tipo secundario:			
Diseño tipo..... :			
Tipo de la estructuración transversal..... :	91	No aplicable	
Tipo de la estructuración longitudinal..... :	91	No aplicable	
Material..... :	91	No aplicable	
Subestructura:			
Estribos. : Tipo..... :	10	Con aletas integradas	
Material..... :	21	Concreto reforzado	
Tipo de Cimentación..... :	92	Desconocido	
Detalles:			
Tipo de baranda..... :	41	Pasamanos metálicas y pilastras metálicas	
Tipo de superficie de rodadura..... :	10	Asfalto	
Tipo de junta de expansión..... :	50	No dispositivo de junta	
Tipo de apoyos fijos en estribos..... :	90	Articulado	
Tipo de apoyos móviles en estribos..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en pilas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos fijos en vigas..... :	91	No aplicable	
Tipo de apoyos móviles en vigas..... :	91	No aplicable	
Municipio..... :	Valle		
Coefficiente de aceleración.....	0,30		
Paso por el cauce..... :	N		
Variante existe..... :	N	Longitud (km) :	Estado (B/R/M):

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	5-jun-22	

Ultima inspección principal:

Fecha..... : 2022.06.01
 Iniciales..... : SPJ
 Tiempo..... : Nublado
 Temperatura..... (gra. C) : 25

Transito: TPDS
 Autos %..... :
 Buses %..... :
 Camiones %..... :

Año de la próxima inspección principal..... 2023

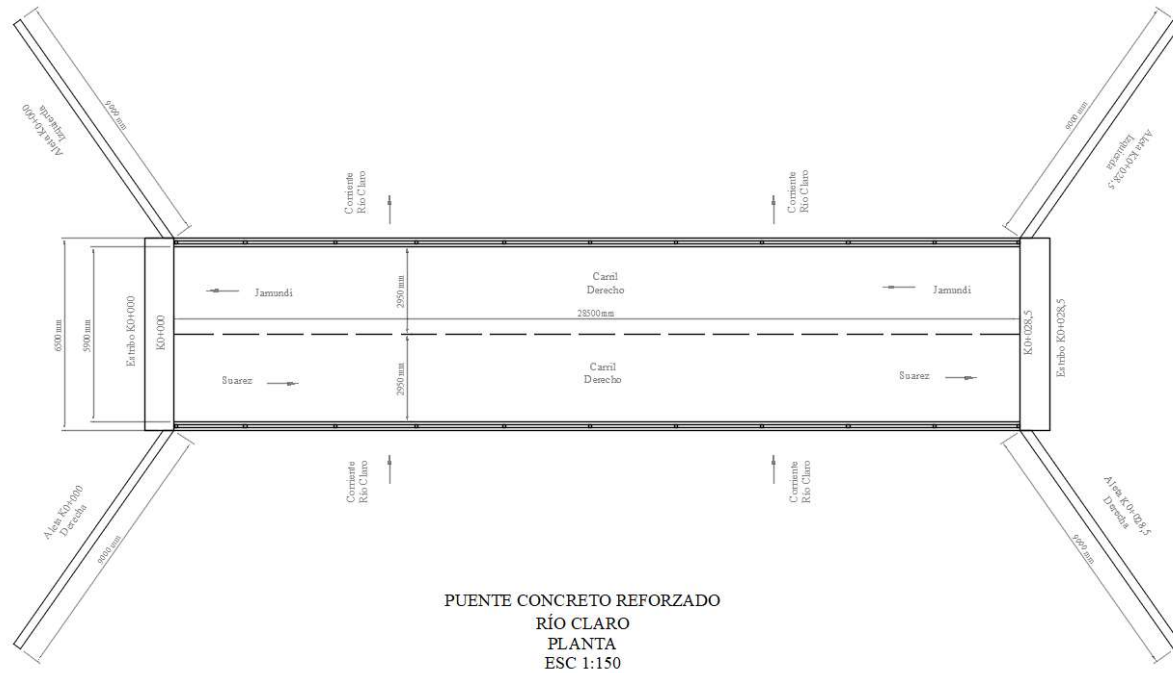
Observaciones:



