

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Implementación de Realidad Virtual en Inspecciones Visuales**

**Doménica Carolina Solís Huilcapi**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de ingeniero civil.

Quito, 14 de mayo de 2025.

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Implementación de Realidad Virtual en Inspecciones Visuales**

**Doménica Carolina Solís Huilcapi**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Eva Lantsoght, PhD  
Estefanía Cervantes, MEng, MDI**

Quito, 14 de mayo de 2025

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Doménica Carolina Solís Huilcapi

Código: 00322976

Cédula de identidad: 0605020114

Lugar y fecha: Quito, 14 de mayo de 2025

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

## RESUMEN

Mediante el uso de fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), se generó un modelo tridimensional de un puente de hormigón armado de vigas continuas, que fue integrado en entornos inmersivos desarrollados con el software Unity. Durante el desarrollo del proyecto, se logró conectar exitosamente el modelo de un puente a un entorno de realidad virtual (VR, por sus siglas en inglés), permitiendo recorridos virtuales realistas a través de gafas de VR.

Entre los resultados más destacados, se valida el uso de la realidad virtual como herramienta complementaria para las inspecciones visuales, facilitando la experiencia del usuario y reduciendo la variabilidad en los resultados. El estudio concluye que, con mejoras adicionales, esta tecnología tiene el potencial de convertirse en una solución viable, accesible y escalable para el diagnóstico estructural remoto de puentes a nivel nacional e internacional.

**Palabras clave:** Inspección visual, realidad virtual, puentes, evaluación de condición, fotogrametría, modelado 3D.

## ABSTRACT

Using drone-based photogrammetry, a three-dimensional model of a continuous reinforced concrete beam bridge was generated and subsequently integrated into immersive environments developed with Unity software. Throughout the project, the bridge model was successfully connected to the VR environment, enabling realistic virtual walkthroughs using VR headsets.

Among the most relevant findings, the study validates virtual reality as a complementary tool for visual inspections, enhancing user experience and reducing variability in inspection outcomes. The research concludes that, with further improvements, this technology could become a viable, accessible, and scalable solution for remote structural diagnostics of bridges at both national and international levels.

**Key words:** Visual inspection, virtual reality, bridges, condition assessment, photogrammetry, 3D modelling.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	10
Metodología.....	12
Ánàlisis y resultados .....	17
Conclusiones .....	26
Referencias bibliográficas.....	28
Anexo A: Calificación del puente mediante imágenes adquiridas con UAV por cada inspector .....	31
Anexo B: Calificación del puente mediante rv por cada inspector .....	34

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inspección visual in situ 2024.....	17
Tabla 2. Inspección visual con fotos obtenidas con dron.....	18
Tabla 3. Calificación de cada elemento por inspección mediante imágenes adquiridas por UAV .....	19
Tabla 4. Calificación de cada elemento por inspección mediante RV .....	21
Tabla 5. Inspección visual con realidad virtual.....	22
Tabla 6. Resultados por metodología.....	23
Tabla 7. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #1 .....	31
Tabla 8. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #2 .....	31
Tabla 9. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #3 .....	32
Tabla 10. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #4.....	32
Tabla 11. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #5.....	33
Tabla 12. Inspección del puente mediante RV por el inspector #1 .....	34
Tabla 13. Inspección del puente mediante RV por el inspector #2 .....	34
Tabla 14. Inspección del puente mediante RV por el inspector #3 .....	35
Tabla 15. Inspección del puente mediante RV por el inspector #4.....	36
Tabla 16. Inspección del puente mediante RV por el inspector #5 .....	36



## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Puente del caso de estudio. ....	13
Ilustración 2. UAV utilizado para la inspección.....	14
Ilustración 3. Modelo 3D del puente de caso de estudio. ....	14
Ilustración 4. Inspección visual inmersiva.....	16

## INTRODUCCIÓN

La implementación de la realidad virtual en inspecciones visuales de puentes representa una nueva forma de evaluar infraestructuras de manera remota, precisa e inmersiva (Catbas et al., 2022). Estas inspecciones son fundamentales para garantizar la seguridad estructural y el mantenimiento oportuno de los puentes; sin embargo, los métodos tradicionales dependen en gran medida de observaciones subjetivas y del criterio del evaluador. Aunque se emplean variables estandarizadas para orientar la valoración, la experiencia personal sigue siendo determinante (Muñoz et al., 2015). Además, las inspecciones visuales tradicionales requieren la presencia física en el sitio, estando condicionadas por factores como el clima y la dificultad de acceso a zonas críticas (Cervantes et al., 2025).

Ante estas limitaciones, la realidad virtual emerge como una herramienta tecnológica de alto potencial en la ingeniería civil. A partir de modelos tridimensionales generados mediante fotogrametría con drones, es posible construir entornos virtuales interactivos que permiten realizar recorridos detallados sin necesidad de estar físicamente presentes. Este enfoque no solo reduce riesgos laborales, sino que también mejora la eficiencia, la consistencia de los resultados y facilita la generación de archivos digitales reutilizables, permitiendo la comparación sistemática de inspecciones en el tiempo (Yasin Yiğit & Uysal, 2025).

Investigaciones recientes han desarrollado sistemas de entrenamiento y evaluación basados en realidad virtual para inspectores de puentes, combinando simulaciones inmersivas en el software Unity (Unity Technologies, 2023) con la operación remota de drones. Estos sistemas han demostrado ser efectivos en las etapas iniciales de capacitación, mejorando significativamente la confianza y precisión de las inspecciones (Li et al., 2022).

En el contexto ecuatoriano, donde las infraestructuras suelen estar ubicadas en zonas geográficamente complejas (Marín Guzmán & Maldonado Noboa, 2022) y el acceso a tecnologías avanzadas aún es limitado, esta propuesta adquiere particular relevancia. La incorporación de drones y software de licencia económica en la metodología ofrece una oportunidad para optimizar recursos, estandarizar evaluaciones y democratizar el acceso a tecnologías de diagnóstico estructural.

A continuación, se describen los elementos metodológicos empleados para crear los modelos 3D del puente de estudio, su integración en softwares como Unity y las funcionalidades inmersivas diseñadas para simular inspecciones virtuales a través de dispositivos de realidad virtual.

## METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque aplicado y experimental, orientado a analizar el impacto de la realidad virtual como herramienta de apoyo en la inspección visual de puentes. A partir de un caso de estudio específico, se diseñó una estrategia metodológica que integra observación directa, tecnologías UAV (vehículos aéreos no tripulados), fotogrametría, reconstrucción 3D y entornos inmersivos.

El proceso se estructuró en cinco fases principales, siguiendo una lógica progresiva: diagnóstico tradicional, adquisición de datos, modelado tridimensional, evaluación comparativa y validación inmersiva. A continuación, se describen detalladamente cada una de ellas.

### **Fase 1: Selección del caso de estudio**

Se seleccionó como caso de estudio un puente de hormigón armado de vigas continuas, construido en 1980, ubicado sobre la quebrada de Tambura, en la antigua carretera Ilumán–San Antonio, provincia de Imbabura, Ecuador. La elección se fundamentó en la existencia de investigaciones previas que documentaban tanto inspecciones visuales tradicionales como evaluaciones mediante UAV, proporcionando un marco comparativo sólido para esta investigación. Para estas inspecciones se utilizó la Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica (Muñoz et al., 2015) mediante inspección visual, lo que permitió aplicar una metodología estandarizada y reconocida para la evaluación del estado estructural del puente.

El primer paso metodológico consistió en replicar una inspección visual tradicional, siguiendo la metodología descrita por (Cervantes et al., 2024). Esta inspección incluyó:

- Levantamiento de información técnica básica.

- Detección preliminar de deterioros visibles.
- Descripción cualitativa del estado general de la estructura.

Este diagnóstico in situ sirvió como referencia para contrastar posteriormente los hallazgos obtenidos mediante herramientas digitales, permitiendo evaluar la efectividad de la VR en contextos reales de inspección.



*Ilustración 1. Puente del caso de estudio.*

## **Fase 2: Adquisición de datos mediante UAV**

La segunda etapa se centró en la adquisición de datos mediante un vuelo automatizado de dron sobre el puente de estudio. Se aplicó un protocolo sistemático de captura de imágenes, considerando:

- Planificación previa de rutas de vuelo.
- Cobertura completa de la estructura con un solape del 70%.
- Condiciones óptimas de iluminación y enfoque.

Este procedimiento cumplió los lineamientos establecidos para inspecciones remotas con UAV, incorporando aspectos de seguridad aérea, análisis de obstáculos y gestión de permisos (Cervantes et al., 2025).



*Fuente: (Cervantes et al., 2024)*

*Ilustración 2. UAV utilizado para la inspección.*

### **Fase 3: Procesamiento del modelo 3D**

Las imágenes recolectadas fueron procesadas utilizando Agisoft Metashape (Agisoft LLC, 2020), generando un modelo tridimensional de alta fidelidad mediante técnicas de fotogrametría (Cervantes et al., 2025). El modelo final incluyó:

- Nube de puntos densa.
- Malla geométrica detallada.
- Texturización realista.

Esta representación precisa de la geometría y superficie del puente permitió su posterior integración en entornos de realidad virtual (Lopresti et al., 2024).