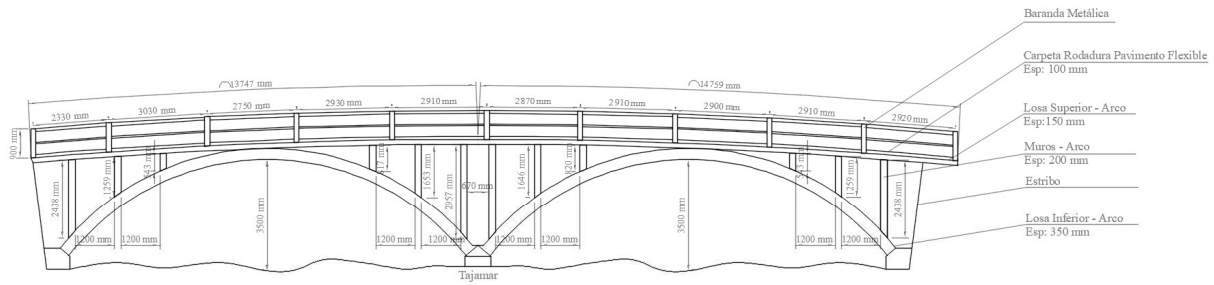
Fotografía No 1. Panorámica de la Estructura en Superficie



Fotografía No 2. Panorámica de la Estructura en Perfil. Aguas Abajo.



Esquema 1. Planta Puente Concreto Reforzado - Piloto



Esquema 2. Corte Transversal Puente Concreto Reforzado - Piloto

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Río Claro

Informe de Inspección Principal

5-jun-22

I



Fotografía No 3. Superficie del puente, carril derecho e izquierdo

Componentes:

I

Superficie del Puente Tipo 01 Asfalto

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

S	Fisuras Transversales (FT)	1,00 m	Fotogr. No 3
S	Fisuras Longitudinal (FT)	0,88 m	Fotogr. No 3

SDC/INV

Puente Río Claro

SiPuCol

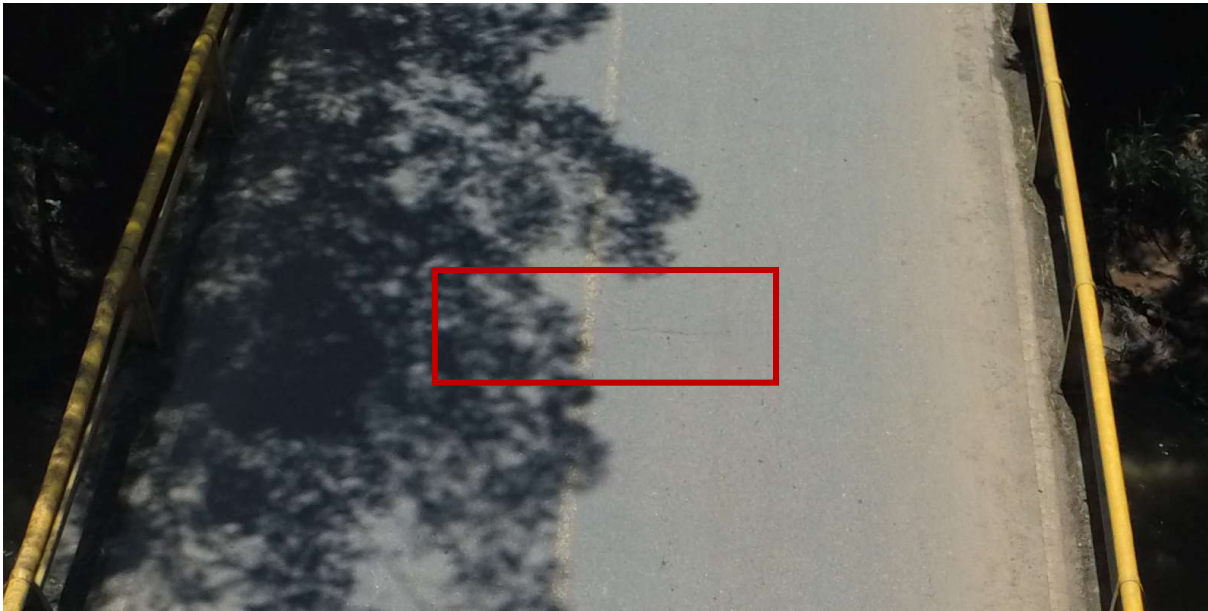
Informe de Inspección Principal

Fecha

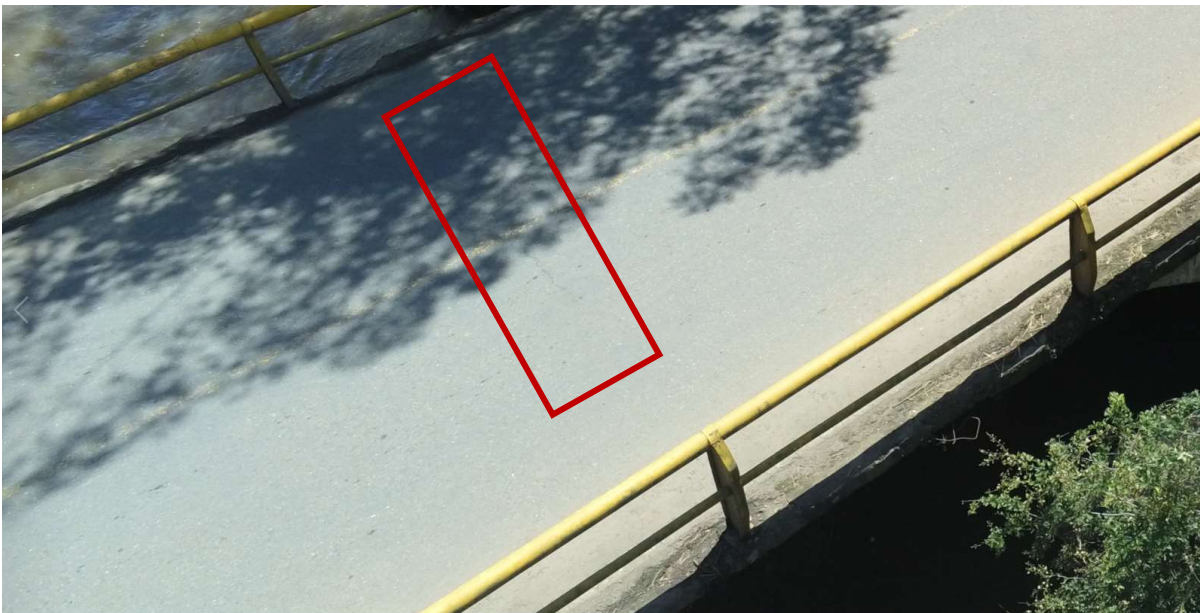
5-jun-22

Comp

I



Fotografía No 4. Superficie del puente, eje



Fotografía No 5. Superficie del puente, eje

Componentes:

I

Superficie del Puente Tipo 01 Asfalto

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

S	Fisura Transversal (FT)	1,27	Fotogr. No 4 y 5

SDC/INV	SiPuCol	Fecha	Comp
Puente Río Claro	Informe de Inspección Principal	5-jun-22	I



Fotografía No 6. Superficie del puente, fisura transversal en junta de construcción K0+000



Fotografía No 7. Superficie del puente, fisura transversal en junta de construcción K0+028,5

Componentes: I Superficie del Puente Tipo 01 Asfalto

Calif./Mantenimiento: 3

Daños/Observaciones:

S	Fisura transversal en junta de construcción (FCT)	12,56 m	Fotogr. No 6 y 7

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Río Claro

Informe de Inspección Principal

5-jun-22

I



Fotografía No 8. Baranda metálica, Aguas Arriba.



Fotografía No 9. Baranda metálica, Aguas Arriba.

Componentes:

I

Barandas. Tipo 03. Metálica

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

CD	Delaminación de la pintura (DE)	59 m	Fotogr. No 8
CD	Golpe por impacto vehicular (GIV)	5,32 m	Fotogr. No 9



Fotografía No 10. Baranda metálica, Aguas Abajo.



Fotografía No 11. Baranda metálica, Aguas Abajo.