*Ilustración 3. Modelo 3D del puente de caso de estudio.*

### **Fase 4: Evaluación de la condición estructural basada en imágenes UAV**

En esta etapa, cinco estudiantes de último año de Ingeniería Civil, certificados por el National Highway Institute en inspección visual de puentes (National Highway Institute [NHI], 2024), fueron convocados para evaluar la condición estructural del puente exclusivamente a partir de las imágenes obtenidas con el dron.

Cada evaluador trabajó de forma independiente, registrando hallazgos sobre daños como:

- Fisuras.
- Pérdida de recubrimiento.
- Desintegración del concreto.
- Ataques químicos.
- Deformaciones estructurales.

Los resultados se sistematizaron en una matriz comparativa, identificando patrones, coincidencias y discrepancias. Esta evaluación representó una primera aproximación digital no inmersiva basada en imágenes bidimensionales.

#### **Fase 5: Segunda evaluación de la condición estructural aplicando entorno de realidad virtual**

En la última fase, se implementó un entorno de realidad virtual utilizando el modelo 3D generado previamente. El modelo fue optimizado, exportado en formato FBX e integrado en el motor de desarrollo Unity 2022.3 LTS, compatible con plataformas de realidad virtual y ampliamente utilizado en simulaciones de ingeniería por su capacidad multiplataforma y soporte para entornos inmersivos (Unity Technologies, 2023).

Se diseñó una escena interactiva que permitía:

- Recorridos libres por el puente.
- Acercamiento a puntos críticos.

- Detección de daños en zonas de difícil acceso.
- Exploración a escala real (Li et al., 2022).

Para la visualización se utilizó el visor Meta Quest 2, un dispositivo autónomo de realidad virtual con una resolución de 1832 x 1920 píxeles por ojo, seguimiento de seis grados de libertad (6DoF) y una tasa de refresco de hasta 120 Hz, lo que permite una experiencia fluida y detallada en entornos tridimensionales (Meta, 2022). La integración se realizó mediante el sistema OpenXR (Khronos Group, 2023), lo que permitió una navegación inmersiva en tiempo real, facilitando la detección de daños en zonas críticas y la evaluación estructural desde una perspectiva realista y segura.

Los mismos cinco inspectores realizaron una segunda evaluación estructural, esta vez inmersos en el entorno VR, emitiendo nuevos diagnósticos. Esta fase buscó determinar si el uso de VR:

- Mejora la localización de daños.
- Reduce la subjetividad de las evaluaciones.
- Incrementa la precisión técnica del análisis.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante el análisis fotográfico y la experiencia inmersiva fueron comparados con el diagnóstico tradicional. Esta comparación permitió evaluar el grado de concordancia entre métodos, identificar discrepancias y valorar el aporte real de la realidad virtual en procesos de inspección estructural.



*Ilustración 4. Inspección visual inmersiva.*



## ÁNALISIS Y RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la investigación organizados en distintas fases, correspondientes a las metodologías aplicadas durante el proceso de evaluación estructural del puente. Cada fase aborda una técnica específica: inspección visual tradicional (Fase 1), evaluación digital mediante imágenes captadas por UAV (Fase 4) e inspección inmersiva en entorno de realidad virtual (Fase 5). Esta estructura permite mostrar la evolución en la precisión y eficiencia de los diagnósticos a medida que se incorporan tecnologías más avanzadas. Al final, se incluye un análisis comparativo que sintetiza los hallazgos clave y permite valorar el aporte relativo de cada metodología en términos de precisión, seguridad, accesibilidad y eficiencia operativa.

### Evaluación inicial: Inspección visual tradicional (Fase 1)

La investigación se inició con una inspección visual in situ, documentada por (Cervantes et al., 2024) y desarrollada bajo los lineamientos de la Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual (Muñoz et al., 2015).

Esta evaluación permitió identificar daños superficiales en componentes clave del puente, otorgando una calificación global de 5 puntos, como se detalla en la Tabla 1.

*Tabla 1. Inspección visual in situ 2024*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	2	A	0.6	2
Lighting – Alumbrado	1	1	A	0.6	1
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	1	B	0.8	2
Sidewalks – Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	3	A	0.6	3
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	1	A	0.6	1

Expansion Joints - Juntas de expansión	1	3	A	0.6	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	0	B	0.8	1
Deck - Tablado/Plataforma	3	3	C	0.8	5
Girders - Vigas principales	3	3	C	0.8	5
Supports – Soportes	3	3	C	0.8	5
Abutments – Estribos	2	3	B	0.8	4
Piers – Pilas	4	2	C	0.8	5
CP					5

*Fuente: (Cervantes et al., 2024)*

Este diagnóstico sirvió como un punto de referencia clave y confiable para comparar los hallazgos obtenidos a través de metodologías digitales posteriores (Imágenes UAV y RV), ya que proporcionó una evaluación inicial y detallada del estado estructural del puente bajo condiciones reales.

#### **Evaluación digital con imágenes UAV (Fase 4)**

En esta etapa, se utilizó un dron DJI Mini 3 para capturar imágenes del puente con un solape del 70% en todas las direcciones (Cervantes et al., 2024). Posteriormente, cinco estudiantes certificados por el NHI realizaron inspecciones independientes usando únicamente este conjunto fotográfico.

Los resultados, presentados en la Tabla 2, muestran una variabilidad significativa entre evaluadores, especialmente en componentes estructurales críticos.

*Tabla 2. Inspección visual con fotos obtenidas con dron*

Elemento	CE					
	RE (Relevancia Estructural)	Inspector 1	Inspector 2	Inspector 3	Inspector 4	Inspector 5
Road Signage - Señalización vial	1	3	2	2	1	1
Lighting – Alumbrado	1	3	1	3	2	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	3	2	2	1	2

Sidewalks – Aceras	1	1	1	1	1	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	1	1	3	1	3
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	2	2	3	1
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	4	3	2	3	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	1	2	3	2	1
Deck - Tablado/Plataforma	3	5	5	4	3	4
Girders - Vigas principales	3	5	5	3	4	4
Supports – Soportes	3	5	5	3	4	4
Abutments – Estribos	2	5	4	3	4	4
Piers – Pilas	4	5	6	4	5	5
CP	5	6	4	5	5	5

*Fuente: Elaborado por la autora*

Con el objetivo de evaluar la consistencia en las calificaciones asignadas por los distintos evaluadores, se calculó la desviación estándar para cada uno de los elementos analizados. Estos valores se presentan en la Tabla 3. La desviación estándar correspondiente a la calificación global del puente fue de 0,63 puntos, lo cual pone de manifiesto la subjetividad inherente al análisis estructural basado únicamente en imágenes bidimensionales. Este hallazgo refuerza la necesidad de adoptar metodologías más precisas, estandarizadas y técnicamente consistentes.

*Tabla 3. Calificación de cada elemento por inspección mediante imágenes adquiridas por UAV*

Elemento	CE	Desviación estándar
Road Signage - Señalización vial	1 - 3	0.75
Lighting - Alumbrado	1 - 3	0.75
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	1 - 3	0.63
Sidewalks - Aceras	1	0
Road Surface - Superficie de la carretera	1 - 3	0.98

Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1 - 3	0.75
Expansion Joints - Juntas de expansión	2 - 4	0.63
Approach Fill - Relleno de aproximación	1 - 3	0.75
Deck - Tablado/Plataforma	3 - 5	0.75
Girders - Vigas principales	3 - 5	0.75
Supports - Soportes	3 - 5	0.75
Abutments - Estribos	3 - 5	0.63
Piers - Pilas	4 - 6	0.63

*Fuente: Elaborado por la autora*

### **Evaluación inmersiva con realidad virtual (Fase 5)**

La fase más innovadora del estudio consistió en la implementación de una inspección estructural inmersiva utilizando un modelo tridimensional desarrollado en el software Unity, el cual fue visualizado mediante dispositivos de realidad virtual (VR). En esta etapa, los mismos cinco inspectores que participaron en las fases previas realizaron nuevamente la evaluación estructural, esta vez recorriendo el puente de forma virtual.

Resulta pertinente analizar la variabilidad observada entre los evaluadores durante esta etapa con realidad virtual. Si bien los resultados muestran una mejora significativa en la homogeneidad de las calificaciones, ciertos elementos del puente continuaron presentando discrepancias, lo cual sugiere la persistencia de un grado de subjetividad en el proceso evaluativo.

La Tabla 4 presenta un análisis detallado por elemento, incluyendo la desviación estándar asociada a la calificación otorgada por cada inspector.

*Tabla 4. Calificación de cada elemento por inspección mediante RV*

Elemento	CE	Desviación estándar
Road Signage - Señalización vial	2 - 3	0.49
Lighting - Alumbrado	2	0.00
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2 - 3	0.49
Sidewalks - Aceras	1 - 2	0.49
Road Surface - Superficie de la carretera	2 - 3	0.49
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	2 - 3	0.40
Expansion Joints - Juntas de expansión	1 - 3	0.75
Approach Fill - Relleno de aproximación	2 - 3	0.49
Deck - Tablado/Plataforma	3 - 4	0.40
Girders - Vigas principales	3 - 4	0.49
Supports - Soportes	2 - 5	0.98
Abutments - Estribos	2 - 5	1.17
Piers - Pilas	5	0.00

*Fuente: Elaborado por la autora*

La comparación de las desviaciones estándar entre las Tablas 3 y 4 evidencia una reducción general en la variabilidad de las calificaciones al utilizar entornos de realidad virtual en lugar de imágenes obtenidas mediante UAV. Esta disminución sugiere una mayor consistencia y homogeneidad en los juicios emitidos por los evaluadores durante la inspección inmersiva.