Componentes:

I

Barandas. Tipo 03. Metálica

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

CI	Delaminación de la pintura (DE)	59 m	Fotogr. No 10
CI	Golpe por impacto vehicular (GIV)	1,52 m	Fotogr. No 11

SDC/INV

SiPuCol

Fecha

Comp

Puente Río Claro

Informe de Inspección Principal

5-jun-22

II



Fotografía No 12. Aleta Inicio Aguas Abajo, Cara frontal



Fotografía No 13. Aleta Inicio Aguas Arriba, Cara frontal

Componentes:

II

Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

2

Daños/Observaciones:

AII	Contaminación del Concreto (CTC)	29,45 m ²	Fotogr. No 12
AID	Contaminación del Concreto (CTC)	29,45 m ²	Fotogr. No 13



Fotografía No 14. Aleta Final Aguas Abajo, Cara frontal



Fotografía No 15. Aleta Final Aguas Arriba, Cara frontal

Componentes:

II

Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

AFI	Construcción inadecuada de junta fría (JF)	6,81 m	Fotogr. No 14
AFD	Construcción inadecuada de junta fría (JF)	6,67 m	Fotogr. No 15



Fotografía No 16. Estribo K0+000



Fotografía No 17. Estribo K0+000

Componentes:

II

Aletas y Estribos Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

E K0+000	Grieta por movimiento lateral	9,58 m	Fotogr. No 16 y 17



Fotografía No 18. Tajamar.



Fotografía No 19. Tajamar.

Componentes:

II

Tajamar Tipo 03 Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

T	Atascamiento de troncos y maleza	3 m ²	Fotogr. No 18 y 19



Fotografía No 20 Losa



Fotografía No 21. Losa

Componentes:

III

Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

L	Exposición del acero de refuerzo (EXA)	1,45 m ²	Fotogr. No 20 y 21



Fotografía No 22. Losa



Fotografía No 23. Losa

Componentes:

III

Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

3

Daños/Observaciones:

L	Eflorescencias (EF)	7,98 m ²	Fotogr. No 22
L	Recubrimiento inadecuado (RE)	1,2 m ²	Fotogr. No 23



Fotografía No 24. Losa



Fotografía No 25. Losa

Componentes:

III

Losa Tipo 04 Maciza Concreto Reforzado

Calif./Mantenimiento:

2

Daños/Observaciones:

L	Segregación (SE)	0,60 m ²	Fotogr. No 24
L	Contaminación del Concreto (CTC)	8,53 m ²	Fotogr. No 25



Fotografía No 26. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Abajo.



Fotografía No 27. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Abajo.

Componentes:

III

Arcos en concreto. Muros.

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

ACM	Fisura por cortante (FIC)	2,66 m	Fotogr. No 26
ACM	Construcción inadecuada de juntas frías (JF)	57,85 m	Fotogr. No 27



Fotografía No 28. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Arriba.



Fotografía No 29. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Arriba.

Componentes:

III

Arcos en concreto. Muros.

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

ACM	Construcción inadecuada de juntas frías (JF)	57,85 m	Fotogr. No 28
ACM	Segregación en muro (SE)	2,22 m ²	Fotogr. No 29



Fotografía No 30. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Arriba.



Fotografía No 31. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Muros. Aguas Arriba.

Componentes:

III

Arcos en concreto. Muros Concreto Reforzado.

Calif./Mantenimiento:

4

Daños/Observaciones:

ACM	Construcción inadecuada de juntas frías (JF)	57,85 m	Fotogr. No 30
ACM	Construcción inadecuada de juntas frías (JF)	57,85 m	Fotogr. No 31



Fotografía No 32. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Losa. Aguas Arriba.



Fotografía No 33. Superestructura en concreto, Arcos en concreto, Losa.

Componentes:

III

Arcos en concreto. Losa Concreto Reforzado.

Calif./Mantenimiento:

2

Daños/Observaciones:

ACL	Segregación en losa (SE)	0,244 m ²	Fotogr. No 32
ACL	Eflorescencias (EF)	50,00 m ²	Fotogr. No 33

SDC/INV		SiPuCol			Fecha		Comp	
Puente Universidad del Valle, Carpa Alquimedes		Informe de Inspección Principal			1-abr-22			
Número de componente Trabajo - Descripción del año Tipo de daño	Califi	Manten	Insp Esp	Obras de reparación				Fotos
				TP	Cantidad	Años	Costos	
				1 Superficie del puente	3			
2 Barandas	4						8, 9, 10 y 11	
3 Aletas, K0+000	2						12 y 13	
4 Aletas Izquierda, K0+028	4						14	
5 Aleta Derecha, K0+028	2						15	
6 Estribo, K0+000	4						16 y 17	
7 Tajamar	3						18 y 19	
8 Losa	4						20, 21, 22, 23, 24 y 25	
9 Muros, Arco	4						26, 27, 28, 29, 30 y 31	
10 Losa, Arco	2						32 y 33	