La menor dispersión observada en la mayoría de los elementos evaluados sugiere una mejora en la objetividad del proceso, probablemente atribuible a una percepción espacial y contextual más precisa de los daños. No obstante, ciertos componentes estructurales continúan exhibiendo niveles moderados de variabilidad, lo cual indica la persistencia de cierto grado de subjetividad, particularmente en aquellos elementos cuya evaluación resulta más compleja.

En conjunto, estos resultados demuestran el potencial de la realidad virtual para optimizar la precisión y coherencia de las inspecciones visuales. Sin embargo, se destaca la necesidad de reforzar los criterios de evaluación para aquellos elementos que aún presentan discrepancias significativas.

Por otra parte, en la Tabla 5 se presenta la calificación individual de cada inspector, así como la calificación global del puente. Los resultados muestran una reducción notable en la dispersión de la calificación general, con una desviación estándar de 0, lo que indica un alto nivel de consenso entre los evaluadores.

*Tabla 5. Inspección visual con realidad virtual*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	CE				
		Inspector 1	Inspector 2	Inspector 3	Inspector 4	Inspector 5
Road Signage - Señalización vial	1	3	3	2	2	2
Lighting - Alumbrado	1	2	2	2	2	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	3	3	2	2	2
Sidewalks - Aceras	1	1	2	1	1	2
Road Surface - Superficie de la carretera	1	3	2	2	3	3
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	2	3	3	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	2	1	3	2	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	3	3	2	2	3
Deck - Tablado/Plataforma	3	3	4	3	3	3
Girders - Vigas principales	3	4	3	4	3	4
Supports - Soportes	3	3	3	5	2	3
Abutments - Estribos	2	3	2	5	2	4
Piers - Pilas	4	5	5	5	5	5
CP		5	5	5	5	5

*Fuente: Elaborado por la autora*

## Comparación entre metodologías

La aplicación de tres enfoques diferentes, inspección in situ, inspección fotográfica UAV e inspección inmersiva permitió establecer una comparación robusta. A continuación, se resumen los hallazgos principales:

*Tabla 6. Resultados por metodología*

Fase	Método de Inspección	Número de Inspectores	Calificación Global	Desviación Estándar	Tiempo de Inspección
1	Tradicional	1	5	-	50 minutos
4	Fotos de UAV	5	4 - 6	0.63	65 minutos
5	Realidad Virtual	5	5	0	15 minutos

*Fuente: Elaborado por la autora*

- La inspección tradicional otorgó una calificación global de 5 puntos, pero presentó limitaciones relacionadas con el acceso, la seguridad y el tiempo requerido.
- La inspección mediante imágenes obtenidas con UAV permitió mayor cobertura y accesibilidad, pero mostró dispersión en los resultados (desviación estándar de 0,63).
- La realidad virtual, en cambio, ofreció mayor uniformidad en los diagnósticos, mayor nivel de detalle visual y reducción significativa del tiempo de evaluación (de 50 a 15 minutos), sin pérdida de calidad.

Estos resultados refutan la percepción de que evaluaciones más rápidas conllevan menor rigurosidad, como lo señalaba (Moore et al., 2001), y respaldan lo planteado por (Yasin Yiğit & Uysal, 2025), quienes destacan la efectividad de los entornos inmersivos en inspecciones estructurales.

La incorporación de RV aporta beneficios clave en distintas dimensiones:

- Seguridad: Reduce el riesgo físico para el personal al eliminar la necesidad de trabajar en altura o en zonas peligrosas.

- Accesibilidad: Permite acceder virtualmente a zonas normalmente inaccesibles sin necesidad de equipos especializados.
- Eficiencia logística: Disminuye tiempos de traslado, reduce la duración de las inspecciones y genera documentación digital reutilizable.
- Seguimiento longitudinal: Facilita la creación de históricos digitales que permiten un análisis comparativo de deterioros a lo largo del tiempo (Belmonte Sánchez, 2022).
- Capacitación y colaboración: Favorece la formación de nuevos inspectores, el trabajo remoto y la colaboración interdisciplinaria.

A pesar de sus beneficios, la metodología presenta ciertas limitaciones:

- La calidad del modelo 3D depende de la resolución de las imágenes y condiciones de captura.
- El proceso de reconstrucción requiere hardware potente y conocimientos técnicos en fotogrametría, modelado y navegación VR.
- Algunos elementos estructurales pueden quedar ocultos o mal representados por sombras, reflejos o ángulos muertos.
- Usuarios inexpertos pueden experimentar fatiga visual o mareo durante el uso prolongado de la RV.
- La inversión inicial en equipo, software y capacitación es significativa, aunque su rentabilidad se percibe en el mediano plazo (Osorio Gómez, 2023).

Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones previas como las de (Chen et al., 2019), quienes destacan que los UAVs combinados con fotogrametría y modelos 3D representan una alternativa más segura y rentable para las inspecciones. Asimismo, (Cervantes et al., 2024) subrayan que esta tecnología facilita la localización precisa de daños y la planificación estratégica de mantenimiento. Finalmente, (Brioso & Fuentes Hurtado, 2020)



argumentan que integrar tecnologías como RV, BIM y fotogrametría en la formación académica es clave para fortalecer las competencias digitales de los futuros ingenieros civiles.

La realidad virtual ha demostrado ser una herramienta poderosa y complementaria en las inspecciones visuales de puentes. Su aplicación permite:

- Reducir tiempos y riesgos.
- Aumentar la precisión diagnóstica.
- Mejorar la trazabilidad histórica de los daños.
- Democratizar el acceso a tecnologías de inspección avanzada.

Si bien existen desafíos técnicos y económicos, sus beneficios a mediano y largo plazo justifican plenamente su incorporación progresiva en protocolos de mantenimiento y conservación de infraestructura. A medida que aumente la disponibilidad de equipos y la capacitación profesional, se espera que este tipo de soluciones inmersivas pasen a formar parte del nuevo estándar en la ingeniería estructural del siglo XXI.

## CONCLUSIONES

La presente investigación ha demostrado que la implementación de la realidad virtual en las inspecciones visuales de puentes representa un avance sustancial en la práctica de la ingeniería civil, tanto a nivel nacional como internacional. Los resultados evidencian que esta tecnología no solo mejora la precisión y consistencia en los diagnósticos estructurales, sino que también optimiza el tiempo de inspección y reduce significativamente los riesgos asociados al trabajo en campo.

En el contexto ecuatoriano, caracterizado por condiciones geográficas complejas y limitado acceso a tecnologías avanzadas, esta propuesta adquiere una relevancia particular. La posibilidad de realizar inspecciones detalladas en entornos virtuales permite superar barreras físicas y logísticas, democratizando el acceso a herramientas de diagnóstico estructural de alto nivel técnico.

A escala global, se observa una tendencia creciente hacia la adopción de tecnologías como UAV, fotogrametría y RV en países con infraestructura más desarrollada. Esta evolución marca una ruta de innovación para contextos emergentes como Ecuador. Si bien existen coincidencias en los beneficios potenciales de estas herramientas, las principales diferencias radican en la brecha tecnológica y en el nivel de formación técnica de los profesionales, aspectos que deben fortalecerse para lograr una implementación efectiva.

Durante la ejecución del proyecto, se constató que la calidad del modelo 3D y la efectividad de la inspección inmersiva dependen en gran medida de factores como la planificación del vuelo del dron, las condiciones ambientales al momento de la captura y el dominio técnico en softwares como Unity. También se identificaron desafíos importantes, entre ellos la necesidad de hardware especializado, la gestión de grandes volúmenes de datos fotogramétricos, y la

curva de aprendizaje para el desarrollo de experiencias inmersivas, que requirió apoyo técnico especializado. Además, se detectaron limitaciones propias de la RV, como la posibilidad de fatiga visual en usuarios no familiarizados.

Como línea futura, se propone explorar la integración de inteligencia artificial para la detección automatizada de daños en modelos tridimensionales. Asimismo, sería pertinente comparar los resultados obtenidos con tecnologías complementarias como los escáneres LiDAR o el uso de gemelos digitales.

En síntesis, la realidad virtual, integrada a metodologías tradicionales de inspección y potenciada por UAV y modelado 3D, tiene el potencial de transformar profundamente los procesos de evaluación estructural en puentes. Su incorporación progresiva en la práctica profesional y en los programas de formación académica será clave para el desarrollo de una infraestructura más segura, eficiente y sostenible en el siglo XXI.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agisoft LLC. (2020). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.6* [Manual de usuario]. [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_6\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf)
- Brioso, X., & Fuentes Hurtado, D. (2020). Adaptando el Lean Project Delivery System a la elaboración o actualización de un plan de estudios de ingeniería civil incorporando BIM, Realidad Virtual y Fotogrametría. *Advances in Building Education*, 4(3), 35–44. <https://doi.org/10.20868/abe.2020.3.4509>
- Catbas, F. N., Luleci, F., Zakaria, M., Bagci, U., LaViola, J. J., Cruz-Neira, C., & Reiners, D. (2022). Extended Reality (XR) for Condition Assessment of Civil Engineering Structures: A Literature Review. In *Sensors* (Vol. 22, Issue 23). MDPI. <https://doi.org/10.3390/s22239560>
- Cervantes, E., Castellanos, L., Matos, J. C., & Lantsoght, E. (2025). *Condition assessment of reinforced concrete bridges using visual inspection and 3D modeling*.
- Cervantes, E., Flores, K., Lantsoght, E., & Matos, J. C. (2024). *UAV-Visual Inspection: Bridge Condition Assessment Over a Decade*. <https://doi.org/10.2749/sanjose.2024.1298>
- Chen, S., Laefer, D. F., Mangina, E., Zolanvari, I., & Byrne, J. (2019). UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions. *Journal of Bridge Engineering*, 24(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001343](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001343)
- Khronos Group. (2023). *OpenXR specification version 1.0.27* [Especificación técnica]. <https://www.khronos.org/registry/OpenXR/specs/1.0/html/xrspec.html>
- Li, Y., Karim, M. M., & Qin, R. (2022). A Virtual Reality-based Training and Assessment System for Bridge Inspectors with an Assistant Drone. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 52(4). <https://doi.org/10.1109/THMS.2022.3155373>

- Lopresti, L., Gavino, S., Speroni, L., Defranco, G., & Fuertes, L. (2024). Fotogrametría y modelado 3D para el registro. *Revista Brasileira de Expressão Gráfica*, 12(1), 26–47.  
<https://datos.unlp.edu.ar>
- Marín Guzmán, C. R., & Maldonado Noboa, J. S. (2022). Estudio de las causas del colapso de puentes en Ecuador (2000-2022). *MQRInvestigar*, 6(4), 368–395.  
<https://doi.org/10.56048/mqr20225.6.4.2022.368-395>
- Meta. (2022). *Meta Quest 2: Safety & warranty manual* [Manual del dispositivo].  
<https://www.meta.com/legal/quest/quest-2-warranty/>
- Meta. (2022). *Meta Quest 2: Specifications*. Meta Store.
- Moore, M., Phares, B., Graybeal, B., Rolander, D., & Washer, G. (2001). *Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges, Volume I: Final Report*.  
<http://www.tfhrc.gov/hnr20/nde/home.htm>
- Muñoz, J., Agüero, P., Vargas, S., Villalobos, E., Vargas, G., Barrantes, R., & Loria, G. (2015). *Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual*.
- National Highway Institute. (2024). *Introduction to safety inspection of in-service bridges (Course No. FHWA-NHI-130101)* [Curso en línea]. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. [https://www.nhi.fhwa.dot.gov/course-search?tab=0&key=130101&srt=4&sf=0&course\\_no=130101](https://www.nhi.fhwa.dot.gov/course-search?tab=0&key=130101&srt=4&sf=0&course_no=130101)
- Osorio Gómez, A. R. (2023). *Reconstrucción virtual geométrica de puente existente basada en fotogrametría*. Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech.
- Unity Technologies. (2023). *Unity (versión 2022.3.5f1)* [Software].
- Unity Technologies. (2023). *Unity 2022.3 LTS Release Notes and System Requirements*. Unity Documentation.

Yasin Yiğit, A., & Uysal, M. (2025). Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry.

*Measurement*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931>

## ANEXO A: CALIFICACIÓN DEL PUENTE MEDIANTE IMÁGENES ADQUIRIDAS CON UAV POR CADA INSPECTOR

*Tabla 7. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #1*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	3	D	0.6	3
Lighting - Alumbrado	1	3	A	0.6	3
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	2	B	0.8	3
Sidewalks - Aceras	1	0	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	1	A	0.6	1
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	A	0.6	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	3	B	0.8	4
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	1	B	0.8	1
Deck - Tablado/Plataforma	3	3	C	1	5
Girders - Vigas principales	3	3	D	1	5
Supports - Soportes	3	3	D	1	5
Abutments - Estribos	2	3	D	1	5
Piers - Pilas	4	3	D	1	5
CP					5

*Tabla 8. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #2*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	2	A	0.6	2
Lighting - Alumbrado	1	3	A	0.6	3
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	2	A	0.6	2
Sidewalks - Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	3	B	0.8	3
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	2	A	0.6	2

Expansion Joints - Juntas de expansión	1	1	B	0.8	2
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	2	B	0.8	3
Deck - Tablado/Plataforma	3	3	D	0.8	4
Girders - Vigas principales	3	2	C	0.8	3
Supports - Soportes	3	2	C	0.8	3
Abutments - Estribos	2	2	B	0.8	3
Piers - Pilas	4	2	B	0.8	4
CP					4

*Tabla 9. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #3*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	2	A	0.6	2
Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	1	B	0.8	2
Sidewalks - Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	2	A	0.6	2
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	A	0.6	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	3	A	0.6	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	1	B	0.8	2
Deck - Tablado/Plataforma	3	2	C	0.8	3
Girders - Vigas principales	3	3	C	0.8	4
Supports - Soportes	3	4	C	0.8	5
Abutments - Estribos	2	4	B	0.8	5
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5
CP					5

*Tabla 10. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #4*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	1	A	0.6	1



Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	0	A	0.6	1
Sidewalks - Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	0	0	0	1
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	2	B	0.8	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	3	A	0.6	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	1	B	0.8	2
Deck - Tablado/Plataforma	3	2	C	0.8	3
Girders - Vigas principales	3	3	C	0.8	4
Supports - Soportes	3	3	C	0.8	4
Abutments - Estribos	2	3	B	0.8	4
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5
CP					5

*Tabla 11. Inspección mediante imágenes adquiridas con UAV por el inspector #5*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	1	A	0.6	1
Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	1	B	0.8	2
Sidewalks - Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	3	A	0.6	3
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	1	A	0.6	1
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	3	A	0.6	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	0	B	0.8	1
Deck - Tablado/Plataforma	3	3	C	0.8	4
Girders - Vigas principales	3	3	C	0.8	4
Supports - Soportes	3	3	C	0.8	4
Abutments - Estribos	2	3	B	0.8	4
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5

## ANEXO B: CALIFICACIÓN DEL PUENTE MEDIANTE RV POR CADA INSPECTOR

*Tabla 12. Inspección del puente mediante RV por el inspector #1*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	2	A	0.6	2
Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	1	B	0.8	2
Sidewalks - Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	3	A	0.6	3
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	A	0.6	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	2	A	0.6	2
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	1	B	0.8	2
Deck - Tablado/Plataforma	3	2	C	0.8	3
Girders - Vigas principales	3	2	C	0.8	3
Supports - Soportes	3	1	C	0.8	2
Abutments - Estribos	2	1	B	0.8	2
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5
CP					5

*Tabla 13. Inspección del puente mediante RV por el inspector #2*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	2	A	0.6	2
Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	1	B	0.8	2
Sidewalks - Aceras	1	2	A	0.6	2
Road Surface - Superficie de la carretera	1	3	A	0.6	3

Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	A	0.6	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	3	A	0.6	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	2	B	0.8	3
Deck - Tablado/Plataforma	3	2	C	0.8	3
Girders - Vigas principales	3	3	C	0.8	4
Supports - Soportes	3	2	C	0.8	3
Abutments - Estribos	2	3	B	0.8	4
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5
CP					5

*Tabla 14. .Inspección del puente mediante RV por el inspector #3*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	3	A	0.6	3
Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	2	B	0.8	3
Sidewalks - Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	3	A	0.6	3
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	A	0.6	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	2	A	0.6	2
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	2	B	0.8	3
Deck - Tablado/Plataforma	3	2	C	0.8	3
Girders - Vigas principales	3	3	C	0.8	4
Supports - Soportes	3	2	C	0.8	3
Abutments - Estribos	2	2	B	0.8	3
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5
CP					5

*Tabla 15. Inspección del puente mediante RV por el inspector #4*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	2	A	0.6	2
Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	1	B	0.8	2
Sidewalks - Aceras	1	1	A	0.6	1
Road Surface - Superficie de la carretera	1	2	A	0.6	2
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	3	A	0.6	3
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	3	A	0.6	3
Approach Fill - Relleno de aproximación	2	1	B	0.8	2
Deck - Tablado/Plataforma	3	2	C	0.8	3
Girders - Vigas principales	3	3	C	0.8	4
Supports - Soportes	3	4	C	0.8	5
Abutments - Estribos	2	4	B	0.8	5
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5
CP					5

*Tabla 16. Inspección del puente mediante RV por el inspector #5*

Elemento	RE (Relevancia Estructural)	GD	Failure Type	FCF	CE
Road Signage - Señalización vial	1	3	A	0.6	3
Lighting - Alumbrado	1	2	A	0.6	2
Bridge Guardrail - Barandilla del puente	2	2	B	0.8	3
Sidewalks - Aceras	1	2	A	0.6	2
Road Surface - Superficie de la carretera	1	2	A	0.6	2
Bridge Drainage System - Sistema de drenaje del puente	1	2	A	0.6	2
Expansion Joints - Juntas de expansión	1	1	A	0.6	1

Approach Fill - Relleno de aproximación	2	2	B	0.8	3
Deck - Tablado/Plataforma	3	3	C	0.8	4
Girders - Vigas principales	3	2	C	0.8	3
Supports - Soportes	3	2	C	0.8	3
Abutments - Estribos	2	1	B	0.8	2
Piers - Pilas	4	3	C	0.8	5
CP					5